

UNIVERSIDAD NACIONAL DEL CALLAO
FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA QUÍMICA



TESIS

**“CONDICIONES ÓPTIMAS DE OPERACIÓN EN UNA CELDA
DE ELECTROCOAGULACIÓN PARA LA REDUCCIÓN DE LA
DEMANDA QUÍMICA DE OXÍGENO EN AGUAS
RESIDUALES DOMÉSTICAS”**

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE

INGENIERO QUIMICO

**ACUÑA ALCÁNTARA GABRIELA
PUJAICO LIZARBE JAVIER FORTUNATO**

Callao, 2019

PERÚ

PRÓLOGO DEL JURADO

La presente Tesis fue Sustentada por la señorita Bachiller **ACUÑA ALCANTARA GABRIELA** y el señor Bachiller **PUJAICO LIZARBE JAVIER FORTUNATO** ante el **JURADO DE SUSTENTACIÓN DE TESIS** conformado por los siguientes Profesores Ordinarios:

ING° JULIO CÉSAR CALDERÓN CRUZ PRESIDENTE

ING° CARMEN GILDA AVELINO CARHUARICRA SECRETARIA

ING° LEONARDO RUFINO CARLOS PEREYRA VOCAL

ING° LUÍS AMÉRICO CARRASCO VENEGAS ASESOR

Tal como está asentado en el Libro de Actas N° 2 de Tesis sin Ciclo de Tesis Folio N° 126 y Acta N° 309 de fecha **OCHO DE MAYO DE 2019**, para optar el Título Profesional de Ingeniero Químico en la Modalidad de Titulación de Tesis sin Ciclo de Tesis, de conformidad establecido por el Reglamento de Grados y Títulos aprobado con la Resolución N° 245–2018–CU de fecha 30 de octubre de 2018

DEDICATORIA

A Dios:

Por brindarnos la oportunidad de vivir a lado de las personas indicadas, acompañándonos en cada paso de nuestras vidas, por darnos fortaleza, salud, amor e iluminar nuestras mentes.

A mi madre:

Por su cariño y tierna mirada de ojos color pardo que me alegra la existencia haciendo que la honre con mis palabras con el corazón con la mente y mis acciones.

A nuestros padres:

Por su dedicación y cariño que con gran amor, esfuerzo y sacrificio hicieron que cumpla tan anhelado sueño.

A nuestros amigos:

Por su apoyo brindado, por los consejos y gratos momentos compartidos a lo largo de la carrera universitaria.

ÍNDICE

ÍNDICE DE FIGURAS.....	3
ÍNDICE DE TABLAS.....	4
ÍNDICE DE GRÁFICOS.....	5
RESUMEN	6
ABSTRACT	7
I. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	9
1.1 Determinación del problema	9
1.2 Formulación del problema.....	10
1.3 Objetivos de la investigación.....	11
1.4 Justificación de la investigación	11
II. MARCO TEÓRICO	14
2.1 Antecedentes del estudio.....	14
2.2 Bases teóricas científicas.....	22
2.3 Definiciones de términos claves.....	37
III. VARIABLES E HIPÓTESIS.....	39
3.1 Variables de la investigación.....	39
3.2 Operacionalización de variables.....	40
3.3 Hipótesis general e hipótesis específicas.....	41
IV. METODOLOGÍA.....	42
4.1 Tipo de investigación	42
4.2 Diseño de la investigación.....	42
4.3 Población y muestra.....	62
4.4 Técnicas e Instrumentos de recolección de datos	62
4.5 Procedimiento de recolección de datos.....	64
4.6 Procesamiento estadístico y análisis de datos	65
V. RESULTADOS.....	66
5.1 Reporte de ensayo en medio ácido.....	66
5.2 Reporte de ensayo en medio neutro	68

5.3	Reporte de ensayo en medio básico	71
5.4	Análisis comparativo de los medios	74
VI.	DISCUSIÓN DE RESULTADOS	78
6.1	Contrastación de hipótesis con los resultados.....	78
6.2	Contrastación de resultados con otros estudios similares	81
VII.	CONCLUSIONES	82
VIII.	RECOMENDACIONES	83
	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	84
	ANEXOS	88

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA N° 1	Decantador primario	23
FIGURA N° 2	Esquema de una celda de electrocoagulación.....	30
FIGURA N° 3	Tamaños aproximados de las partículas.....	33
FIGURA N° 4	Conexión monopolar en paralelo	36
FIGURA N° 5	Conexión monopolar en serie	36
FIGURA N° 6	Conexión bipolar en serie	37
FIGURA N° 7	Relación de las variables de la investigación.....	39
FIGURA N° 8	Diseño de la investigación	43
FIGURA N° 9	EBAR 085 Estación de bombeo de aguas residuales.	45
FIGURA N° 10	Toma de muestra del EBAR N° 085	46
FIGURA N° 11	Materiales y/o equipos.....	48
FIGURA N° 12	Construcción de la celda	49
FIGURA N° 13	Instalación del caño de PVC.....	50
FIGURA N° 14	Base de soporte para los electrodos	50
FIGURA N° 15	Instalación de los electrodos	51
FIGURA N° 16	Fuente de poder	52
FIGURA N° 17	Conexión de los cables a los cocodrilos	52
FIGURA N° 18	Celda de electrocoagulación armada.....	53
FIGURA N° 19	Diagrama de proceso – celda de electrocoagulación..	53
FIGURA N° 20	Acondicionamiento de la muestra residual	54
FIGURA N° 21	Acondicionamiento mediante soda caústica	55
FIGURA N° 22	Envases proporcionados por el laboratorio.....	56
FIGURA N° 23	Zonas de procesos	62
FIGURA N° 24	Programación excel.....	65

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA N° 1	Operacionalización de variables	40
TABLA N° 2	Horas del muestreo	45
TABLA N° 3	Parámetros físicos químicos y microbiológicos.....	47
TABLA N° 4	Materiales y/o equipos	47
TABLA N° 5	Reactivos para modificación del pH.....	48
TABLA N° 6	Pruebas para determinar la distancia entre electrodos .	51
TABLA N° 7	Resultados de DQO a diferente espacio de electrodos	51
TABLA N° 8	pH Considerados para el inicio de los procesos	54
TABLA N° 9	Fórmula para cálculo del % de reducción de la DQO ...	55
TABLA N° 10	Intensidad de corriente 3,5 A	56
TABLA N° 11	Intensidad de corriente 5,0 A	57
TABLA N° 12	Intensidad de corriente 6,5 A	57
TABLA N° 13	Intensidad de corriente 3,5 A	58
TABLA N° 14	Intensidad de corriente 5,0 A	59
TABLA N° 15	Intensidad de corriente 6,5 A	59
TABLA N° 16	Intensidad de corriente 3,5 A	60
TABLA N° 17	Intensidad de corriente 5,0 A	61
TABLA N° 18	Intensidad de corriente 6,5 A	61
TABLA N° 19	Parámetros según D.S. N° 003–2010–MINAM	63
TABLA N° 20	Referencias iniciales.....	64
TABLA N° 21	% Reducción de DQO vs tiempo pH = 5,6 e I = 3,5 A...	66
TABLA N° 22	% Reducción de DQO vs tiempo pH = 5,6 e I = 5,0 A...	67
TABLA N° 23	% Reducción de DQO vs tiempo pH = 5,6 e I = 6,5 A...	68
TABLA N° 24	% Reducción de DQO vs tiempo pH = 6,92 e I = 3,5 A.	69
TABLA N° 25	% Reducción de DQO vs tiempo pH = 6,92 e I = 5,0 A.	70
TABLA N° 26	% Reducción de DQO vs tiempo pH = 6,92 e I = 6,5 A.	71
TABLA N° 27	% Reducción de DQO vs tiempo pH = 8,04 e I = 3,5 A.	72
TABLA N° 28	% Reducción de DQO vs tiempo pH = 8,04 e I = 5,0 A.	73
TABLA N° 29	% Reducción de DQO vs tiempo pH = 8,04 e I = 6,5 A.	74

ÍNDICE DE GRÁFICOS

GRAFICA N° 1	% Reducción DQO a pH = 5,6 e I = 3,5 A66
GRAFICA N° 2	% Reducción DQO a pH = 5,6 e I = 5,0 A67
GRAFICA N° 3	% Reducción DQO a pH = 5,6 e I = 6,5 A68
GRAFICA N° 4	% Reducción DQO a pH = 6,92 e I = 3,5 A69
GRAFICA N° 5	% Reducción DQO a pH = 6,92 e I = 5,0 A70
GRAFICA N° 6	% Reducción DQO a pH = 6,92 e I = 6,5 A71
GRAFICA N° 7	% Reducción DQO a pH = 8,04 e I = 3,5 A72
GRAFICA N° 8	% Reducción DQO a pH = 8,04 e I = 5,0 A73
GRAFICA N° 9	% Reducción DQO a pH = 8,04 e I = 6,5 A74
GRAFICA N° 10	% Reducción DQO comparativo a pH = 5,675
GRAFICA N° 11	% Reducción DQO comparativo a pH = 6,92.....76
GRAFICA N° 12	% Reducción DQO comparativo a pH = 8,04.....77

RESUMEN

La presente tesis demuestra la efectividad de una nueva tecnología para la reducción de contaminantes de las aguas residuales domésticas causadas por las actividades diarias del ser humano, esta nueva tecnología es la electrocoagulación.

En esta investigación se planteó reducir la demanda química de oxígeno (DQO) de las aguas residuales domésticas provenientes del EBAR N° 085, ubicada en el sector II de Lurín, para lograr esta reducción se determinó las condiciones óptimas de operación en una celda de electrocoagulación mediante la variación del pH, intensidad de corriente y tiempo de reacción como resultado positivo, se obtuvo un porcentaje de reducción de 63,3%. Este valor óptimo de operación se obtuvo con un medio ácido del efluente con valor de 5,60, intensidad de corriente de 5,0 amperios y un tiempo de reacción de 42 minutos, con lo cual se cumple según indica los límites máximos permisibles para los efluentes de la normativa del decreto supremo N° 003-2010-MINAM vigente en el territorio peruano.

Palabras clave : electrocoagulación, DQO.

ABSTRACT

This thesis demonstrates the effectiveness of a new technology for the reduction of pollutants from domestic wastewater caused by the daily activities of the human being, this new technology is electrocoagulation.

In this research it was proposed to reduce the chemical oxygen demand (COD) of domestic wastewater from EBAR N° 085, located in sector II of Lurin. To achieve this reduction, optimum operating conditions were determined in an electrocoagulation cell through the variation of pH, current intensity and reaction time as a positive result, a reduction percentage of 63,3% was obtained. This optimum value of operation was obtained with an acid medium of the effluent with a value of 5,60, current intensity of 5,0 amps and a reaction time of 42 minutes, which is fulfilled as indicated by the maximum permissible limits for the effluents of the regulations of supreme decree No. 003–2010–MINAM in force in the Peruvian territory.

Key words : electrocoagulation, COD.

INTRODUCCIÓN

El agua es fundamental para todas las formas de vida, lo que la convierte en uno de los recursos esenciales de la naturaleza, pero en el presente tiempo el uso indiscriminado de este recurso ha generado una escasez de este, entre otros factores como el crecimiento demográfico, los contaminantes en los cuerpos de agua y su inadecuada utilización. Debido a esto se debe realizar diversos procesos de tratamiento ya sea para recuperar o descargar el agua al alcantarillado y así reducir la contaminación de este recurso hídrico.

La mayoría de las plantas de tratamiento de agua en el país están basadas en tecnologías convencionales como el tratamiento físico-químico el cual utiliza coagulantes primarios como el sulfato de aluminio, sales de hierro y polímeros sintéticos los cuales pueden ser contaminados durante su proceso de fabricación con monómeros u otras sustancias tóxicas, estos métodos convencionales utilizan grandes cantidades de productos químicos los cuales encarecen el tratamiento, además en algunas plantas de tratamiento no se aplica la dosis óptima de estos coagulantes o polímeros, realizando una sobredosificación de estos productos y su uso indiscriminado puede incrementar la concentración de aluminio en el agua tratada; ocasionando problemas para la salud.

En la actualidad existen una serie de tecnologías emergentes que están basadas en la electroquímica y que se presentan como alternativas que ofrecen ventajas competitivas frente a las tecnologías tradicionales.

Se puede mencionar en este grupo a la electrocoagulación que en los últimos años ha cobrado interés científico, pues se necesita entender a fondo el proceso y sus mecanismos de reacción. Además, esta técnica ayuda a cumplir la normativa ambiental vigente en el país “Límites Máximos Permisibles” D.S. N° 003–2010–MINAM–Estándares Nacionales de Calidad Ambiental para el agua.

I. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1 Determinación del problema

Las aguas residuales en el Perú forman parte de un problema ambiental generando una contaminación de manera irracional a los ecosistemas donde son vertidas, siendo principalmente afectados los seres vivos dado que están expuestos a una fuente de infección y contaminación.

Las principales fuentes de generación en las aguas residuales domésticas las constituyen principalmente las zonas residenciales y los centros comerciales, por lo tanto, la cantidad de agua residual depende directamente de la cantidad de población. Entre los distintos elementos contaminantes que contiene el agua residual doméstica, destaca el alto valor de la demanda química de oxígeno.

Hoy en día las diversas industrias de tratamientos de aguas residuales utilizan métodos que están basados en tecnologías convencionales como los tratamientos químicos y biológicos. Los tratamientos químicos utilizan coagulantes primarios como el sulfato de aluminio, sales de hierro y polímeros sintéticos los cuales pueden ser contaminados durante su proceso de fabricación con monómeros u otras sustancias tóxicas. Los tratamientos biológicos, si bien son amigables con el medio ambiente, pero estos necesitan de una mayor área de tratamiento y tiempo de operación.

Por ello es necesario reducir la contaminación y plantear el tratamiento de estas aguas tomando en cuenta las características físico-químicas y microbiológicas con las que se desechan, principalmente la demanda química de oxígeno (DQO), encontradas en la estación de bombeo de agua residual (EBAR 085)

Ante esta problemática expuesta existe una posible solución la cual consiste en aplicar la técnica de electrocoagulación y lograr desestabilizar las partículas suspendidas mediante el paso de la corriente eléctrica a

través de placas metálicas instaladas en forma paralela (hierro), es por ello que su utilización en el tratamiento de agua se hace necesaria teniendo en cuenta las realidades socio-económicas de nuestro país.

Nuestra propuesta técnica consiste en determinar las condiciones óptimas de operación (intensidad de corriente, potencial de hidrógeno y tiempo de reacción) dentro de una celda utilizando la técnica de electrocoagulación con electrodos de hierro, alimentando al sistema con una fuente de energía externa (corriente continua)

La viabilidad de la técnica de electrocoagulación se estima contribuyendo con la reducción del tiempo, costos de operación y de la utilización de grandes extensiones de terreno. Por tal efecto se va realizar pruebas de ensayo en una celda de electrocoagulación de escala laboratorio; permitiendo determinar las condiciones óptimas de operación para la reducción de la DQO.

1.2 Formulación del problema

1.2.1 Problema general

¿Cuáles son las condiciones óptimas de operación en una celda de electrocoagulación para la reducción de la demanda química de oxígeno en aguas residuales domésticas?

1.2.2 Problemas específicos

- 1)** ¿Cuáles son las características físicas, químicas y microbiológicas de las aguas residuales domésticas que conforman la muestra experimental?
- 2)** ¿Cuáles son los parámetros de control en una celda de electrocoagulación para la reducción de la demanda química de oxígeno en aguas residuales domésticas?

1.3 Objetivos de la investigación

1.3.1 Objetivo General

Determinar las condiciones óptimas de operación en una celda de electrocoagulación para la reducción de la demanda química de oxígeno en aguas residuales domésticas.

1.3.2 Objetivos Específicos

- 1) Identificar las características físicas, químicas y microbiológicas de las aguas residuales domésticas que conforman la muestra experimental.
- 2) Determinar los parámetros de control en una celda de electrocoagulación para la reducción de la demanda química de oxígeno en aguas residuales domésticas.

1.4 Justificación de la investigación

Las razones que justifican la investigación propuesta son las siguientes :

1.4.1 Legal

La presente investigación tiene como principios legales los siguientes:

En el inciso 22 del artículo 2° de la Constitución Política del Perú establece que toda persona tiene derecho a gozar de un ambiente equilibrado y adecuado al desarrollo de su vida; señalando en su artículo 67° que el Estado determina la Política Nacional del Ambiente.

En el artículo I del Título Preliminar de la Ley N° 28611–Ley General del Ambiente, establece que toda persona tiene el derecho irrenunciable a vivir en un ambiente saludable, equilibrado y adecuado para el pleno desarrollo de la vida, y el deber de contribuir a una efectiva gestión ambiental y de proteger el ambiente, así como sus componentes, asegurando particularmente la salud de las personas en forma individual y colectiva, la conservación de la diversidad biológica, el aprovechamiento sostenible de los recursos naturales y el desarrollo sostenible del país.

En el D.S. N° 003–2010–MINAM nos establece los Límites Máximos Permisibles; donde define al Límite Máximo Permisible (LMP) como la medida de concentración o grado de elementos, sustancias o parámetros físicos, químicos y biológicos, que caracterizan a un efluente o una emisión, que al ser excedida causa o puede causar daños a la salud, al bienestar humano y al ambiente. Su cumplimiento es exigible legalmente por el Ministerio del Ambiente y los organismos que conforman el Sistema Nacional de Gestión Ambiental.

1.4.2 Teórica

La investigación propuesta busca mediante la aplicación de la teoría y los conceptos básicos de la electroquímica y la electrocoagulación, encontrar soluciones para minimizar las cargas contaminantes de las aguas residuales domésticas que afectan al país y dar aportes de los conocimientos que obtendremos mediante los ensayos de experimentación realizados en el laboratorio utilizando el proceso de electrocoagulación para el tratamiento de aguas, donde se determinan las condiciones de operación óptimas para su uso.

1.4.3 Tecnológica

Esta investigación propone para el tratamiento de aguas residuales domésticas una tecnología limpia y emergente utilizando la técnica de la electrocoagulación para reducir los contaminantes del efluente, esto combate la contaminación ambiental al no utilizar coagulantes químicos ya que con cargas eléctricas desestabiliza las partículas coloidales permitiendo su aglomeración y precipitación, produciendo la depuración del agua contaminada, además de ser mucho más versátil y permite tratar el tipo de efluente doméstico.

1.4.4 Económica

El proceso de electrocoagulación permite la remoción de una alta cantidad de contaminante en una sola operación, situación que convierte a esta tecnología en una opción económica y ambiental para el

tratamiento de los efluentes domésticos. El capital y los costos de operación son mucho menores comparativamente con un tratamiento por métodos convencionales, incluso se puede llegar a recuperar los costos de capital en menos de un año. Estos costos dependen del volumen a tratar, de la naturaleza del agua residual, de los contaminantes a ser removidos y de la localidad en la que se desea realizar el tratamiento.

II. MARCO TEÓRICO

2.1 Antecedentes del estudio

- a) Arango Ruiz, Álvaro y Garcés Giraldo, Luis. Diseño de una celda de electrocoagulación para el tratamiento de aguas residuales de la industria láctea. El sistema de electrocoagulación juega un papel muy importante en la efectividad de remoción de contaminantes. Algunos aspectos de diseño a tener en cuenta están relacionados con la celda, los electrodos, los materiales de este, la geometría y la disposición de los electrodos son fundamentales para que la aplicación de la electrocoagulación tenga resultados óptimos.

