

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA

FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA Y TEXTIL



TESIS

**“REMOCIÓN DE ACEITES Y GRASAS DE UN EFLUENTE
INDUSTRIAL DEL SECTOR LÁCTEO POR
ELECTROCOAGULACIÓN CON ELECTRODOS DE ALUMINIO”**

PARA OBTENER EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO QUÍMICO

ELABORADO POR

SERGIO EDUARDO MORALES QUEVEDO

ASESOR

M.Sc. Ing. WARREN REÁTEGUI ROMERO

LIMA – PERÚ

2018

DEDICATORIA.

Dedicarle mi trabajo de Grado plasmada en el presente informe a Dios quién supo guiarme por el buen camino y darme fortaleza ante las adversidades que se presentan en la vida.

A mi madre, que ha sabido formarme con buenos sentimientos, hábitos y valores, lo cual me ha ayudado a salir adelante en los momentos más difíciles.

A mi padre, por los ejemplos de perseverancia y constancia que lo caracterizan y que me ha infundado siempre, por el valor mostrado para salir adelante y por su amor.

A mis hermanos, por brindarme siempre su cariño también apoyo incondicional y por compartir buenos y malos momentos.

A mi sobrina Marianita, por llenarme de amor desde que amanecía con sus ocurrencias y travesuras