La presente información aportó a nuestro trabajo de investigación que para separaciones entre electrodos inferiores a 10 mm los tratamientos se hacen prolongados y para distancias mayores a 10 mm no se presentaron cambios importantes en el proceso, por ende, nuestros electrodos presentan una separación de 10 milímetros.

- b) Ojeda Armaignac, Elaine; Hing Cortón, Romelia y Gonzales Díaz, Yudith. Estudio de la factibilidad del proceso de electrocoagulación para la obtención de sólidos a partir de la vinaza. Los experimentos de electrocoagulación se desarrollaron para la separación de los componentes sólidos de la vinaza que se utilizan como inhibidores de la corrosión. La vinaza se obtiene como residuo del proceso de destilación del alcohol a partir de las mieles finales de la caña de azúcar que procede del Complejo Agroindustrial Urbano Noris de la provincia de Holguín.

El objetivo principal de la investigación fue evaluar la factibilidad del proceso de electrocoagulación para la separación de sólidos a partir de la vinaza. Los efectos de la intensidad de corriente, pH, el tiempo de electrólisis y sus interacciones, se investigaron mediante un diseño de experimento factorial 3³. Como variables de respuesta se analizaron: la cantidad de sólidos obtenidos y el consumo de energía

del proceso. Se comprobó que las tres variables son significativas sobre las variables de respuesta. La intensidad de corriente es la de mayor relevancia en cuanto a los sólidos obtenidos y el tiempo de electrólisis en cuanto al consumo de energía.

En la determinación de las condiciones óptimas de operación, se consideró el procedimiento de optimización de respuesta múltiple. La mejor conveniencia y el óptimo se alcanzaron para el pH 8,7; la intensidad de corriente de 11 A y el tiempo de electrólisis de 5 min, con los que se obtuvo la mayor cantidad de sólidos y el menor consumo de energía. Para dichas condiciones, se realizó el cálculo económico preliminar, teniendo en cuenta: el consumo de energía, el gasto del material de los electrodos y el consumo de reactivos químicos; con lo que se obtuvo el correspondiente costo de operación el cual ascendió a $\$ 488,74 * 10^3/\text{Kg}$

La información aportada colaboró a nuestro trabajo de investigación que las variables estudiadas: intensidad de corriente, pH y tiempo, presentan un efecto altamente significativo sobre la cantidad de sólidos obtenidos y el consumo de energía en el intervalo definido para cada variable.

- c) Aguilar Ascon, Edwar. Evaluación de la eficiencia de una celda de electrocoagulación a escala laboratorio para el tratamiento de agua. La contaminación causada por el uso del agua en muchas de las actividades del ser humano, nos lleva a la necesidad de utilizar nuevas tecnologías para remoción de contaminantes de las aguas residuales, una de ellas es la electrocoagulación. En este estudio se planteó construir un reactor de electrocoagulación para evaluar la eficiencia en la remoción de la DQO (Demanda Química de Oxígeno) de aguas residuales provenientes de la industria de pintura; así como determinar las mejores condiciones de pH, conductividad, intensidad de corriente y tiempo de tratamiento. En base a los resultados

obtenidos al realizar el tratamiento del efluente con electrocoagulación, se determinó una eficiencia promedio del 87 % en la remoción de la DQO. Estos valores óptimos de operación se obtuvieron con una intensidad de corriente $I = 5$ amperios, con el pH natural del efluente de 7,12 y un tiempo de tratamiento de 15 minutos, con lo cual se cumple la normativa ambiental vigente en el país. Otro aspecto importante observado en este estudio fue la calidad del lodo producido en el tratamiento, de aspecto mucho más compacto que un lodo físico químico o biológico.

La variación del medio de pH (ácido, básico y neutro) nos sirvió como referencia para la aplicación en nuestra investigación debido a que sería un factor importante para la reducción de la demanda química de oxígeno.

- d)** Arango Ruiz, Álvaro. Efectos del pH y la conductividad en la electrocoagulación de aguas residuales de la industria láctea. Se aplicó electrocoagulación al agua residual de la industria láctea; para ello se varió el pH, densidad de corriente y el tiempo de tratamiento, logrando remover la mayor cantidad de demanda química de oxígeno en un pH de 5 con densidad de corriente de $43,23 \text{ A/m}^3$ y 15 minutos de tratamiento; a estas condiciones se removió el 93,99%

De la presente información brindada se tomó como referencia que al añadir sales (cloruro de sodio) generó el aumento de la conductividad en el agua residual de la industria láctea.

Adicionalmente se tuvo un mejor efecto añadiendo cloruros en vez de sulfatos debido a la solubilidad de las sales en reacción, por ello decidimos variar el pH original de la muestra a pH ácido mediante ácido clorhídrico para evitar precipitaciones.

- e)** García Espinoza, José. Remoción de arsénico en agua por electrocoagulación. Se investigó la eficiencia de la electrocoagulación en la producción in situ de coagulante férrico ($\text{FeP}\%$) y su remoción

(FeR%) junto con el arsénico presente en agua (AsR%), en función de diferentes parámetros de operación. Con este objetivo se diseñaron y construyeron 4 reactores operados con flujo pistón y conectados a un tren de tratamiento de clarificación, compuesto de un floculador hidráulico y mecánico, un sedimentador de alta tasa y un filtro mixto de arena-antracita. Adicionalmente se compararon los costos de tratamiento frente a la coagulación química convencional.

Los resultados obtenidos indican que se obtienen mejores resultados tanto en la producción como en la remoción de hierro mediante electrocoagulación, conforme la separación de electrodos disminuye y la conductividad aumenta, siempre y cuando la pérdida de carga se mantenga por debajo de los 7 metros de H₂O durante el tiempo de operación con caudales mayores a 5,0 L/min, densidades de corriente de aproximadamente 0,015 A/cm², además de la presencia de cloro libre aproximadamente en 7,0 mg/L

Adicionalmente, se observó que gradientes altos de floculación (172/76/39 s⁻¹) y generados mediante unidades hidráulicas son recomendables para obtener las mejores remociones de hierro y arsénico, este último con dosis inicial de hasta 350 µg L⁻¹, que permiten obtener efluente en el sedimentador que cumplen con la norma 127–SSA1

La electrocoagulación resultó ser en promedio igualmente eficiente en la remoción de hierro y arsénico que la coagulación química convencional, con costos muy similares de 1,371 \$/m³ y 1,363 \$/m³ para el primer y segundo caso, respectivamente.

Finalmente, el agua tratada por electrocoagulación produjo menor cantidad de lodos en comparación con el tratamiento convencional químico lo cual es importante y será tomado en cuenta para nuestra investigación.

f) Secula, Marius; Cretescu, Igor y Petrescu, Stelian. Estudio experimental de eliminación de índigo carmín de solución acuosa por electrocoagulación. Este artículo presenta un estudio experimental sobre la eliminación del colorante “índigo carmín” de soluciones acuosas utilizando un reactor de electrocoagulación agitado por lotes. Las pruebas experimentales se llevaron a cabo en un sistema discontinuo provisto de electrodos de acero. El objetivo principal fue investigar los efectos de los parámetros operativos, como el pH, la concentración inicial, la duración de la electrólisis, la densidad de corriente y la concentración de soporte electrolítico, en el tratamiento de un agua residual sintética que contiene colorante índigo carmín en el proceso de electrocoagulación por lotes. El reactor de electrocoagulación discontinuo se hizo funcionar a varias densidades de corriente que variaban de 5,46 a 54,57 $A \cdot m^{-2}$. La concentración inicial de precipitado se dispuso entre 25 y 100 $mg \cdot L^{-1}$

El valor inicial de pH se varió de 5 a 9, mientras que la concentración del soporte de electrolito varió de 0,2 a 4,5 $g \cdot L^{-1}$. Se demostró que el control del pH durante el proceso de electrocoagulación no es beneficioso en el caso de la eliminación de índigo carmín. Los valores de la constante de frecuencia se determinaron de acuerdo con el modelo óptico pseudo de primer orden que corresponde a los datos experimentales. Las constantes de velocidad más altas se lograron para una densidad de corriente de 54,57 $A \cdot m^{-2}$, una concentración de colorante inicial de 25 $mg \cdot L^{-1}$, un pH inicial de 8 y una concentración de electrolito de fondo de 77 Mm

Se determinó mediante ensayos que la mayor eficiencia se logró con un pH no ajustado, es decir, en medio ácido y básico no generaron óptimas condiciones de operación, teniendo esto como referencia para nuestra investigación.

- g)** Arias Cepeda, William. Remoción de cromo (III) y DQO a través de la electrocoagulación en aguas residuales de la industria curtiembre haciendo uso racional de la energía. Los desechos de la industria curtiembre en la región Cundiboyacense son frecuentemente drenados hacia los cuerpos de agua circundantes sin considerar el efecto que pueden tener las altas cantidades de residuos sobre las aguas de ríos como el Bogotá y el Tunjuelo.

Para la remoción de la concentración del cromo y de la DQO se aplicó el método de la electrocoagulación variando el pH inicial, la intensidad de corriente y la utilización de dos tipos de corriente: corriente directa y corriente alterna, consiguiendo remociones cercanas al 95% de cromo y del 70% de la demanda química de oxígeno en un tiempo de 20 minutos.

Al hacer aplicación de los conceptos involucrados en el uso racional de la energía a través del PAC (Corriente Alterna Pulsante) se logró mejorar la eficiencia consiguiéndose una reducción aproximadamente del 40% en el consumo de energía eléctrica con respecto a remociones similares usando corriente continua.

Se tomó como base para nuestra investigación las características de la celda de electrocoagulación (material de la celda, caracterización en la toma de muestra, fuente de voltaje de corriente continua, etc.)

- h)** Arboleda Camacho, Juan y Herrera López, Paula. Evaluación de un proceso de electrocoagulación en un reactor tipo batch para la remoción de cromo hexavalente (Cr^{+6}) con electrodos de aluminio – aluminio y de hierro – aluminio en condiciones de laboratorio. Los sistemas de electrocoagulación como alternativa para la remoción de contaminantes, permiten que a través del paso de la corriente eléctrica y la adición electrolítica de iones metálicos coagulantes generados por electro – oxidación directamente del ánodo de

sacrificio, accedan que este se disuelva debido a la aplicación de una diferencia de potencial, produciendo iones que permitan la aglomeración del contaminante de la misma forma que si se adicionara un producto químico, que luego permita su remoción.

La presente investigación se llevó a cabo en el Laboratorio de Ingeniería Ambiental de la Universidad Autónoma de Colombia. Se utilizó un reactor discontinuo con capacidad máxima de 1 936 mililitros; el diseño experimental consistió en realizar diferentes ensayos variando el material de los electrodos (hierro y/o aluminio), las distancias entre electrodos de 5 mm, 10 mm, 15 mm y la variación de pH inicial (4, 6 y 8); todos estos experimentos se llevaron a cabo con un tiempo de operación de 30 minutos, una agitación de 390 rpm para evitar la polarización de los electrodos y con un tiempo de sedimentación de 60 minutos aproximadamente. Al evaluar las eficiencias de remoción se obtuvo que las condiciones óptimas para el proceso de remoción de Cr (VI) por electrocoagulación fueran con electrodos de aluminio, a una distancia entre electrodos de 5mm y un pH inicial de 8 Posteriormente se evaluó el tiempo de residencia en el electrocoagulador, con el fin de determinar el comportamiento de remoción bajo las condiciones establecidas; obteniendo una eficiencia de remoción del 99% al cabo de 40 minutos.

Por último, se realizó el experimento con una muestra proveniente de un efluente una curtiembre, y se observó el comportamiento de remoción de Cr⁶⁺ a diferentes tiempos de residencia (10, 20, 30 y 40 minutos); obteniendo una máxima eficiencia de remoción del 99% al finalizar los 40 minutos; esto ocurrió, debido a que el agua al tener mayor tiempo de contacto con los hidróxidos formados en el reactor, permitió la adsorción del Cr (VI), su desestabilización, la suspensión de partículas, el rompimiento de emulsiones y finalmente la formación de flóculos.

Finalmente, este aporte de la investigación concluye corroborando que la técnica de electrocoagulación es amigable con el medio ambiente.

- i) Pantoja Piarpuzan, Evelyn. Aplicación de la electrocoagulación y floculación sobre el tratamiento del drenaje ácido de minas de carbón. El drenaje ácido de mina es un subproducto de la explotación minera, se caracteriza por tener un pH ácido y contenido de metales pesados. Estos drenajes afectan gravemente los cuerpos de agua receptores, eliminando de estos toda la fauna y flora natural.

Este estudio evaluó el uso combinado de electrocoagulación y floculación como una alternativa para el tratamiento de estos drenajes. Se tomaron en cuenta factores como la carga aplicada, densidad de corriente, pH en la floculación, y cantidad de floculante.

Los resultados se cuantificaron con la medición de parámetros tales como turbiedad, cantidad de sulfatos y pH final. Además, se realizaron mediciones de las cantidades de metales removidos, demanda química de oxígeno, sólidos totales, conductividad y color.

Se obtuvo una remoción de 99% en la turbiedad, 36% de sulfatos, 99% de hierro, 96% manganeso y 94% zinc.

Esta investigación aportó a decidirnos por utilizar electrodos de hierro, dado que los hidróxidos de hierro formados durante el proceso de electrocoagulación actúan como adsorbentes y atrapan los iones disueltos.

- j) Oña Pazmiño, Byron y Falconi Cedillo, David. Tratamiento avanzado de aguas residuales del proceso de lavado y tinturado de jeans en la empresa “mundocolor” mediante electrocoagulación. El objetivo de esta investigación fue tratar las aguas residuales mediante la construcción de un prototipo de celda, un tanque equalizador y un sedimentador, comparando los parámetros químicos del agua residual con el agua tratada, para ello se experimentó con diferentes métodos

teniendo como exitoso el de la electrocoagulación, se obtuvo una mayor eficiencia en la remoción del color en un 96%

Se tomó como base para nuestra investigación considerar el tiempo de tratamiento, dado que si es mínimo el tiempo no formará la aglomeración de los flocs y si el tiempo de tratamiento es demasiado afectaría con un alto consumo de energía e incremento del pH

2.2 Bases teóricas científicas

2.2.1 Aguas residuales

Las aguas residuales provienen de su utilización en las diversas actividades domésticas e industriales del ser humano. Si son de origen doméstico presentan características diferenciadas con las aguas residuales provenientes de la actividad industrial, aunque en algunas ocasiones puntuales pueden ser semejantes. Esto ocasiona un problema ambiental, por lo cual es necesario tratarlas con diversos procesos para evitar la contaminación de los cuerpos de agua (Aguilar Ascon, 2015: 12)

Así, de acuerdo con su origen, las aguas residuales pueden ser clasificadas como :

- a) Aguas residuales domésticas.-** Las aguas residuales domésticas provienen de áreas residenciales y de actividades de tipo doméstico, de establecimientos comerciales y de instituciones tales como hospitales, escuelas, universidades, edificios, etc. Estas se originan básicamente en la cocina, baños y la lavandería, independientemente hay actividades en estos establecimientos e instituciones que generan aguas residuales catalogables como industriales y hasta tóxicos (Aguilar Ascon, 2015: 15)
- b) Aguas residuales industriales.-** Las aguas residuales industriales las constituyen los desechos líquidos provenientes de una fábrica o empresa que produce cualquier clase de material o artículo sometido a oferta y demanda en el mercado y son diferentes de las aguas de suministros utilizadas por el establecimiento en sus procesos de

producción. Aquí pueden incluirse algunas corrientes generadas en el comercio y los hospitales o similares (Aguilar Ascon, 2015:16)

- c) Aguas residuales municipales.-** Comprende numerosos tipos de desechos líquidos, desde las aguas de drenaje doméstico y de servicios, hasta los subproductos industriales y las aguas pluviales colectadas en la red municipal (Gomez Apac, 2014:6)

2.2.2 Sistema de tratamiento de aguas residuales

- a) Nivel de tratamiento primario o físico.-** El tratamiento primario contempla el uso de operaciones físicas tales como la sedimentación y el desbaste que permiten la eliminación de los sólidos sedimentables y flotantes presentes en el agua residual (Bogado Rivas, 2008:3)

Su propósito principal es remover aquellos contaminantes que flotarán o sedimentarán. Este tratamiento permitirá la remoción del tratamiento primario permite quitar entre el 60% a 70% de los sólidos suspendidos totales, (Olivos Lara, 2010:2) material inmisible (aceite, espuma). Los contaminantes solubles no son removidos.

En la **Figura N° 2.1** se observa un decantador utilizado en el tratamiento primario.



Figura N° 1 – *Decantador primario*
Olivos 2010: 5

b) Nivel de tratamiento secundario o biológico.- El objetivo de este tratamiento es remover la demanda biológica de oxígeno soluble que escapa a un tratamiento primario, además de remover cantidades adicionales de sólidos sedimentables y materia orgánica disuelta. Este tratamiento está diseñado para acelerar estos procesos naturales de modo que la descomposición de los contaminantes orgánicos degradables puede ser alcanzada en periodos cortos de tiempo. Este tratamiento no remueve cantidades significantes de nitrógeno, fósforo o metales pesados y no remueve completamente las bacterias patogénicas y los virus (Alarcon Rondon, 2017:25)

Estos tipos de métodos de tratamiento de aguas residuales pueden dividirse generalmente en procesos anaeróbicos y procesos aeróbicos.

1) Tratamiento aeróbico de aguas residuales.- Consiste básicamente en los procesos de fangos activados, lagunas aireadas, digestión aerobia, filtro percolador, filtros de desbaste, etc. Los demás sistemas aerobios existentes son variantes, combinaciones o mejoras secundarias de estos procesos básicos (Nodal Becerra, 2001:54)

- **Fangos activados.-** Consiste en una suspensión de microorganismos, vivos y muertos, activados por oxígeno y capaces de estabilizar la materia orgánica presente en el agua residual. Mediante el proceso de lodos activados el residuo orgánico se introduce en un reactor, donde se mantiene un cultivo bacteriano aerobio en suspensión. El contenido del reactor se conoce con el nombre de licor mezclado. En el reactor, el cultivo bacteriano lleva a cabo la conversión en concordancia general con la estequiometría de las ecuaciones de "oxidación y síntesis" y "respiración endógena" (Nodal Becerra, 2001:55)

- **Laguna aireada.**- Las lagunas aireadas, se desarrollaron a partir de lagunas de estabilización facultativas, en las que se instalaron aireadores de superficie para eliminar los olores que se producían al estar sometidos a sobrecargas orgánicas (Nodal Becerra, 2001:54)
- **Filtro percolador.**- El concepto de filtro percolador se originó del uso de filtros de contacto, que eran estanques impermeables rellenos con piedra machacada. El filtro percolador moderno consiste en un lecho formado por un medio filtrante. El medio filtrante suele estar formado por piedras o diferentes materiales plásticos de relleno, la profundidad del lecho varía en cada diseño (Nodal Becerra, 2001:55)
- **Digestión aerobia.**- Es un método alternativo de tratar fangos orgánicos producidos en el curso de las diversas operaciones de tratamiento. Los digestores aerobios se pueden emplear para el tratamiento de fangos activados o filtros percoladores, los factores a tener en cuenta en el análisis de los digestores aerobios incluyen el tiempo de detención hidráulica, los criterios de carga, las necesidades de oxígeno, las necesidades energéticas para el mezclado, las condiciones ambientales, y el funcionamiento y explotación del proceso (Nodal Becerra, 2001:56)

2) Tratamiento anaeróbico de aguas residuales.- Anaeróbico puede referir a digestión anaeróbica, la simplificación de la materia orgánica por bacterias, sin oxígeno. El proceso anaeróbico es un resultado de la falta de oxígeno en el medio de vivencia de algún tipo de bacteria o microorganismo viviente (Giménez Garcia, 2014:88)

La digestión anaerobia se cuenta entre métodos utilizados para el tratamiento de las aguas residuales. Actualmente, es una de las

tecnologías más empleadas para la estabilización de los fangos activados producidos en estaciones de tratamiento de aguas residuales urbanas (Giménez García, 2014:88)

- c) Nivel de tratamiento terciario (avanzado o químico).**- La necesidad de implementar un tratamiento terciario depende de la disposición final que se pretenda dar a las aguas residuales tratadas. Usualmente, la finalidad del tratamiento de nivel terciario es evitar que la descarga del agua residual, tratada previamente, ocasione la eutrofización o crecimiento generalizado de algas en cuerpos receptores de agua de baja circulación, porque ello desencadena el consumo de oxígeno disuelto con los consecuentes impactos sobre la vida acuática. Los sistemas terciarios frecuentemente implican elevados costos de inversión (Jiménez Cisneros, 2002:3)

Estos tratamientos son básicamente : coagulación – floculación, filtración por membranas, ozonificación, etc.

- 1) Coagulación.**- Permite incrementar la tendencia de las partículas de agregarse unas a otras para formar partículas mayores y así precipitar más rápido. Los coagulantes son agentes que ayudan a la precipitación. Muchas partículas como los coloides son sustancias tan pequeñas que no sedimentarán en un tiempo razonable y además no pueden ser eliminados por filtración (Tejeros Suarez, 2007:7)
- 2) Floculación.**- Es el proceso por el cual las partículas desestabilizadas y los pequeños sólidos en suspensión son capturados por el hidróxido metálico, formando un flóculo, para facilitar su remoción del agua por medio de los procesos de sedimentación y de filtración (Kawamura, 1996a) (Tejeros Suarez, 2007:7)
- 3) Filtración por membrana.**- La filtración por membrana es un proceso singular muy efectivo para eliminar materiales orgánicos

solubles en agua, lo mismo que contaminantes microbiológicos (Jacobs, 1997:13)

2.2.3 Electrocoagulación

La electrocoagulación permite la reducción de partículas contaminantes dentro de la celda y mediante la inducción de corriente eléctrica a través de electrodos de aluminio o de hierro, encargados de aportar los iones desestabilizadores los cuales forman especies coagulantes e hidróxidos metálicos insitu, durante el proceso desestabilizan las suspensiones y emulsiones provocando su floculación; de igual manera ocurre una disolución anódica donde se liberan elementos que pueden reaccionar con algunos contaminantes en solución precipitándolos. En los electrodos se generan micro-burbujas de hidrógeno y oxígeno que chocan y se adhieren a los flóculos arrastrándolos a la superficie del líquido donde se forma una espuma que puede ser removida mecánicamente. También, las burbujas formadas dentro del reactor ayudan a que el aceite y las grasas floten. La alta carga de cationes generados desestabiliza las partículas coloidales, por la formación de complejos polihidróxidos polivalentes. Estos complejos tienen altas propiedades de adsorción, forman agregados con las partículas contaminantes, de ahí la razón por la cual está siendo utilizada esta técnica, pero dadas estas características también hay que analizar las condiciones de pH, tipo y concentración de contaminante, estabilidad del flóculo para optimizar la remoción de sustancias contaminantes presentes en la solución (Garcés, Restrepo, y Arango, 2006:9)

La electrocoagulación es utilizada en la remoción de contaminantes de muy diversas aguas residuales, tales como las de la industria de galvanoplastia, electro – plateado metálico, fábricas de envasados, industria del papel (desperdicios de molinos de papel), peleterías, molinos de acero, efluentes con contenido de cromo, plomo o mercurio y efluentes con contenido de aceites como los generados por talleres de maquinaria,

refinerías, talleres de reparación de autos, transporte, almacenamiento y distribución de aceites, efluentes de la industria alimentaria, lavanderías e industria textil, y finalmente ha sido utilizada en la remoción de los contaminantes de las aguas para consumo humano y residuales domésticas (García Morales, 2014:24)

a) Mecanismos del proceso de electrocoagulación.- La electrocoagulación está en relación de la estequiometría con la cantidad de electricidad puesta en el sistema (Garcés, Restrepo Arango, 2006:10) La cantidad de metal disuelto o depositado depende de la cantidad de electricidad que pasa a través de la solución electrolítica. Una simple relación entre la intensidad de corriente y la cantidad de sustancia disuelta puede deducirse de la ley de Faraday.

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

Dónde :

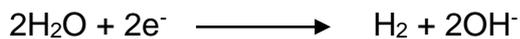
- W** : Es la cantidad de material depositado (g)
- I** : Es la intensidad de corriente (A)
- t** : Es el tiempo de reacción (s)
- M** : Masa molar del material del electrodo (g/mol – g)
- N** : Es el número de electrones en la reacción de oxidación/reducción
- F** : Es la constante de Faraday (96500C mol⁻¹).

b) Reacciones en el proceso de electrocoagulación.- La electrólisis del agua produce oxígeno e hidrógeno de la siguiente forma :

En el ánodo :



En el cátodo :



Al añadir sales en la disolución, aumentan la conducción de electricidad, ya que genera la liberación de oxígeno e hidrógeno, esta liberación provoca las siguientes consecuencias :

- 1) Formación de una nata en la superficie, fácilmente extraíble por medios mecánicos, debido al arrastre de coloides desestabilizados a la superficie (Angulo Bedoya, 2008:33)
- 2) Se produce una agitación espontánea de los gases liberados y por lo tanto un aumento en la eficiencia de la desestabilización lo que evita el uso de agitación mecánica (Angulo Bedoya, 2008:34)

Los materiales comúnmente más utilizados son electrodos de hierro y aluminio (Arango Ruiz, 2005:9)

En la **Figura Nº 2 (Ver pág. Nº 30)** se observa el mecanismo de reacción de oxidación y reducción, tanto en el ánodo como en el cátodo respectivamente.

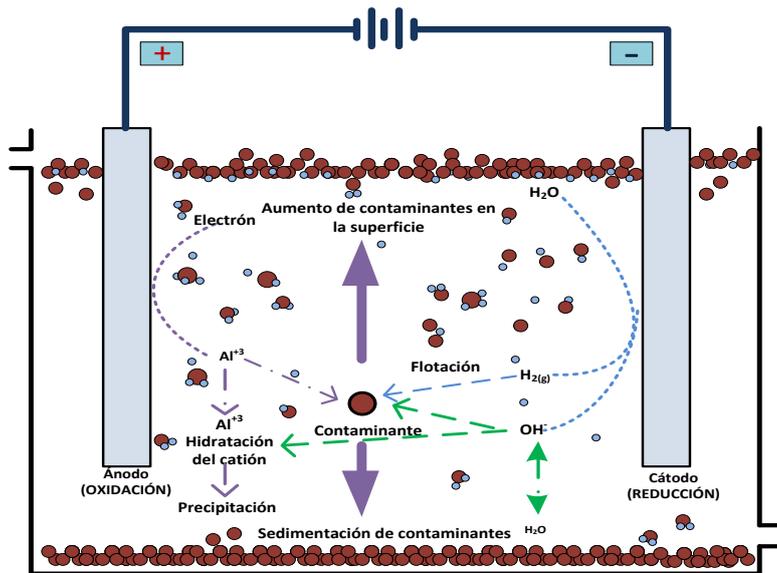
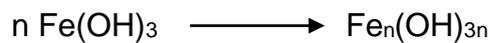
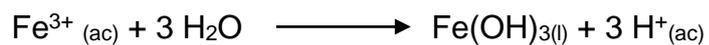


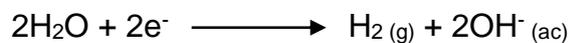
Figura N° 2 – Esquema de una celda de electrocoagulación
Aguilar 2015:20

Cuando el hierro en el ánodo se observa las siguientes reacciones:

En el ánodo :



En el cátodo :



2.2.4 Factores que afectan al proceso de electrocoagulación

Existen varios factores que tienen mayor incidencia en el proceso de electrocoagulación, a continuación, se detallan :

a) Efecto del pH.- Generalmente se encontró que la eficiencia con electrodos de aluminio, es buena en condiciones ácidas o alcalinas, así como en condiciones de pH neutro. Durante el proceso el pH de las aguas residuales ácidas aumenta siendo esto debido a la generación del hidrógeno liberado por el cátodo, mientras que en aguas residuales con pH alcalino pueden disminuir.

b) Efectos de la intensidad de corriente.- La intensidad de corriente es el flujo de carga eléctrica por unidad de tiempo que recorre un material (C/s) Se demostró experimentalmente que el aumento del potencial eléctrico en la celda electrolítica permite una mayor velocidad de solubilización electrolítica del ánodo de aluminio, el cual favorece la transferencia de carga entre electrodos, permitiendo así un aumento sostenido del flujo de corriente circulante en la celda. La liberación de H₂ proveniente de la electrólisis del agua, permite mantener al cátodo sin deposición de materia orgánica, manteniendo limpio el electrodo debido al burbujeo de gas en torno a éste. Dicho fenómeno afecta directamente la intensidad de corriente en la celda, ya que se evita la resistencia eléctrica por fenómenos de deposición (Hani, 2009:3)

Diferentes trabajos reportan el efecto de la intensidad de la corriente en la remoción de color DQO, entre otras variables. Todos coinciden en que la corriente incrementa de forma significativa la cantidad de contaminante separado. Esto corresponde mediante la ley de Faraday, la cual describe la relación entre la cantidad de corriente y la cantidad de iones aportados a la disolución, aumentando la cantidad de aluminio disuelto, lo que permite una coagulación más rápida y eficaz (Ojeda, Hing y Gonzales, 2012:9)

c) Efecto del tiempo de reacción.- El tiempo de reacción representa una gran influencia en la cantidad de sólidos obtenidos (Prieto, Callejas, Reyes y Marmolejo, 2012:72) debido a que promueve la formación en un mayor tiempo de reacción.

2.2.5 Condiciones óptimas

Consiste en localizar la condición óptima de operación que exige una serie de experimentos numéricos bien planteados, conocidos como investigación directa. Con el fin de encontrar las condiciones óptimas de operación (tiempo de reacción, intensidad de corriente y pH) que disminuyan la demanda química de oxígeno (DQO).

2.2.6 Características físicas de las aguas residuales domésticas

- a) Temperatura.-** La temperatura de las aguas residuales es generalmente mayor que la de las aguas no contaminadas, debido a la energía liberada en las reacciones bioquímicas, que se presentan en la degradación de la materia orgánica. A medida que la temperatura aumenta también aumenta la velocidad de reacción y la conductividad, sin embargo, esto conlleva a una disminución de la energía de consumo y a la posible deposición de los flocs en la superficie del electrodo (Angulo y Betancourt, 2008:48)
- b) Olor.-** El olor es debido a los gases producidos en la descomposición de la materia orgánica, sobre todo, a la presencia de ácido sulfhídrico y otras sustancias volátiles (Canales y Sevilla, 2016:20)
- c) Sólidos totales.-** Los sólidos totales presentes en el agua residual se clasifican según su tamaño o presentación en sólidos suspendidos y sólidos filtrables. Los sólidos suspendidos son las partículas flotantes, como trozos de vegetales, animales, basuras, etc., mientras que los sólidos filtrables son partículas con un diámetro aproximado que oscila entre 10^{-3} y 1 micra. En la **Figura N° 3 (Ver pág. N° 33)** se puede

observar los tamaños aproximados de las partículas y su distribución (CANALES y SEVILLA, 2016:20)

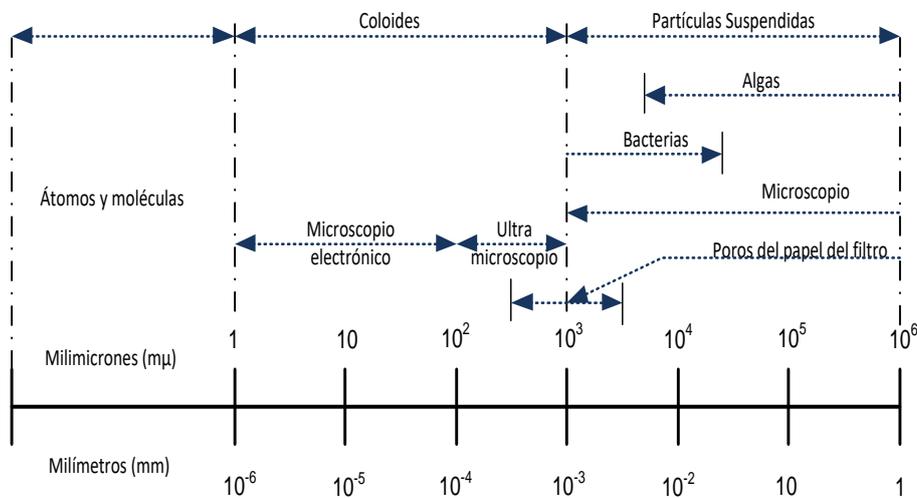


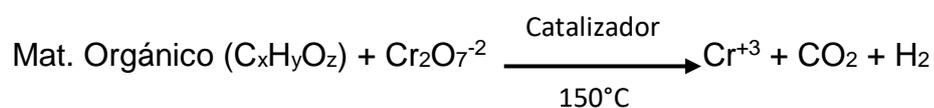
Figura N° 3 – *Tamaños aproximados de las partículas*
Arango 2005:5

- d) Aceites y grasas.-** El contenido de aceites y grasas en los residuos domésticos, en algunos residuos industriales y en los lodos se debe considerar para su manipulación y tratamiento hasta la disposición final. Durante el ataque biológico subsiguiente que ocurre en las unidades de tratamiento secundario, los agentes emulsificantes usualmente se destruyen y las partículas finamente divididas de grasas y aceite se unen libremente en partículas más grandes que se separan del agua (Barba, 2002:31)
- e) Conductividad.-** Al determinar la conductividad se evalúa la capacidad del agua para conducir la corriente eléctrica, es una medida indirecta la cantidad de iones en solución (fundamentalmente cloruro, nitrato, sulfato, fosfato, sodio, magnesio y calcio) Descargas de aguas residuales suelen aumentar la conductividad debido al aumento de la concentración de Cl^- , NO_3^- y SO_4^{2-} , u otros iones. La unidad básica para medir la conductividad es el siemens por centímetro. El agua

destilada tiene una conductividad en el rango de 0,5 a 3 μ Siemens/cm (un μ S es la millonésima parte de un Siemens). Algunos efluentes industriales pueden llegar a tener más de 10,000 μ S/cm. Cada cuerpo de agua tiene un rango relativamente constante de conductividad, que una vez conocido, puede ser utilizado como línea de base para comparaciones con otras determinaciones puntuales, cambios significativos pueden ser indicadores de contaminación (Goyenola, 2007:1)

2.2.7 Características químicas de las aguas residuales domésticas

- a) **DBO.-** La demanda bioquímica de oxígeno expresa el grado de contaminación de un agua residual por materia orgánica degradable por oxidación biológica (Fernandez y Dolores, 2014:120)
- b) **DQO.-** La demanda química de oxígeno (DQO) es la cantidad de oxígeno consumido por las materias existentes en el agua, que son oxidables en condiciones operatorias definidas. La medida corresponde a una estimación de las materias oxidables presentes en el agua, sea su origen orgánico o inorgánico (Fernandez y Dolores, 2014:119)



- c) **pH.-** El intervalo de concentración idóneo para la existencia de la mayoría de la vida biológica es muy estrecho y crítico. El agua residual con una concentración adversa de ion hidrogeno es difícil de tratar por medios biológicos. Por lo general, el pH óptimo para el crecimiento de los organismos se encuentra 6,5 y 7,5 (Canales y Sevilla, 2016:23)

2.2.8 Características microbiológicas de las aguas residuales domésticas

El desarrollo y tipo de bacterias están relacionados directamente con la naturaleza de la materia orgánica. Estas bacterias pueden ser perjudiciales, útiles o inofensivas al hombre. Las aguas residuales contienen bacterias coliformes que son utilizados como indicadores de contaminación fecal. Aproximadamente entre 10^{11} y 10^{10} bacterias coli son evacuadas en las aguas residuales diariamente por una persona (Vargas, 1996:2)

2.2.9 Diseño y construcción de una celda electroquímica

Existen diferentes tipos de reactores, sean tipo batch o continuos, la selección de ellos depende de la cantidad de volumen del agua a tratar, esta investigación se centra en el reactor batch por su bajo costo y fácil manipulación.

- a) Material de los electrodos.-** La elección del material de electrodo depende del tipo de agua residual a tratar pues muchas veces puede ser desfavorable si no se usa el material adecuado, por ejemplo, los electrodos de aluminio son más eficientes para eliminación de agua oleosa.
- b) Tipo de conexión eléctrica.-** Para aumentar la eficiencia de la electrocoagulación se insertan mayor cantidad de números de placas (siempre y cuando el espacio entre ellas sea el adecuado), para ello se usan celdas con conexiones del siguiente tipo :
 - 1) Conexión monopolar en paralelo.-** Los ánodos y cátodos están conectados en paralelo en la **Figura 4 (Ver pág. Nº 36)**, allí la corriente es dividida entre todos los electrodos en relación a la resistencia de las celdas individuales. Por lo tanto, se requiere una menor diferencia de potencial comparándola con las conexiones en serie (Aguilar 2015:27)

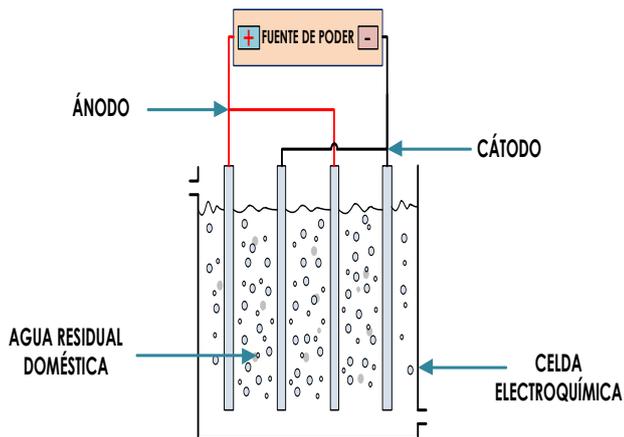


Figura N° 4 – *Conexión monopolar en paralelo*
Aguilar 2015:27

2) Conexión monopolar en serie.- Cada par de electrodos de sacrificio están internamente conectados entre sí (**Ver Figura N° 5**), debido a que el voltaje de la celda se suma, se requiere una mayor diferencia de potencial para la corriente dada (AGUILAR 2015: 27).

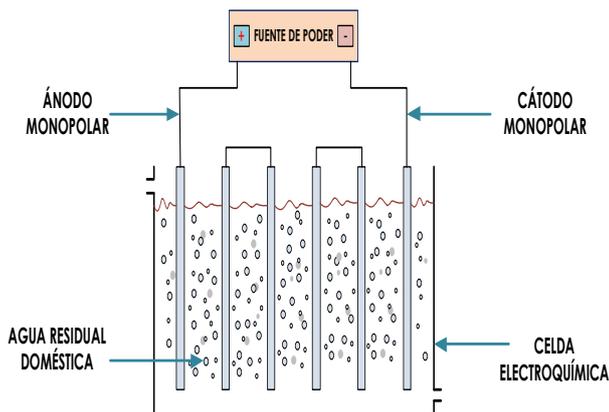


Figura N° 5 – *Conexión monopolar en serie*
Aguilar 2015:27

3) Conexión bipolar en serie.- Allí no hay conexión eléctrica entre los electrodos internos, solo los electrodos externos están conectados a la fuente de potencia. Los electrodos externos son monopolares y los internos son bipolares (Aguilar 2015:28) El montaje de este tipo de

conexión es simple y tiene un menor costo de mantenimiento durante el tiempo de operación (**Ver figura 6**)

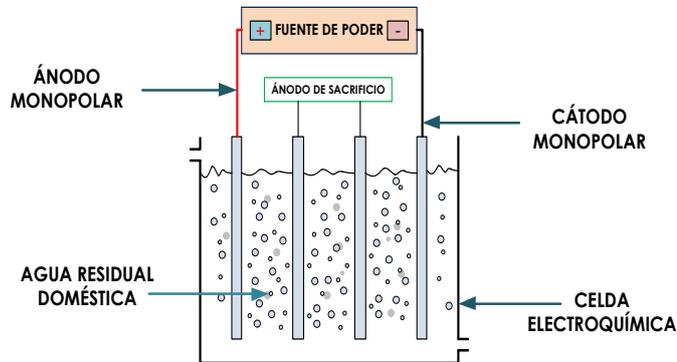


Figura N° 6 – *Conexión bipolar en serie*
Aguilar 2015:28

c) Distancia entre electrodos.- La distancia entre electrodos debe ser la mínima posible para reducir la caída de resistencia y pérdida de energía. Si bien la distancia es mínima, esta no debe de presentar atascamientos por deposición de lodos sobre la superficie de electrodos impidiendo la circulación del medio acuoso y la generación de turbulencias que favorecen la coagulación.

2.3 Definiciones de términos claves

- a) Oxidación.-** La oxidación es una reacción química donde un elemento cede electrones, y por lo tanto aumenta su estado de oxidación.
- b) Reducción.-** Es el proceso electroquímico por el cual un átomo o un ion gana electrones. Implica la disminución de su estado de oxidación.
- c) Polarización.-** Reducción de la fuerza electromotriz de un elemento voltaico como consecuencia de las alteraciones que su propio funcionamiento provoca en el electrodo y electrolito.

d) **Hidrólisis.**- Reacción química entre una molécula de agua y otra molécula, en la cual la molécula de agua se divide y sus átomos pasan a formar parte de otra especie química.

III. VARIABLES E HIPÓTESIS

3.1 Variables de la investigación

La presente investigación tiene variables del tipo cualitativo y del tipo cuantitativo, donde “X” representa la variable dependiente, “Y” y “Z” representan las variables independientes. Es decir $X = f(Y, Z)$. Para un mejor entendimiento de la relación de las variables de investigación, se elaboró la **Figura N° 7**

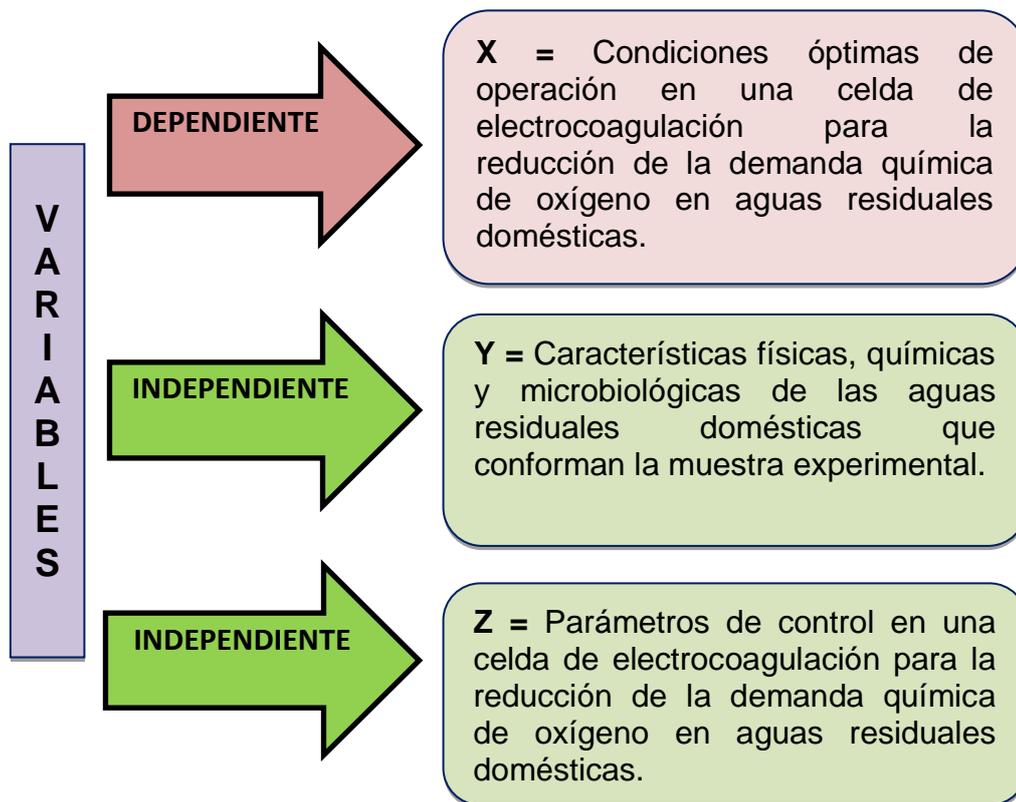


Figura N° 7 – *Relación de las variables de la investigación*
Elaboración propia

3.2 Operacionalización de variables

Se detalla nuestras variables de investigación.

Tabla N° 3.1
Operacionalización de variables

VARIABLES DEPENDIENTE	DIMENSIONES	INDICADORES	MÉTODO
X = Condiciones óptimas de operación en una celda de electrocoagulación para la reducción de la demanda química de oxígeno en aguas residuales domésticas.	<ul style="list-style-type: none"> • Porcentaje de reducción de la demanda química de oxígeno. 	<ul style="list-style-type: none"> • % de reducción de la demanda química de oxígeno 	<ul style="list-style-type: none"> • Ensayos de laboratorio.
VARIABLES INDEPENDIENTE	DIMENSIONES	INDICADORES	MÉTODO
Y = Características físicas, químicas y microbiológicas de las aguas residuales domésticas que conforman la muestra experimental.	<ul style="list-style-type: none"> • DQO • DBO • Potencial de hidrógeno • Sólidos totales en suspensión • Temperatura • Aceites y grasas • Conductividad eléctrica • Coliformes termotolerantes 	<ul style="list-style-type: none"> • mg/L • mg/L • pH • mg/L • °C • mg/L • μS/cm • NMP/100 mL 	<ul style="list-style-type: none"> • Revisión de publicaciones • Análisis en el laboratorio.
Z = Parámetros de control en una celda de electrocoagulación para la reducción de la demanda química de oxígeno en aguas residuales domésticas.	<ul style="list-style-type: none"> • Potencial de hidrógeno • Intensidad de corriente • Tiempo de reacción 	<ul style="list-style-type: none"> • pH • Amperios • Minutos 	<ul style="list-style-type: none"> • Revisión de publicaciones. • Pruebas de ensayo.

3.3 Hipótesis general e hipótesis específicas

3.3.1. Hipótesis general

Las condiciones óptimas para la reducción de la demanda química de oxígeno en el agua residual doméstica dependerá del control de la DQO mediante las variaciones de la intensidad de corriente y del potencial de hidrogeno en referencia al tiempo de reacción.

3.3.2. Hipótesis específicas

Las características físicas, químicas y microbiológicas más relevantes que conforman la muestra experimental son : DQO, DBO, pH, sólidos totales en suspensión, temperatura, aceites y grasas, coliformes termotolerantes y conductividad eléctrica.

Los parámetros de control: potencial de hidrógeno, intensidad de corriente y tiempo de reacción; nos permitirán encontrar la condición óptima para la reducción de la demanda química de oxígeno en el agua residual doméstica.

IV. METODOLOGÍA

4.1 Tipo de investigación

Los tipos de investigación que se realizarán en el presente trabajo de tesis son :

- a) Por su finalidad.-** Es del tipo aplicada, porque sus resultados sirven para aportar en la práctica a futuras investigaciones de tratamientos de aguas residuales.
- b) Por su diseño interpretativo.-** Es del tipo experimental, porque el estudio se realiza mediante la observación, registro y análisis de las variables intervinientes en el proceso de electrocoagulación.
- c) Por el énfasis de la naturaleza de los datos manejados.-** Es del tipo mixto, debido que se presentan datos de carácter cuantitativo y carácter cualitativo.
- d) Por el nivel de estudios.-** Es del tipo aplicada, porque busca establecer propuestas para ejecutarlas en la práctica.

4.2 Diseño de la investigación

El diseño de la presente investigación ha considerado tres momentos, los cuáles se observan en la **Figura N° 8 (Ver pág. N° 43)**

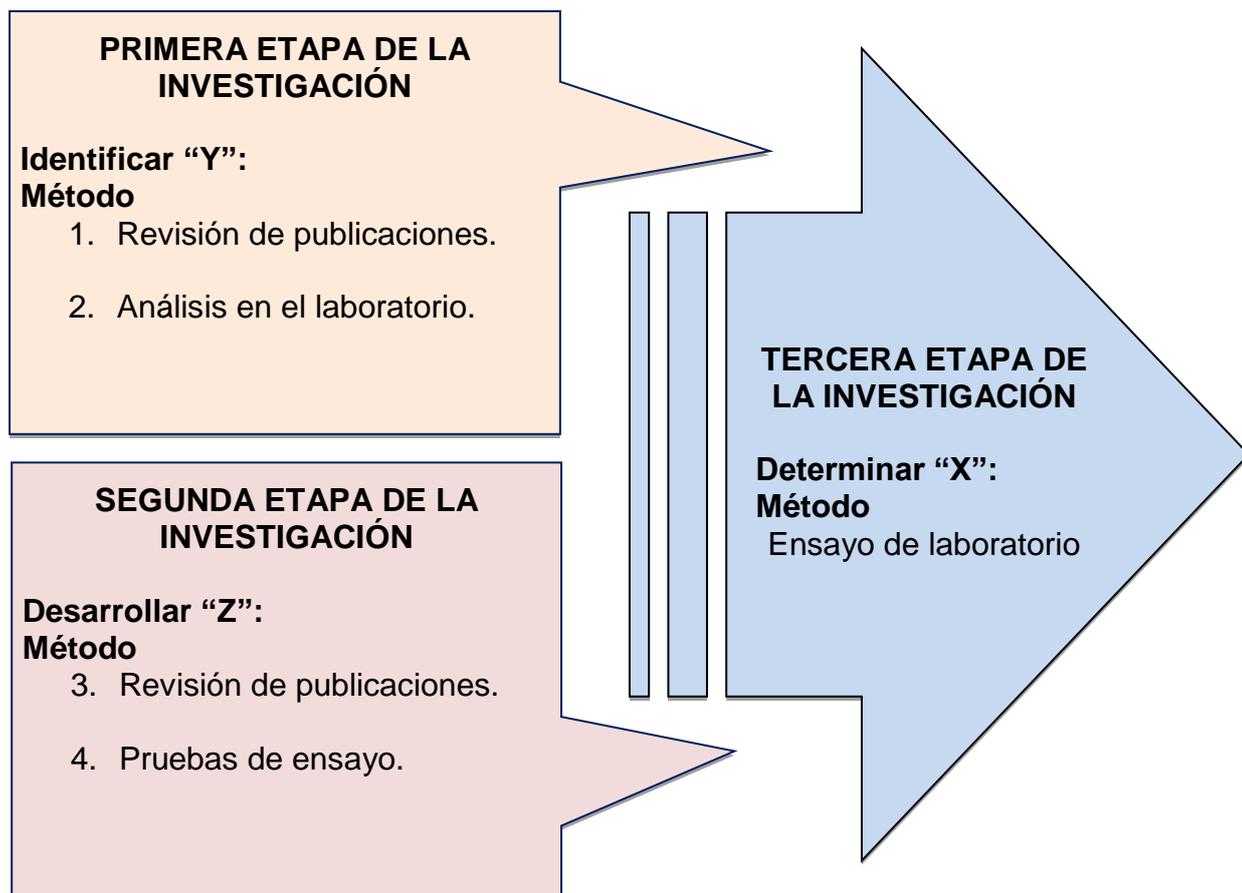


Figura N° 8 – *Diseño de la investigación*
Elaboración propia

4.2.1 Etapas de la Investigación

Se ha considerado que la investigación propuesta tendrá tres etapas.

- a) **Primera etapa de la investigación.**- En la primera etapa de la investigación se recurrirá a la revisión de publicaciones, así como también se harán análisis en el laboratorio de las características físicas y químicas de las aguas residuales domésticas del EBAR N° 085 – Lurín, con el propósito de identificar y verificar que parámetros exceden de la normativa Decreto Supremo N° 003–2010–MINAM, para poder reducirlo mediante el tratamiento por electrocoagulación.

b) Segunda etapa de la investigación.- En la segunda etapa de la investigación se determinará los parámetros de control mediante pruebas de ensayos realizando variaciones en el potencial de hidrogeno, intensidad de corriente y tiempo de reacción, para esto también se recurrirá a la revisión de publicaciones vinculadas al proceso de electrocoagulación. Las pruebas de ensayo se realizarán en el Laboratorio de Operaciones y Procesos Unitarios – UNAC, con el fin de determinar las condiciones óptimas para la reducción de la demanda química de oxígeno.

c) Tercera etapa de la investigación.- En la tercera etapa de la investigación con la teoría y la información lograda tanto en la primera etapa como en la segunda etapa, se realizará ensayos de laboratorio. En esta etapa se determina las condiciones óptimas de operación (potencial de hidrogeno, intensidad de corriente y tiempo de reacción) en una celda de electrocoagulación para el tratamiento de las aguas residuales domésticas del EBAR N° 085 – Lurín, con el propósito de reducir la demanda química de oxígeno.

1) Bases de diseño.- Identificación de las características físico-químicas y microbiológicas del agua residual doméstica del EBAR N°085 (Estación de Bombeo de Agua Residual) – Lurín.

En la **Figura 9 (Ver pág. N° 45)** la toma de muestra del agua residual domestica fue realizada el día 14 de junio del 2018 de la Estación de Bombeo de Agua Residual N° 085 – Lurín, el cual se recolectó aguas residuales domésticas del A.H. Julio C. Tello (Sector I y II)



Figura N° 9 – Ebar085 estación de bombeo de aguas residuales
Elaboración propia

La obtención y caracterización de la muestra de agua residual en la **Figura N° 10 (Ver pág. N° 46)** fue realizada durante las siguientes horas:

Tabla N° 4.1
Horas del muestreo

N° de Muestras	Hora	Volumen (L)
01	06:00	3,00
02	07:00	3,00
03	08:00	3,00
04	09:00	3,00
05	10:00	3,00
06	11:00	3,00
07	12:00	3,00
08	13:00	3,00
09	14:00	3,00
10	15:00	3,00
11	16:00	3,00
12	17:00	3,00
13	18:00	3,00
14	19:00	3,00
Total (Litros)		42,00

Elaboración propia.



Figura N° 10 – Toma de muestra del Ebar N° 085
Elaboración propia

Para la toma y caracterización de la muestra se colectaron a volumen contante de 3 L desde las 06:00 hasta las 19:00 horas, siendo estas las horas adecuadas por las actividades domésticas y las grandes descargas por parte de la población.

En la **Tabla N° 3 (Ver pág. N° 47)** se aprecia las características físico-químicas y microbiológicas del agua residual para la determinación de los parámetros:

Tabla N° 3
Parámetros físicos químicos y microbiológicos

N°	Parámetros	Unidad	Resultados
01	DBO	mg/L	98,7
02	Sólidos Totales Suspendidos	mg/L	90,0
03	Temperatura	°C	19,5
04	Aceites y Grasas	mg/L	9,5
05	Conductividad Eléctrica	µS/cm	776
06	Coliformes Termotolerantes	NMP/100 mL	2,4E+07
07	Potencial de Hidrógeno	pH	6,92
08	DQO	mg/L	394

Elaboración propia

4.2.2 Materiales y equipos

Materiales y equipos utilizados en el laboratorio de Operaciones y procesos Unitarios de la Facultad de ingeniería Química

Para el acondicionamiento del equipo se necesitaron los siguientes materiales :

Tabla N° 4
Materiales y equipos

Ítem	Cantidad	Materiales y/o equipos
01	01	Pipeta, vaso Precipitado y Probeta
02	02	Varillas de vidrio
03	55	Frascos de Plástico de 250 mL
04	02	Frasco vidrio ámbar de 0,1 L
05	02	Frasco de 250 ml esterilizado
06	04	Frasco de plástico de 01 L
07	06	Cocodrilos (Pinzas)
08	01	Cables de electricidad (N° 14)
09	01	Cuba de acrílico
10	06	Placas de Fierro
11	02	Balde con capacidad de 20 Litros
12	01	Multiparámetro Hach
13	01	Termómetro y Cronómetro
14	01	Equipo de fuente de Poder

Elaboración propia

Generalmente el EBAR 085 se ha caracterizado por contener un alto grado de concentración del parámetro de la DQO, con este fin se realiza la investigación de reducir por el método de electrocoagulación.

Para la variación de pH se utilizaron los siguientes reactivos :

Tabla N° 5
Reactivos para modificación del pH

Ítem	Reactivos
01	Ácido clorhídrico al 9,0%
02	Hidróxido de sodio al 50%

Elaboración propia

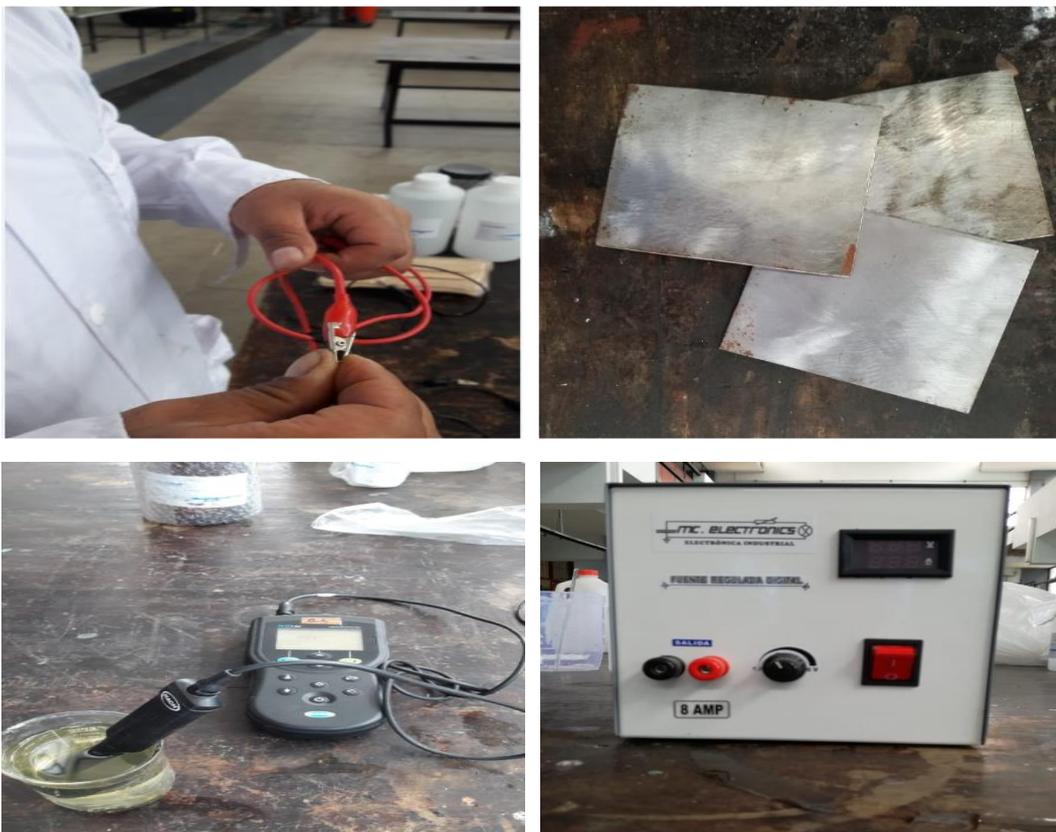


Figura N° 11 – *Materiales y/o equipos*
Elaboración propia

4.2.3. Construcción de la celda de electrocoagulación

El material seleccionado para la celda de electrocoagulación fue acrílico transparente con el fin de poder visualizar los procesos físicos químicos de reacción del medio acuoso, los ánodos y los cátodos.



Figura N° 12 – *Construcción de la celda*
Elaboración propia

La celda de electrocoagulación tiene forma de un paralelepípedo rectangular con las siguientes dimensiones :

Ancho = 14 cm Largo = 15 cm y Altura = 15 cm

Adicionalmente se añadió soportes de acrílico en forma de cerda a la base de la celda para poder mantener verticalmente a los electrodos, teniendo una separación entre ellos de 1 cm. Con el fin de evaluar esta distancia se consideró previamente experimentos a 0,5 cm, 1,0 cm y 1,5 cm obteniendo una mejor reducción a la distancia de 1,0 cm

En la **Figura N° 13 (Ver pág. N° 50)** se observa la instalación de un caño de PVC a la altura de la zona de reacción.



Figura N° 13 – *Instalación del caño de PVC*
Elaboración propia

Se instaló las placas de fierro a distancias de 1,0 cm



Figura N° 14 – *Base soporte para los electrodos*
Elaboración propia

Las pruebas de operación fueron realizadas a una intensidad de corriente, DQO inicial, pH y tiempo de reacción constante.

Tabla N° 6

Pruebas para la determinar la distancia entre electrodos

pH	Intensidad	Tiempo	DQO
6,96	5,0 A	42 minutos	354,4 mg/L

Elaboración propia

Obteniendo los siguientes resultados :

Tabla N° 7

Resultados de DQO a diferente espacio de electrodos

Distancia (cm)	DQO (mg/L)
0,5	214,7
1,0	187,8
1,5	195,2

Elaboración propia

a) Dimensión de los electrodos.- Al interior de la celda de electrocoagulación se colocaron 6 electrodos de hierro de forma rectangular cuyas dimensiones son 10 cm de ancho, 12 cm de largo y con un espesor de 0,1 milímetro.



Figura N° 15 – *Instalación de los electrodos*

Elaboración propia

b) Fuente de poder.- Estos electrodos están conectados a una fuente de poder de marca MC ELECTRONICS (0–8A / 0–32V) la cual suministra una corriente continua para el proceso de electrocoagulación.

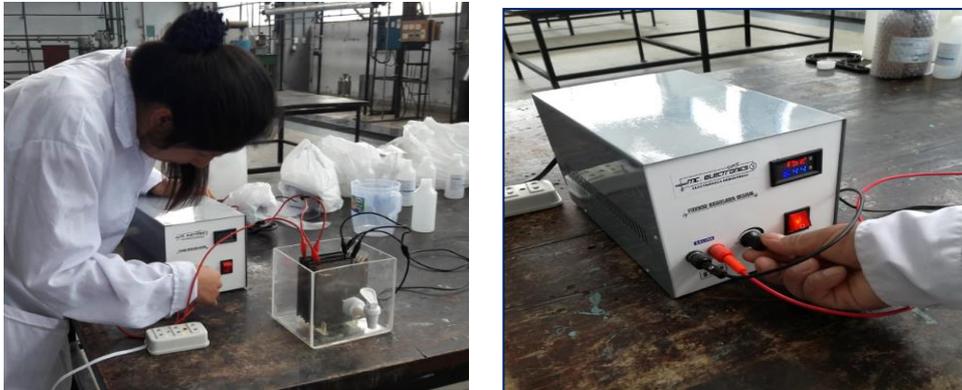


Figura N° 16 – Fuente de poder
Elaboración propia

c) Conexión de los electrodos a los cocodrilos.- Se completó el sistema con la conexión de los cables de medida N° 14 a la fuente de poder y los cocodrilos a los electrodos de Hierro.

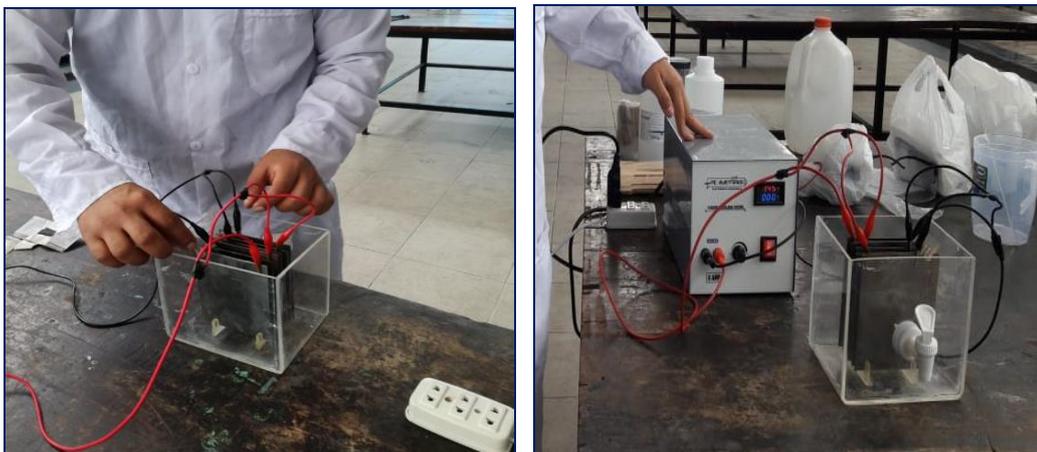


Figura N° 17 – Conexión de los cables a los cocodrilos
Elaboración propia

d) **Sistema completo de la electrocoagulación.-** Se completó satisfactoriamente la instalación de la celda de electrocoagulación para proceder a los ensayos y posteriormente sea analizada en un laboratorio externo.

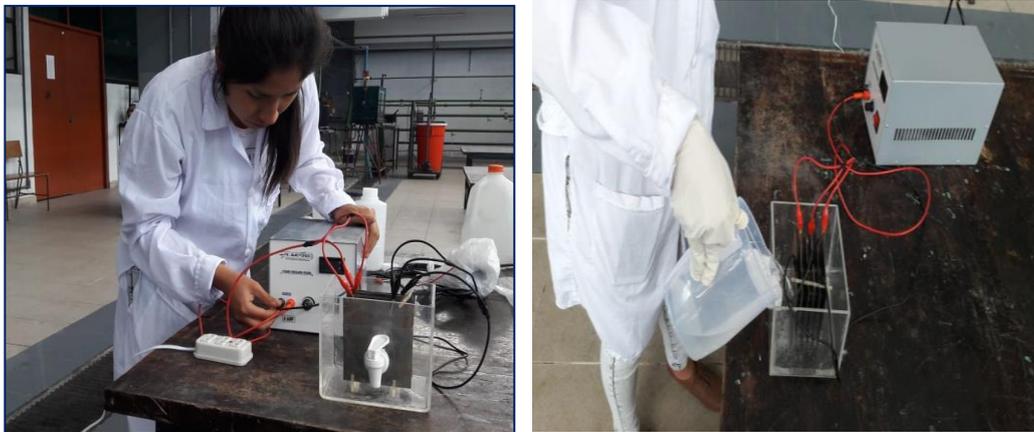


Figura N° 18 – *Celda de electrocoagulación armada*
Elaboración propia

4.2.4 Procedimiento experimental

La celda de electrocoagulación será preparada e instalada de la siguiente manera, con las placas de hierro separadas a una distancia de 1,0 centímetro y conectada a los cocodrilos mediante cables que va directamente a una fuente de poder y se procederá a realizar los siguientes pasos previos detallándose de la siguiente manera:

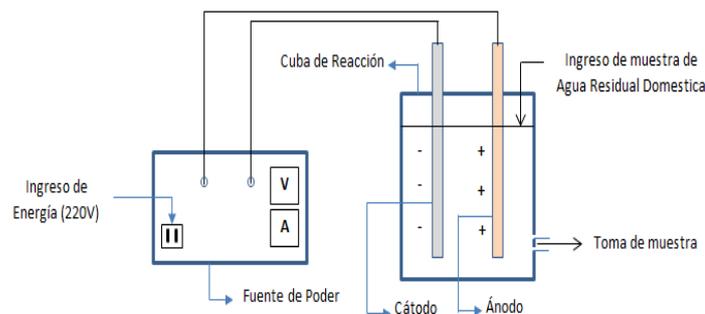


Figura N° 19 – *Diagrama de proceso – Celda de electrocoagulación*
Elaboración Propia

El análisis del porcentaje de remoción de la DQO se realizó en tiempos diferentes siendo el volumen de la cuba constante.

Para esto se dividió el volumen de la muestra de agua residual (42 L) en 3 partes acondicionando cada parte con el pH ácido (9 L) y pH básico (9 L), dado que la muestra original fue de un pH neutro (9 L), el resto de agua se utilizó para el análisis inicial.



Figura N° 20 – Acondicionamiento de la muestra residual
Elaboración propia

La variación del pH neutro a ácido se llevó a cabo con la adición del ácido clorhídrico al 9,0%, usando 1,4 mL por cada 3 L de muestra, es decir para los 9 L se utilizó 4,2 mL

La variación del pH neutro a básico se llevó a cabo con la adición de soda caustica al 50%, usando 0,02 mL por cada 3 L de muestra, es decir para los 9 L se utilizó 0,06 mL

Luego de la adición de los reactivos mencionados, se obtuvo los siguientes pH :

Tabla N° 8
pH Considerados para el inicio de los procesos

pH ácido	pH neutro	pH básico
5,60	6,92	8,04

Elaboración propia

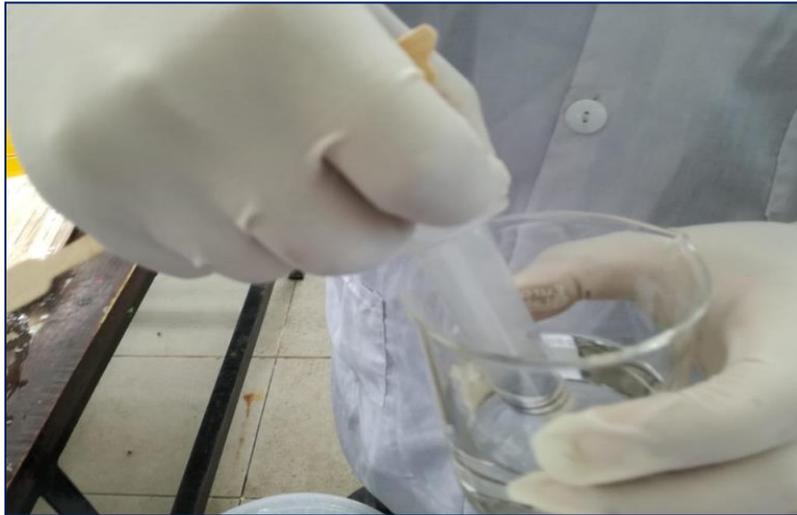


Figura N° 21 – *Acondicionamiento mediante soda cáustica*
Elaboración propia

Para averiguar la eficiencia se realizó el cálculo del porcentaje reducción de la DQO, utilizando la siguiente ecuación :

Tabla N° 9

Fórmula de cálculo del porcentaje de reducción de la DQO

$$\% \text{ Reducción} = \left(\frac{DQO_i - DQO_f}{DQO_i} \right) * 100$$

Elaboración propia

Donde :

DQO_i : Concentración inicial de la DQO (mg/L)

DQO_f : Concentración final de la DQO (mg/L)

a) Ensayos de la muestra con pH = 5,6.- La muestra de agua residual se acondicionó utilizando ácido clorhídrico al 9% para reducir el pH a 5,6.

Las muestras fueron tomadas en intervalos de 7 minutos durante un tiempo total de 42 minutos, estas fueron preservadas, refrigeradas y almacenadas dentro de un cooler limpio y esterilizado para que posteriormente sea trasladado al laboratorio acreditado Envirotest S.A.C. y sea analizada la DQO.

Envirotest se encuentra ubicado en la Calle B Mz C Lt 40, San Martín de Porres–Lima



Figura N° 22 – Envases proporcionados por el laboratorio
Elaboración propia

Tabla N° 10
Intensidad de corriente 3,5 A

Condiciones iniciales de la muestra			
pH = 5,60	I = 3,50 A	DQO (Inicial) = 394 mg/L	
N° de Muestra	Código interno	Tiempo de reacción	DQO (mg/L)
01	A01 – 00	0 min	394,0
02	A01 – 01	7 min	251,4
03	A01 – 02	14 min	215,1
04	A01 – 03	21 min	197,8
05	A01 – 04	28 min	187,9
06	A01 – 05	35 min	184,0
07	A01 – 06	42 min	181,2

Elaboración propia

Tabla N° 11
Intensidad de corriente 5,0 A

Condiciones iniciales de la muestra			
pH = 5,60	I = 5,0 A	DQO (Inicial) = 394 mg/L	
N° de Muestra	Código interno	Tiempo de reacción	DQO (mg/L)
01	A02 – 00	0 min	394,0
02	A02 – 01	7 min	238,8
03	A02 – 02	14 min	195,4
04	A02 – 03	21 min	171,8
05	A02 – 04	28 min	159,2
06	A02 – 05	35 min	148,9
07	A02 – 06	42 min	144,6

Elaboración propia

Tabla N° 12
Intensidad de corriente 6,5 A

Condiciones iniciales de la muestra			
pH = 5,60	I = 6,50 A	DQO (Inicial) = 394 mg/L	
N° de Muestra	Código interno	Tiempo de reacción	DQO (mg/L)
01	A03 – 00	0 min	394,0
02	A03 – 01	7 min	243,1
03	A03 – 02	14 min	188,7
04	A03 – 03	21 min	166,7
05	A03 – 04	28 min	156,4
06	A03 – 05	35 min	148,5
07	A03 – 06	42 min	138,7

Elaboración propia

b) Ensayos de la muestra con pH = 6,92.- El pH de 6,92 es el inicial de la muestra por ende no fue acondicionado por ningún reactivo.

Las muestras fueron tomadas en intervalos de 7 minutos durante un tiempo total de 42 minutos, estas fueron preservadas, refrigeradas y almacenadas dentro de un cooler limpio y esterilizado para que posteriormente sea trasladado al laboratorio acreditado Envirotest S.A.C. y sea analizada la DQO

Tabla N° 13
Intensidad de corriente 3,5 A

Condiciones iniciales de la muestra			
pH = 6,92	I = 3,50 A	DQO (Inicial) = 394 mg/L	
N° de Muestra	Código interno	Tiempo de reacción	DQO (mg/L)
01	N01 – 00	0 min	394,0
02	N01 – 01	7 min	283,7
03	N01 – 02	14 min	258,5
04	N01 – 03	21 min	234,4
05	N01 – 04	28 min	221,4
06	N01 – 05	35 min	208,8
07	N01 – 06	42 min	202,5

Elaboración propia

Tabla N° 14
Intensidad de corriente 5,0 A

Condiciones iniciales de la muestra			
pH = 6,92	I = 5,0 A	DQO (Inicial) = 394 mg/L	

N° de Muestra	Código interno	Tiempo de reacción	DQO (mg/L)
01	N02 – 00	0 min	394.0
02	N02 – 01	7 min	267.1
03	N02 – 02	14 min	243.5
04	N02 – 03	21 min	224.6
05	N02 – 04	28 min	206.9
06	N02 – 05	35 min	192.7
07	N02 – 06	42 min	184.4

Elaboración propia

Tabla N° 15
Intensidad de corriente 6,5 A

Condiciones iniciales de la muestra			
pH = 6,92	I = 6,50 A	DQO (Inicial) = 394 mg/L	

N° de muestra	Código interno	Tiempo de reacción	DQO (mg/L)
01	N03 – 00	0 min	394,0
02	N03 – 01	7 min	262,4
03	N03 – 02	14 min	238,4
04	N03 – 03	21 min	215,1
05	N03 – 04	28 min	198,6
06	N03 – 05	35 min	188,7
07	N03 – 06	42 min	177,3

Elaboración propia

c) Ensayos de la muestra con pH = 8,04.- Se acondicionó la muestra residual utilizando soda caustica al 50% para aumentarlo a pH 8,04

Las muestras fueron tomadas en intervalos de 7 minutos durante un tiempo total de 42 minutos, estas fueron preservadas, refrigeradas y almacenadas dentro de un cooler limpio y esterilizado para que posteriormente sea trasladado al laboratorio acreditado Envirotest S.A.C. y sea analizada la DQO

Tabla N° 16
Intensidad de corriente 3,5 A

Condiciones iniciales de la muestra			
pH = 8,04		I = 3,50 A	DQO (Inicial) = 394 mg/L
N° de Muestra	Código interno	Tiempo de reacción	DQO (mg/L)
01	B01 – 00	0 min	394,0
02	B01 – 01	7 min	246,6
03	B01 – 02	14 min	228,5
04	B01 – 03	21 min	219,1
05	B01 – 04	28 min	199,0
06	B01 – 05	35 min	196,2
07	B01 – 06	42 min	189,1

Elaboración propia

Tabla N° 17
Intensidad de corriente 5,0 A

Condiciones iniciales de la muestra			
pH = 8,04		I = 5,0 A	DQO (Inicial) = 394 mg/L
N° de Muestra	Código interno	Tiempo de reacción	DQO (mg/L)
01	B02 – 00	0 min	394,0
02	B02 – 01	7 min	238,8
03	B02 – 02	14 min	214,7
04	B02 – 03	21 min	200,9
05	B02 – 04	28 min	192,3
06	B02 – 05	35 min	191,9
07	B02 – 06	42 min	188,3

Elaboración Propia

Tabla N° 18
Intensidad de corriente 6,5 A

Condiciones iniciales de la muestra			
pH = 8,04		I = 6,50 A	DQO (Inicial) = 394 mg/L
N° de Muestra	Código interno	Tiempo de reacción	DQO (mg/L)
01	B03 – 00	0 min	394,0
02	B03 – 01	7 min	236,4
03	B03 – 02	14 min	207,2
04	B03 – 03	21 min	198,2
05	B03 – 04	28 min	192,7
06	B03 – 05	35 min	190,3
07	B03 – 06	42 min	187,9

Elaboración propia

Observación.- Durante el proceso de reacción en la celda se observó tres zonas diferenciadas, las cuales detallamos de la siguiente manera :

- 1) **Zona de reacción.**- Aquí se encuentran sumergidos los electrodos y se produce el proceso de electrocoagulación.
- 2) **Zona de sedimentación.**- Zona donde precipitan los lodos sedimentables.
- 3) **Zona de flotación.**- Zona donde se acumulan los lodos productos de la flotación.

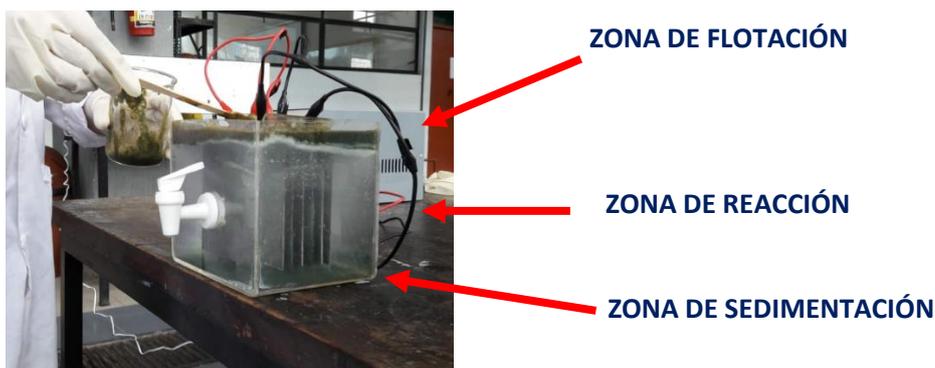


Figura N° 23– *Zonas de procesos*
Elaboración propia

4.3 Población y muestra

La población se delimitó en el departamento de Lima del distrito de Lurín, en el AH. Julio Cesar Tello II etapa, exactamente en el EBAR 085.

La toma de muestra se realizó entre los periodos de tiempo de 06:00 a las 19:00 horas, colectando 3 L de agua residual doméstica por cada hora transcurrida, estas horas se consideraron adecuadas por las actividades del uso del agua de la población.

4.4 Técnicas e Instrumentos de recolección de datos

Las técnicas e instrumentos de recolección de datos que se han mencionado en el diseño de la investigación son :

- a) Identificación de las características fisicoquímicas y microbiológicas del agua residual domésticas del EBAR 085, donde se realizó el análisis de los siguientes parámetros :

Tabla N° 19
Parámetros según D.S. N° 003-2010-MINAM

Ítem	Parámetros
01	DBO
02	Sólidos Totales Suspendidos
03	Temperatura
04	Aceites y Grasas
05	Conductividad Eléctrica
06	Coliformes Termotolerantes
07	Potencial de Hidrógeno
08	DQO

Elaboración propia

- b)** Se utilizó las variables intensidad de corriente, potencial de hidrógeno y tiempo de reacción, para poder lograr la máxima reducción de la DQO

El análisis de ensayo de la DQO se realizó en el laboratorio Envirotest SAC y posteriormente se calculó la eficiencia mediante el porcentaje de reducción, los datos fueron recolectados en los formatos de excel, los cuales se detalla líneas abajo.

Tabla N° 20
Referencias iniciales

Condiciones iniciales de la muestra			
	pH _i	I _i (Intensidad de corriente)	DQO (inicial) = DQO ₀
N° Muestreo	Tiempo de reacción	DQO (mg/L)	% de reducción DQO
01	0 min	DQO ₀	%R _{DQO0}
02	7 min	DQO ₁	%R _{DQO1}
03	14 min	DQO ₂	%R _{DQO2}
04	21 min	DQO ₃	%R _{DQO3}
05	28 min	DQO ₄	%R _{DQO4}
06	35 min	DQO ₅	%R _{DQO5}
07	42 min	DQO ₆	%R _{DQO6}

Elaboración propia

Donde :

i = 1, 2 y 3. Significa para el pH (ácido, básico o neutro);
 la intensidad de corriente (3,5 A; 5,0 A o 6,5 A)

4.5 Procedimiento de recolección de datos

El análisis en excel es una potente herramienta estadística, de gran utilidad tanto en la industria para el control de procesos, como en el laboratorio de análisis, para el control de métodos analíticos, etc.

El objetivo del excel es analizar los diversos comportamientos de los valores medidos para determinar si alguno de ellos difiere significativamente del resto. Se trata de disponer en forma de tablas ciertas cantidades que conducen a la obtención del coeficiente de determinación llamado R². El coeficiente determina la calidad de una función o modelo para intentar replicar los resultados dado que el objetivo principal del R² es el de predecir futuros resultados. Estadísticamente el R² puede tomar valores entre 0 y 1

4.6 Procesamiento estadístico y análisis de datos

A medida que se empiece a colocar los datos obtenidos en las pruebas de ensayo en la hoja de cálculo excel, se calcularán aplicando las funciones en la categoría de estadísticas R^2 dentro de ellas la que interese con el fin de encontrar valores exactos de las variables X e Y. La peculiaridad de esta función es que la salida es un conjunto de celdas, una matriz (valores de la ordenada en origen y la pendiente).

Posteriormente se corroborará analizando con una representación gráfica.

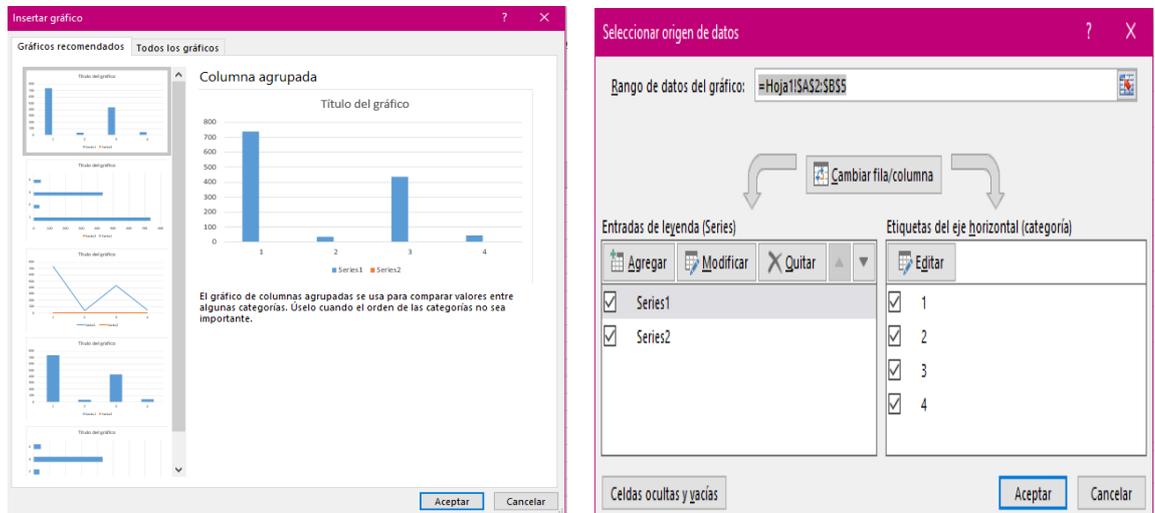


Figura N° 24– Programación Excel
Elaboración propia

V. RESULTADOS

5.1 Reporte de ensayo en medio ácido

- a) Resultados para pH = 5,6 con intensidades de corriente de 3,5 A, mediante los valores obtenidos en los ensayos de laboratorio, se calculó el porcentaje de reducción de la DQO (Utilizando la fórmula de la **Tabla N°9 Ver pag. N° 55**)

Tabla N° 21

% Reducción de DQO vs tiempo a pH = 5,6 e I = 3,5 A

Código Interno	A01 – 01	A01 – 02	A01 – 03	A01 – 04	A01 – 05	A01 – 06
Tiempo (min)	7,0	14,0	21,0	28,0	35,0	42,0
% de reducción DQO	36,19	45,41	49,80	52,31	53,30	54,01

Elaboración propia

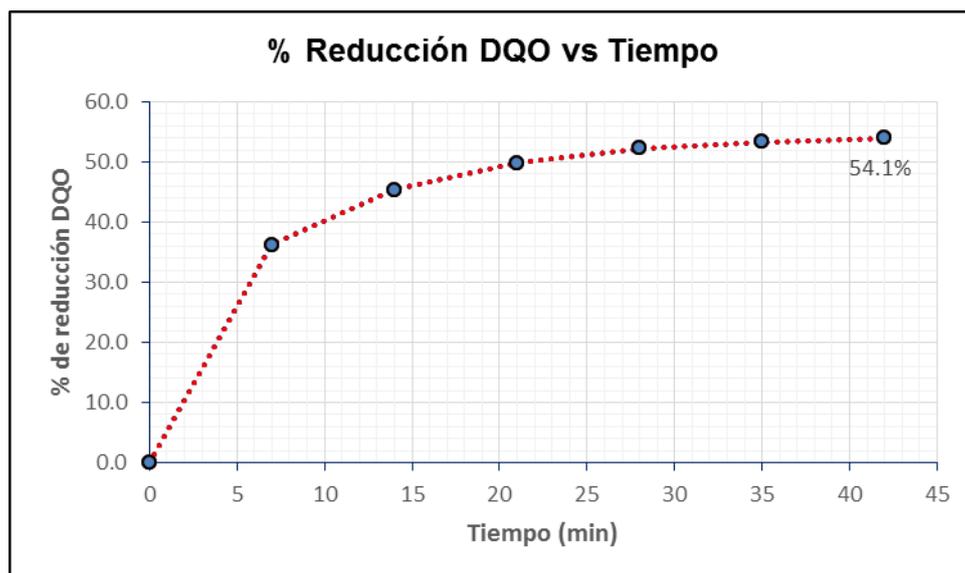


Gráfico N° 1 – *% Reducción DQO a pH = 5,6 e I = 3,5 A*

Elaboración propia

- b) Resultados para pH = 5,6 con intensidades de corriente de 5,0 A, mediante los valores obtenidos en los ensayos de laboratorio, se

calculó el % reducción de la DQO (Utilizando la fórmula de la **Tabla N° 9 Ver pag. N° 55**)

Tabla N° 22
% Reducción de DQO vs tiempo a pH = 5,6 e I = 5,0 A

Código Interno	A02 – 01	A02 – 02	A02 – 03	A02 – 04	A02 – 05	A02 – 06
Tiempo (min)	7,0	14,0	21,0	28,0	35,0	42,0
% de reducción DQO	39,39	50,41	56,40	59,59	62,21	63,30

Elaboración propia

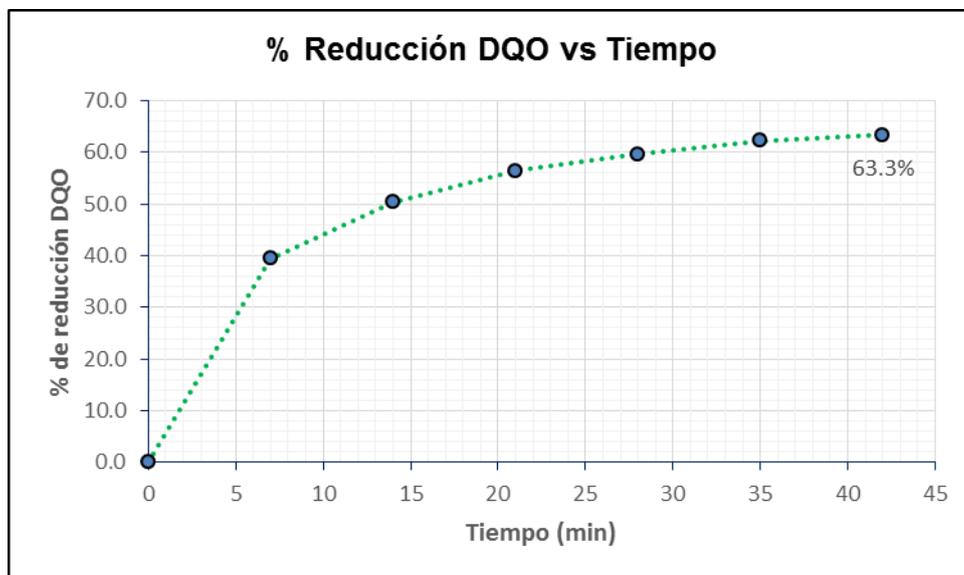


Gráfico N° 2 – % Reducción DQO a pH = 5,6 e I = 5,0 A
Elaboración propia

c) Resultados para pH = 5,6 con intensidades de corriente de 6,5 A, mediante los valores obtenidos en los ensayos de laboratorio, se calculó el %reducción de la DQO (Utilizando la fórmula de la **Tabla N°9 Ver pag N° 55**)

Tabla N° 23

% Reducción de DQO vs tiempo a pH = 5,6 e I = 6,5 A

Código interno	A03 – 01	A03 – 02	A03 – 03	A03 – 04	A03 – 05	A03 – 06
Tiempo (min)	7,0	14,0	21,0	28,0	35,0	42,0
% de reducción DQO	38,30	52,11	57,69	60,30	62,31	64,80

Elaboración propia

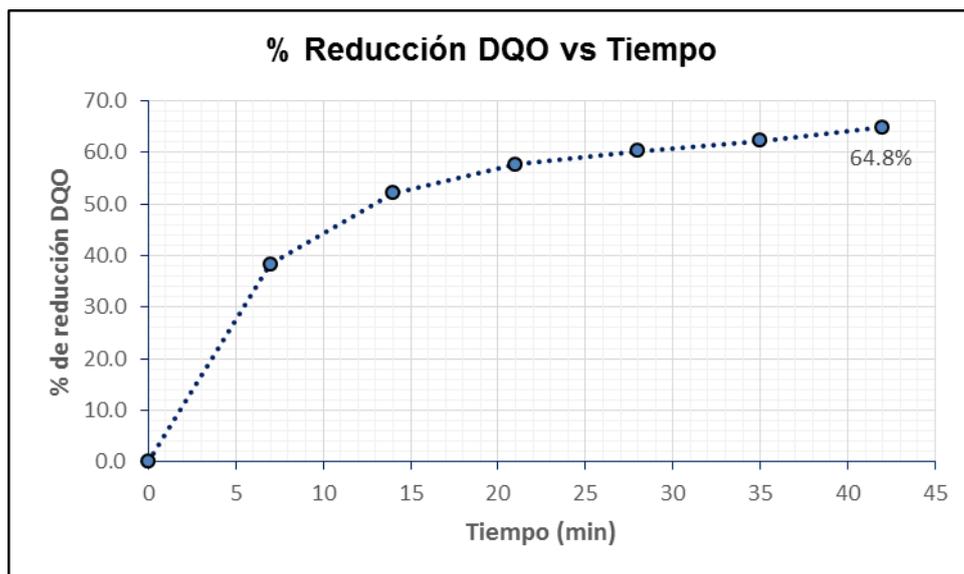


Gráfico N° 3 – % Reducción DQO a pH = 5,6 e I = 6,5 A

Elaboración propia

5.2 Reporte de ensayo en medio neutro

- a) Resultados para pH = 6,92 con intensidades de corriente de 3,5 A, mediante los valores obtenidos en los ensayos de laboratorio, se calculó el % reducción de la DQO (Utilizando la fórmula de la **Tabla N° 9 ver pag. N° 55**)

Tabla N° 24

% Reducción de DQO vs tiempo a pH = 6,92 e I = 3,5 A

Código interno	N01 – 01	N01 – 02	N01 – 03	N01 – 04	N01 – 05	N01 – 06
Tiempo (min)	7,0	14,0	21,0	28,0	35,0	42,0
% de reducción DQO	27,99	34,39	40,51	43,81	47,01	48,60

Elaboración propia

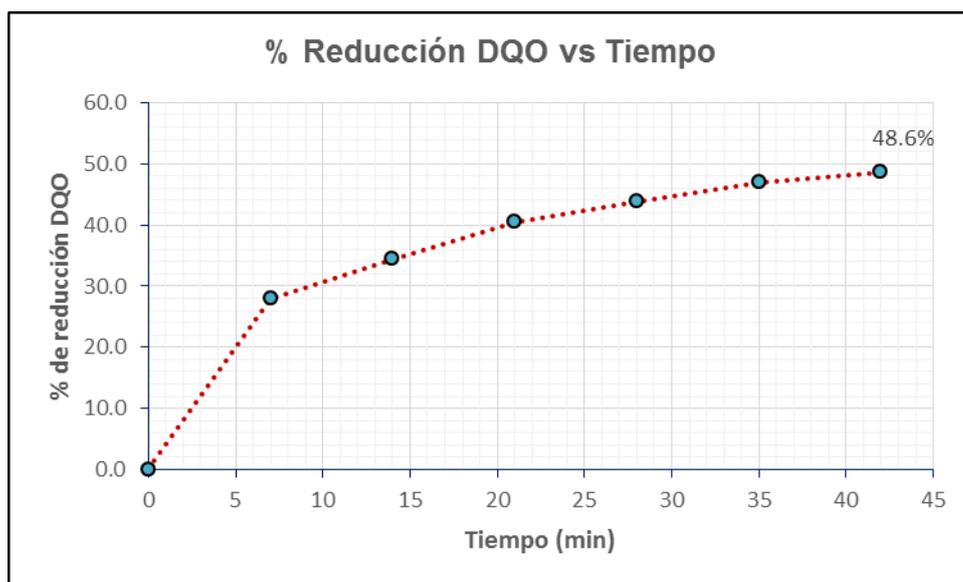


Gráfico N° 4 – % Reducción DQO a pH = 6,92 e I = 3,5 A

Elaboración propia

- b)** Resultados para pH = 6,92 con intensidades de corriente de 5,0 A, mediante los valores obtenidos en los ensayos de laboratorio, se calculó el % reducción de la DQO (Utilizando la fórmula de la **Tabla N° 9** ver pag. N° 55)

Tabla N° 25

% Reducción de DQO vs tiempo a pH = 6,92 e I = 5,0 A

Código interno	N02 – 01	N02 – 02	N02 – 03	N02 – 04	N02 – 05	N02 – 06
Tiempo (min)	7,0	14,0	21,0	28,0	35,0	42,0
% de reducción DQO	32,21	38,20	42,99	47,49	51,09	53,20

Elaboración propia

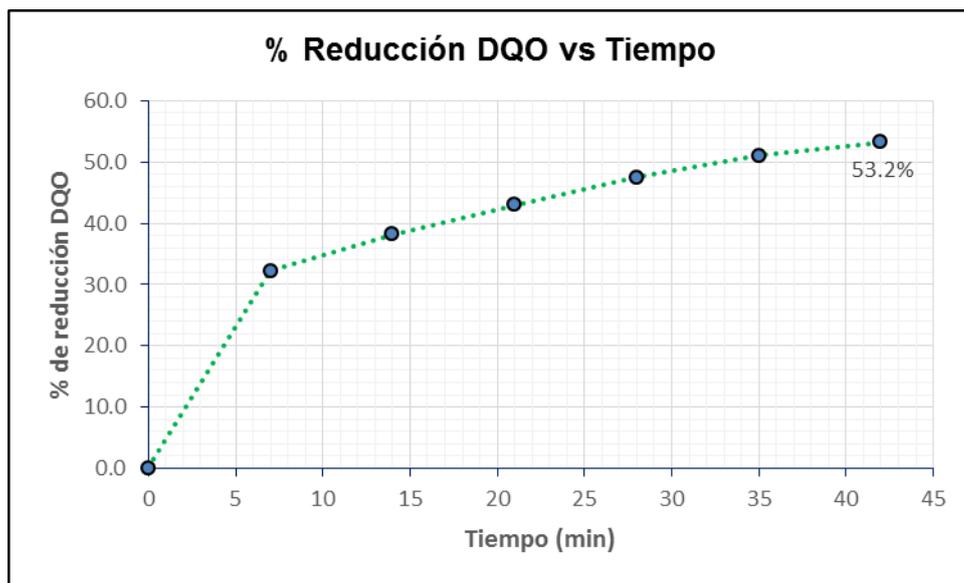


Gráfico N° 5 – % Reducción DQO a pH = 6,92 e I = 5,0 A

Elaboración propia

- c) Resultados para pH = 6,92 con intensidades de corriente de 6,5 A, mediante los valores obtenidos en los ensayos de laboratorio, se calculó el % reducción de la DQO (Utilizando la fórmula de la **Tabla N° 9** ver pag. N° 55)

Tabla N° 26

% Reducción de DQO vs tiempo s $pH = 6,92$ e $I = 6,5 A$

Código interno	N03 – 01	N03 – 02	N03 – 03	N03 – 04	N03 – 05	N03 – 06
Tiempo (min)	7,0	14,0	21,0	28,0	35,0	42,0
% de reducción DQO	33,40	39,49	45,41	49,59	52,11	55,00

Elaboración propia

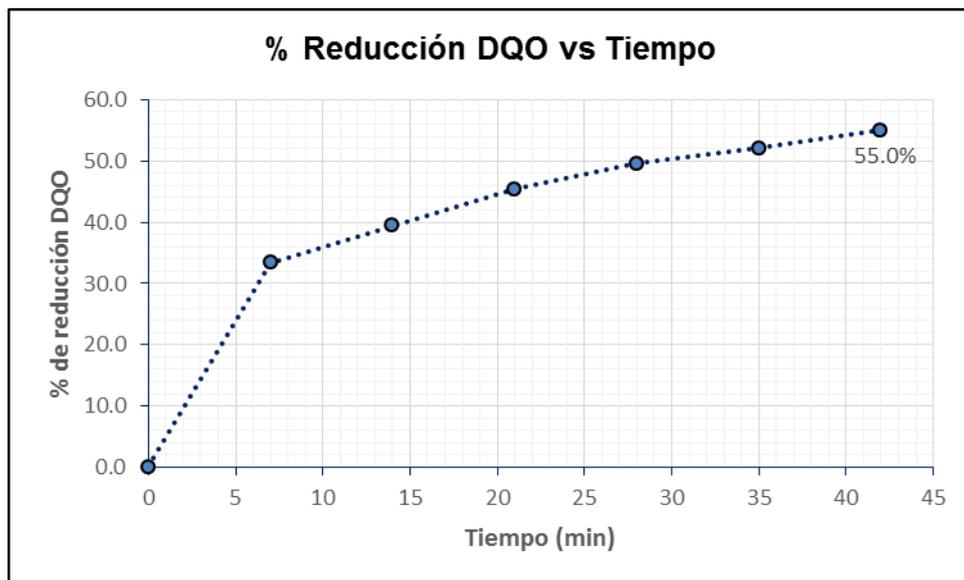


Gráfico N° 6 – % Reducción DQO a $pH = 6,92$ e $I = 6,5 A$

Elaboración propia

5.3 Reporte de ensayo en medio básico

- a) Resultados para $pH = 8,04$ con intensidad de corriente de $3,5 A$, mediante los valores obtenidos en los ensayos de laboratorio, se calculó el % reducción de la DQO (Utilizando la fórmula de la **Tabla N° 9 ver pag. N° 55**)

Tabla N° 27

% Reducción de DQO vs tiempo a pH = 8,04 e I = 3,5 A

Código interno	B01 – 01	B01 – 02	B01 – 03	B01 – 04	B01 – 05	B01 – 06
Tiempo (min)	7,0	14,0	21,0	28,0	35,0	42,0
% de reducción DQO	37,41	42,01	44,39	49,49	50,20	52,01

Elaboración propia

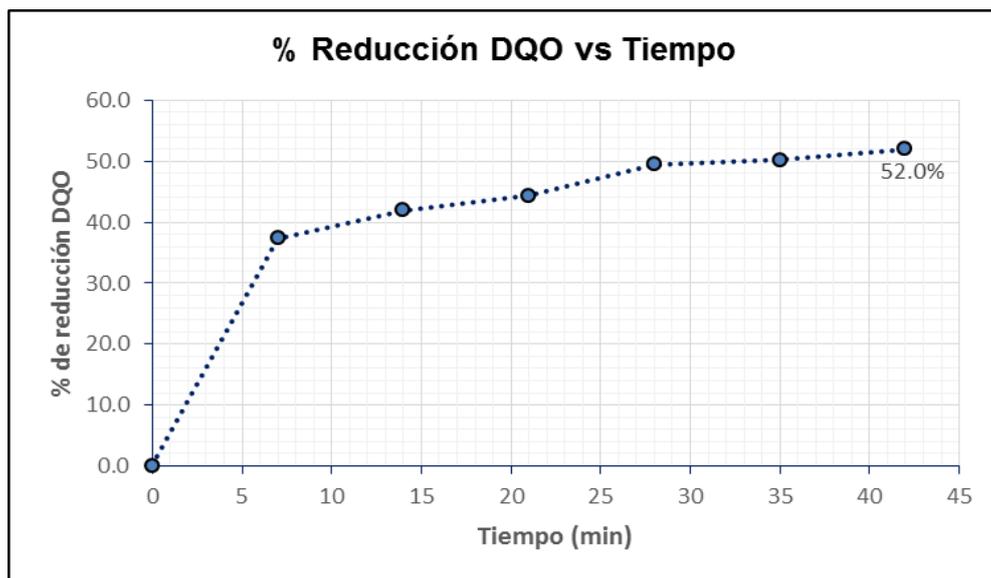


Gráfico N° 7 – % Reducción DQO a pH = 8,04 e I = 3,5 A

Elaboración propia

- b)** Resultados para pH = 8,04 con intensidad de corriente de 5,0 A, mediante los valores obtenidos en los ensayos de laboratorio, se calculó el % reducción de la DQO (Utilizando la fórmula de la **Tabla N° 9 ver pag. N° 55**)

Tabla N° 28

% Reducción de DQO vs tiempo a pH = 8,04 e I = 5,0 A

Código interno	B02 – 01	B02 – 02	B02 – 03	B02 – 04	B02 – 05	B02 – 06
Tiempo (min)	7,0	14,0	21,0	28,0	35,0	42,0
% de reducción DQO	39,39	45,51	49,01	51,19	51,29	52,21

Fuente : Elaboración propia.

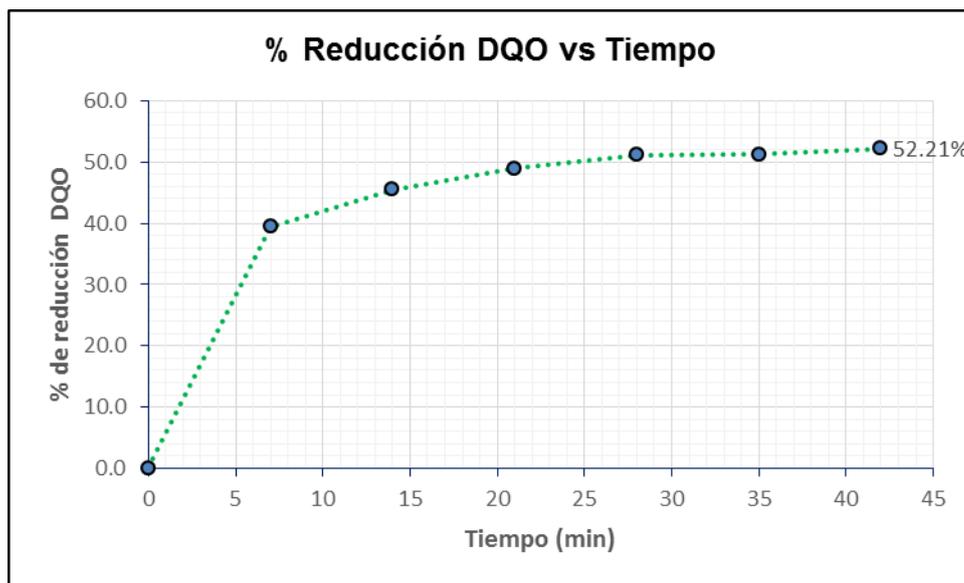


Gráfico N° 8 – % Reducción DQO a pH = 8,04 e I = 5,0 A

Elaboración propia

- c) Resultados para pH = 8,04 con intensidad de corriente de 6,5 A, mediante los valores obtenidos en los ensayos de laboratorio, se calculó el %reducción de la DQO (Utilizando la fórmula de la **Tabla N° 9** ver pag. N° 55)

Tabla N° 29

% Reducción de DQO vs tiempo a pH = 8,04 e I = 6,5 A

Código interno	B03 – 01	B03 – 02	B03 – 03	B03 – 04	B03 – 05	B03 – 06
Tiempo (min)	7,0	14,0	21,0	28,0	35,0	42,0
% de reducción DQO	40,00	47,41	49,70	51,09	51,70	52,31

Fuente : Elaboración propia.

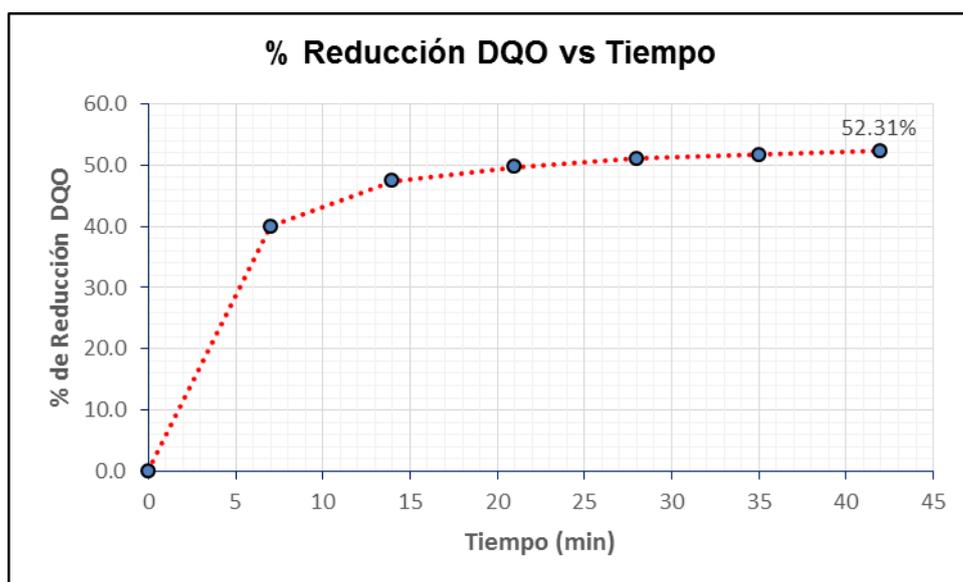


Gráfico N° 9 – % Reducción DQO a pH = 8,04 e I = 6,5 A

Elaboración propia

5.4 Análisis comparativo de los medios

Durante las pruebas realizadas con un pH ácido de 5,6 variando las intensidades de corriente de 3,5 A; 5,0 A y 6,5 A en tiempos iguales, se observa una óptima eficiencia de porcentaje de reducción de la DQO de 63,3% a 6,5 A.

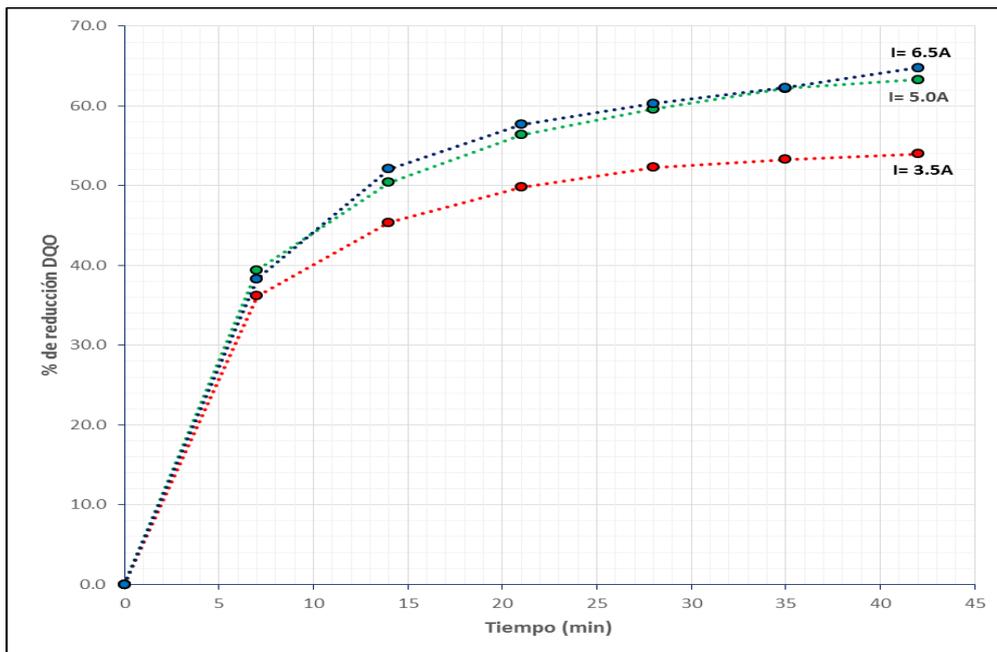


Gráfico N° 10 – % Reducción DQO comparativo a pH = 5,6
Elaboración propia

Aunque con el comportamiento con la intensidad de corriente de 5,0 A no difiere demasiado, mostrando una ligera tendencia de aumento a la curva y porcentaje de intensidad de corriente de 6,5 A.

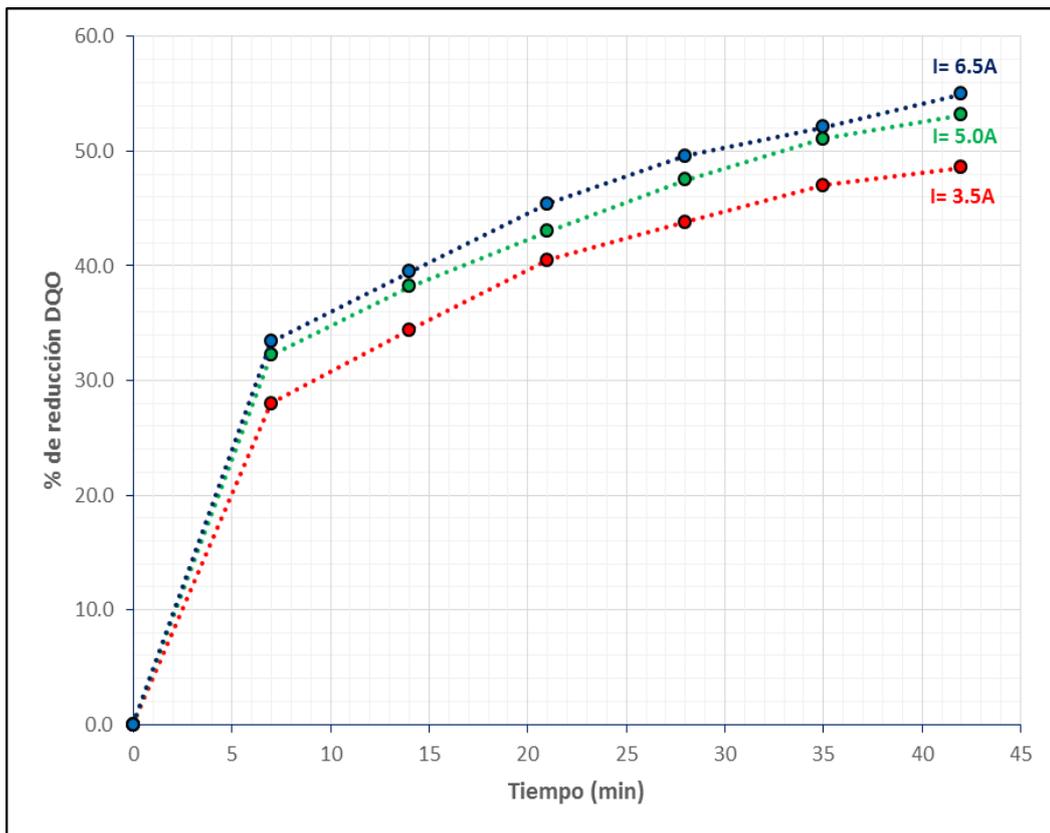


Gráfico N° 11 – % Reducción DQO comparativo a pH = 6,92
Elaboración propia

Durante las pruebas realizadas con un pH neutral de 6,92 variando las intensidades de corriente de 3,5 A; 5,0 A y 6,5 A en tiempos iguales, se observa un mejor porcentaje de reducción de la DQO de 55,0% a 6,5A.

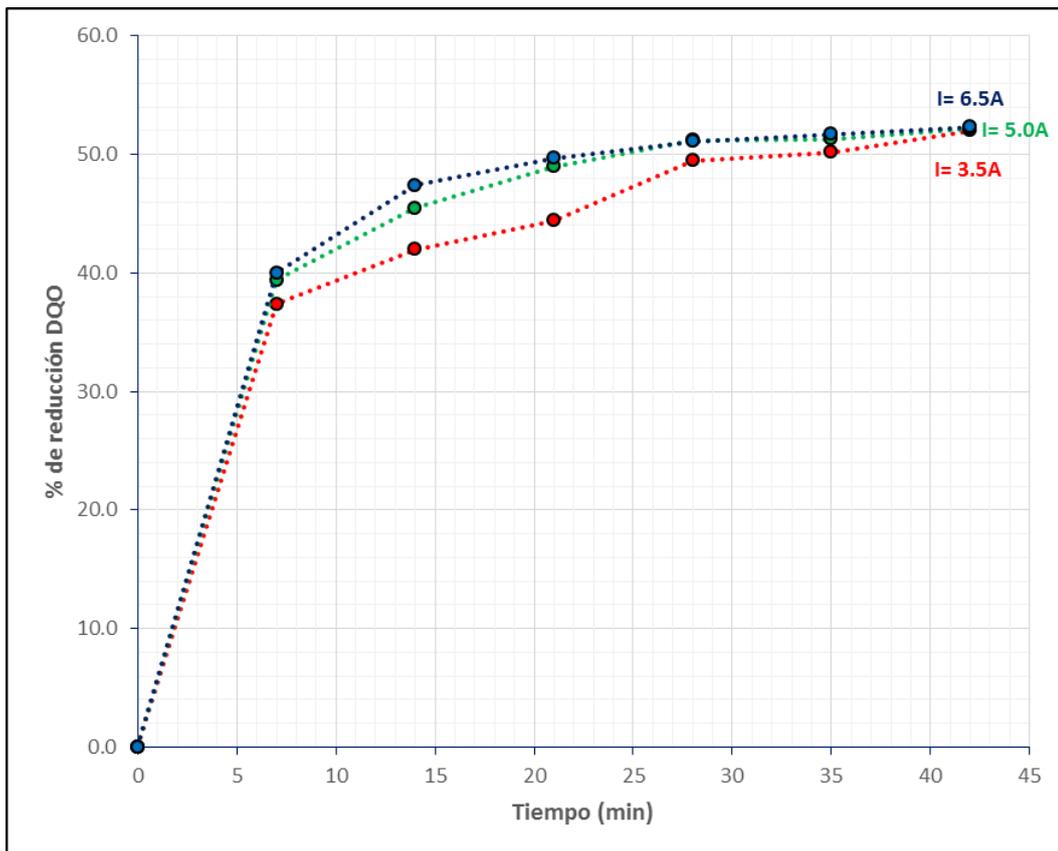


Gráfico N° 12 – % Reducción DQO comparativo a pH = 8,04
Elaboración propia

Durante las pruebas realizadas con un pH básico de 8,04 variando las intensidades de corriente de 3,5 A; 5,0 A y 6,5 A en tiempos iguales, se observa un mejor porcentaje de reducción de la DQO de 52,31% a una intensidad de 6,5 Amperios.

Pero en estas mismas condiciones las otras dos pruebas con las intensidades de corriente 3,5 A y 5,0 A son muy similares dando un porcentaje de reducción de 52,0% y 52,21% respectivamente.

VI. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

6.1 Contrastación de hipótesis con los resultados

Según las diferentes experiencias realizadas a lo largo de la investigación de la reducción de la Demanda química de oxígeno, se llegó a un valor óptimo de DQO de 138,7 mg/L para una solución en pH ácido e intensidad de corriente de 6,5 A, siendo su porcentaje de reducción de 64,8%

El proceso de electrocoagulación desarrollado permite discutir la reducción de la DQO en función de los parámetros de control: tiempo de reacción, pH e intensidad de corriente.

Para facilitar la comprensión de dichos resultados, se especificará la influencia de estos parámetros de control sobre el tratamiento del agua residual doméstica del EBAR 085 – Lurín :

Efecto de la variación del pH en la reducción de la Demanda química de oxígeno (DQO) :

Efecto del pH ácido en la reducción de la Demanda química de oxígeno.

Para variar el pH de la muestra residual doméstica se añadió ácido clorhídrico al 9%, dado que, según Arango Ruiz, Álvaro en la investigación “La electrocoagulación : una alternativa para el tratamiento de aguas residuales” se verificó que los iones cloruros mejoran la conductividad a diferencia de los iones sulfatos quienes precipitan al calcio y magnesio generando una película insoluble sobre los electrodos por ese criterio se utilizó el ácido clorhídrico en vez del ácido sulfúrico. En nuestra experiencia al añadir el ácido clorhídrico aumentó la conductividad inicial de 776 us/cm a 882,5 us/cm debido a los iones cloruros disociados en el agua.

Bajo las investigaciones, se tiene que mejores eficiencias se han logrado cercano a un pH neutro, por esta razón decidimos tomar un pH inicial de 5,6 en nuestro análisis experimental.

En nuestra experiencia notamos que a pH ácido durante el proceso de electrocoagulación aumentó de 5,6 (inicial) hasta un pH de 8,14; encontrándose dentro del “Rango límites máximos permisibles–003–2010” También se observó mejores resultados en la reducción de la DQO a este pH.

Efecto del pH neutro en la reducción de la Demanda química de oxígeno.

En este análisis experimental no se añadió ningún reactivo, teniendo el pH de la muestra original de 6,92

En nuestra experiencia notamos que a pH neutro durante el proceso de electrocoagulación aumentó de 6,92 (inicial) hasta un pH de 8,61, encontrándose ligeramente fuera del “Rango límites máximos permisibles–003–2010”. También se observó no tan notables reducciones de la DQO a este pH en comparación con la muestra en medio ácido.

Efecto del pH básico en la reducción de la Demanda química de oxígeno.

Con respecto al pH original de 6,92 se añadió hidróxido de sodio hasta obtener un pH de 8,04, se realizó con el fin de obtener una mejor evaluación del efecto del pH en la eficiencia de la reducción de la DQO.

En nuestra experiencia notamos que a pH básico durante el proceso de electrocoagulación aumentó de 8,04 (inicial) hasta un pH de 10,22, encontrándose fuera del “Rango límites máximos permisibles–003–2010”. También se observó que los resultados en la reducción de la DQO no fueron notorios al incrementar la intensidad de corriente, dado que se mantuvo alrededor del 52,18% siendo esto ineficiente.

Efecto de la variación del tiempo de reacción en la reducción de la Demanda química de oxígeno (DQO) :

Según Prieto García, Francisco, en su investigación “Electrocoagulación : una alternativa para depuración de lactosuero residual” nos menciona que el tiempo de reacción facilita la formación de

sólidos en el proceso por lo que en nuestro trabajo de investigación tomamos como referencia la experiencia visual y realizando el proceso de electrocoagulación en medio neutro hemos observado que en la zona de reacción la cantidad de partículas fueron disminuyendo acumulándose en la zona flotante y zona sedimentable en los primeros 40 minutos de operación, por lo tanto tomamos como referencia un tiempo de reacción de 42 minutos.

Efecto de la intensidad de corriente en la reducción de la Demanda química de oxígeno (DQO) :

Según el “Estudio de la factibilidad del proceso de electrocoagulación para la obtención de sólidos a partir de la vinaza” de Elaine Ojeda (2012), diferentes trabajos reportan y todos coinciden en que la corriente incrementa de forma significativa la cantidad de contaminante separado. Esto se corresponde con la ley de Faraday, que rige el proceso de electrocoagulación, la cual describe la relación entre la cantidad de corriente y la cantidad de iones aportados a la disolución, por lo que realizamos experimentos a 3,5 A; 5,0 A y 6,5 Amperios.

Otros factores importantes :

a) Distancia entre electrodos.- Para definir las separaciones entre los electrodos realizamos pruebas experimentales donde se observó que a distancias inferiores a 1 centímetro (0,5 cm) el valor de la DQO fue 214,7 mg/L, verificando atascamientos por deposición de lodo sobre la superficie de los electrodos de fierro, impidiendo la circulación del medio acuoso y la generación de turbulencias que favorecen la coagulación dando como resultado bajas remociones. Luego se realizó pruebas a 1 cm resultando el valor de la DQO de 187,8 mg/L, verificando generación de turbulencia en el proceso. Finalmente realizamos a una distancia entre electrodos de 1,5 cm teniendo como resultado el valor de DQO de 195,2 mg/L. Tomando como referencia estos valores optamos por elegir 1,0 cm de distancia entre electrodos.

b) Elección de los electrodos.- Basándonos en las referencias bibliográficas, las remociones de DQO obtenidas con electrodo de hierro son altas y ante el hecho que los costos del hierro son menores al del aluminio, por ende, se utilizó ambos electrodos de material de hierro.

6.2 Contrastación de resultados con otros estudios similares

Con respecto al antecedente “Diseño de una celda de electrocoagulación para el tratamiento de aguas residuales de la industria láctea [6]”, ellos concluyen 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., como lo hemos corroborado en nuestras pruebas experimentales a 0,5 cm; 1,0 cm y a 1,5 centímetros.

Con respecto al antecedente “Evaluación de la eficiencia de una celda de electrocoagulación a escala laboratorio para el tratamiento de agua [1]”, el autor concluye que existe una mejor remoción de la DQO a pH neutro de 7,12, intensidad de corriente de 5,0 A y a un tiempo de 15 minutos, logrando una eficiencia de 87% con agua preparada sintética y sin evaluar los resultados a un tiempo mayor de 15 minutos para observar la curva con tendencia constante y saber si habrían logrado el óptimo porcentaje de reducción, en nuestra investigación obtuvimos mejores rendimientos con pH de carácter ácido de 5,6, si bien no se logró remociones mayores a 63,3% debido a que nuestra agua residual doméstica probablemente presente más contaminantes con respecto al agua sintética.

VII. CONCLUSIONES

- 1) Se determinó que las variables de mayor incidencia en el proceso son la intensidad de corriente, tiempo de reacción y pH.
- 2) Las pruebas realizadas nos permiten concluir que las mejores condiciones para obtener un mayor porcentaje de reducción de DQO en el tratamiento de las aguas residuales domésticas en el EBAR N°085 son a un pH ácido de 5,6, una intensidad de corriente de 5,0 amperios y un tiempo de tratamiento de 42 minutos; con los que se obtiene una eficiencia de 63,3%

Es importante señalar que al utilizar intensidades de corriente de 6.5 amperios con pH de 5,6 y un tiempo de 42 minutos, se observó una eficiencia 64,8%, siendo esta diferencia mínima que la anterior; se descartó ya que aumentaría el costo energético.

- 3) En la variación a pH ácido se obtuvo mejores resultados de reducción de DQO a comparación de los pH básicos y neutros en los diferentes tiempos muestreados.
- 4) El proceso de tratamiento por electrocoagulación logró desestabilizar los contaminantes presentes en el agua residual mediante la corriente eléctrica en la cual se contempló tres zonas (zona de flotación, zona de reacción y zona de sedimentación) siendo una alternativa viable y efectiva para la reducción de contaminantes.
- 5) El incremento de la corriente eléctrica favoreció el proceso de coagulación en los medios de pH ácido y neutro, a diferencia del pH básico quien demostró no ser tan notorio el porcentaje de reducción de la DQO al incrementar la intensidad de corriente.

VIII. RECOMENDACIONES

- 1) En las pruebas de laboratorio se utilizó como material para los electrodos el hierro por ser un material altamente recomendable en su bajo costo según bibliografías, pero se recomienda realizar pruebas con otros materiales como grafito, cobre, aluminio, titanio, etc., a fin de realizar comparaciones.
- 2) Se recomienda para futuros ensayos experimentales de electrocoagulación, involucrar agitadores y/o aireadores, porque esto podría favorecer a la clarificación del agua evitando concentración de partículas flotantes de gran tamaño.
- 3) Se recomienda implementar un par de limpiadores de espuma en la superficie de la zona flotante, esto se realiza con el fin de que no se acumule residuos espumosos y para que posteriormente sean depositados en otra área de la cuba.

IX. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AGUILAR ASCON, Edwar Alejandro. Evaluación de la eficiencia de una celda de electrocoagulación a escala laboratorio para el tratamiento de agua. Grado académico de Magister. Lima. Universidad Nacional Mayor de San Marcos. 2015
- ALARCÓN RONDÓN, Eliana I. y NEITA PINTO, Laura C. Propuesta para la reutilización del agua residual tratada en una empresa de cereales en la ciudad de Bogotá. Grado para optar el título de Ingeniero Químico. Universidad de América. Bogotá D.C. 2017
- ANGULO BEDOYA, Monica L. y BETANCOURT LATORRE, Alejandra. Optimización de los Parámetros de Operación en un Proceso de Tratamiento de Aguas por Electro-Oxidación. Grado Investigación. Medellín. Universidad EAFIT. 2008
- ARANGO RUIZ, Álvaro. Efectos del pH y la conductividad en la electrocoagulación de aguas residuales de la industria láctea. *Revista producción+ limpia*. 59 a 67. Junio 2012
- ARANGO RUIZ, Álvaro. La Electrocoagulación: Una Alternativa para el Tratamiento de Aguas Residuales. *Lasallista de investigación*. 50 a 77. Junio 2005
- ARANGO RUIZ, Álvaro y GARCÉS GIRALDO, Luis. Diseño de una Celda de Electrocoagulación para el Tratamiento de Aguas Residuales de la Industria Láctea. *Revista Universidad EAFIT*. Vol.43: 56 a 67. Septiembre 2007
- ARBOLEDA, Juan y HERRERA, Paula. Evaluación de un proceso de electrocoagulación en un reactor tipo batch para la remoción de cromo hexavalente (Cr^{6+}) con electrodos de aluminio – aluminio y de hierro – aluminio en condiciones de laboratorio. Grado de investigación en ingeniería Ambiental. Bogotá D.C 2015

- ARIAS, William. Remoción de cromo (III) y dco a través de electrocoagulación en aguas residuales de la industria curtiembre haciendo uso racional de la energía. Grado académico en Maestría en ingeniería con énfasis en energías alternativas. Bogota D.C. Universidad libre. 2013
- BARBA HO, Luz Edith, Conceptos Básicos de la Contaminación del Agua y Parámetros de Medición. *Revista Universidad del Valle*. 31. Julio 2002
- BOGADO RIVAS, Rodrigo, Propuestas para el tratamiento de efluentes industriales. *Ecopreneur Paraguay*. 2. Enero 2008
- CANALES LOPEZ, Hubert O. y SEVILLA CARPIO, Amiro A. evaluación del uso de microorganismos eficaces en el tratamiento de efluentes domésticos residuales del distrito de Pátapo. Tesis para optar el título de Ingeniero Químico. Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo. Lambayeque. 2016
- FERNANDEZ, Jesus y DOLORES CURT, Maria. Métodos Analíticos para aguas residuales. *Manual de fitodepuración. Filtros de macrofitas en flotación*. 119 a 120. Marzo 1998
- GARCÉS GIRALDO, L., RESTREPO MEJÍA, A. y ARANGO RUIZ, Á. La Electrocoagulación: Retos y Oportunidades en el Tratamiento de Aguas. *Producción + Limpia (P+L)*. 59 a 77. Junio 2006
- GARCÍA MORALES, Marco Antonio. Evaluación de Tratamientos Terciarios para la Reutilización de Aguas Provenientes de Efluentes Industriales. Tesis doctoral. Toluca. Universidad Autónoma del Estado de México. 2014
- GARCÍA ESPINOSA, José Edy. Remoción de arsénico en agua por electrocoagulación. Tesis maestría. México. Universidad Nacional Autónoma de México. 2010

- GIMÉNEZ GARCÍA, Juan B. Estudio del tratamiento anaeróbico de aguas residuales urbanas en biorreactores de membranas. Tesis doctoral. Universidad de Valencia. 2014
- GÓMEZ APAC, Hugo Ramiro. Fiscalización ambiental en aguas residuales. *Revista de Aguas Residuales - OEFA*. 6 a 42. Abril 2014
- GOYENOLA, G. Red de Monitoreo Ambiental Participativo de Sistemas Acuáticos.
http://imasd.fcien.edu.uy/difusion/educamb/propuestas/red/curso_2007/cartillas/tematicas/Conductividad.pdf. artículo web. Consultada el 25 Mayo de 2007
- HANI, M A. Utilización de un Sistema Híbrido Basado en Filtración con Membranas Electrooxidación Avanzada para Depurar Efluentes Complejos. Grado para optar el título de ingeniero. Concepción. Universidad de Concepción. 2009
- JACOBS, E. P. Tratamiento del Agua por Procesos de Membrana. Stellenbosch. Editorial Lyonnaise Des Eaux. 1997
- JIMENÉZ CISNEROS, B. y MAGDALENO CHAPA, L. Tratamiento Terciario de Aguas Residuales por Filtración e Intercambio Iónico. Coyoacán. Editorial Ciudad Universitaria S.A. 2002
- NODAL BECERRA, E. Procesos Biológicos Aplicados al Tratamiento de Agua Residual. *Ingeniería Hidráulica y Ambiental*. 52 a 56. Julio 2001
- OJEDA, Elaine; HING, Romelia y GONZALEZ, Yudith. Estudio de la factibilidad del proceso de electrocoagulación para la obtención de sólidos a partir de la vinaza. *Revista CENIC Ciencias Químicas*, Vol. 4. 2012
- OLIVOS LARA, Omar E. Tratamiento de aguas. *Tratamiento primario*. 4. Febrero 2010
- OÑA, Byron y FALCONI, David. Tratamiento avanzado de aguas residuales del proceso de lavado y tinturado de jeans en la empresa “mundocolor” mediante electrocoagulación. Grado para optar el título

de ingeniero Industrial. Escuela superior politécnica de Chimborazo.
Riobamba-Ecuador 2013

PRIETO GARCIA, F., CALLEJAS HERNÁNDEZ, J., REYES CRUZ, V. y
MARMOLEJO SANTILLÁN, Y. Electrocoagulación: Una alternativa
para Depuración de Lactosuero Residual. *Revista AIDIS*. 51 a 77.
Diciembre 2012

PANTOJA, Evelyn. Aplicación de la electrocoagulación y floculación sobre
el tratamiento del drenaje ácido de minas de carbón. Grado
académico para optar el título de Ingeniería Química. Universidad del
Valle. Santiago de Cali-Colombia 2012

SECULA, M. S., CRETESCU, I., y PETRESCU, S. An Experimental Study
of Indigo Rarmine Removal from Aqueous Solution by
Electrocoagulation. *Science Direct*. 227 a 235. Junio 2011

TEJERO, I., SUÁREZ, J., JÁCOME, A., y TEMPRANO, J. Coagulación -
Floculación. *Tratamiento de Aguas*. 3 a 6. Enero 2007

VARGAS, Carmen Características microbiológicas de las aguas
residuales “Lagunas de estabilización” teoría, diseño, construcción,
operación, evaluación y mantenimiento. 2. Agosto 1996.

ANEXOS

MATRIZ DE CONSISTENCIA
“CONDICIONES ÓPTIMAS DE OPERACIÓN EN UNA CELDA DE ELECTROCOAGULACIÓN PARA LA REDUCCIÓN DE LA DEMANDA QUÍMICA DE OXÍGENO EN AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS”

Problema general	Objetivo general	Hipótesis general	Variable dependiente	Dimensiones	Indicadores	Método
¿Cuáles son las condiciones óptimas de operación en una celda de electrocoagulación para la reducción de la demanda química de oxígeno en aguas residuales domésticas?	Determinar las condiciones óptimas de operación en una celda de electrocoagulación para la reducción de la demanda química de oxígeno en aguas residuales domésticas.	Las condiciones óptimas para la reducción de la demanda química de oxígeno en el agua residual doméstica dependerá del control de la DQO mediante las variaciones de la intensidad de corriente y del potencial de hidrogeno en referencia al tiempo de reacción.	X = Condiciones óptimas de operación en una celda de electrocoagulación para la reducción de la demanda química de oxígeno en aguas residuales domésticas.	<ul style="list-style-type: none"> • Porcentaje de reducción de la demanda química de oxígeno. 	<ul style="list-style-type: none"> • % de reducción de la demanda química de oxígeno 	<ul style="list-style-type: none"> • Ensayos de laboratorio.
Problemas específicos	Objetivos específicos	Hipótesis específicas	Variables independientes	Dimensiones	Indicadores	Método
a) ¿Cuáles son las características físicas, químicas y microbiológicas de las aguas residuales domésticas que conforman la muestra experimental?	a) Identificar las características físicas, químicas y microbiológicas de las aguas residuales domésticas que conforman la muestra experimental.	a) Las características físicas, químicas y microbiológicas más relevantes que conforman la muestra experimental son: DQO, DBO, pH, sólidos totales en suspensión, temperatura, aceites y grasas, coliformes termotolerantes y conductividad eléctrica.	Y = Características físicas, químicas y microbiológicas de las aguas residuales domésticas que conforman la muestra experimental.	<ul style="list-style-type: none"> • DQO • DBO • Potencial de hidrógeno • Sólidos totales en suspensión • Temperatura • Aceites y grasas • Conductividad eléctrica • Coliformes termotolerantes 	<ul style="list-style-type: none"> • mg/L • mg/L • pH • mg/L • °C • mg/L • μS/cm • NMP/ 100mL 	<ul style="list-style-type: none"> • Revisión de publicaciones • Análisis en el laboratorio
b) ¿Cuáles son los parámetros de control en una celda de electrocoagulación para la reducción de la demanda química de oxígeno en aguas residuales domésticas?	b) Determinar los parámetros de control en una celda de electrocoagulación para la reducción de la demanda química de oxígeno en aguas residuales domésticas	b) Los parámetros de control: potencial de hidrógeno, intensidad de corriente y tiempo de reacción; nos permitirán encontrar la condición óptima para la reducción de la demanda química de oxígeno en el agua residual doméstica.	Z = Parámetros de control en una celda de electrocoagulación para la reducción de la demanda química de oxígeno en aguas residuales domésticas.	<ul style="list-style-type: none"> • Potencial de hidrógeno • Intensidad de corriente • Tiempo de reacción 	<ul style="list-style-type: none"> • pH • Amperios • Minutos 	<ul style="list-style-type: none"> • Revisión de publicaciones • Pruebas de ensayos.

ANEXO

LÍMITES MÁXIMOS PERMISIBLES PARA LOS EFLUENTES DE PTAR

PARÁMETRO	UNIDAD	LMP DE EFLUENTES PARA VERTIDOS A CUERPOS DE AGUAS
Aceites y grasas	mg/L	20
Coliformes Termotolerantes	NMP/100 mL	10,000
Demanda Bioquímica de Oxígeno	mg/L	100
Demanda Química de Oxígeno	mg/L	200
pH	unidad	6.5-8.5
Sólidos Totales en Suspensión	mL/L	150
Temperatura	°C	<35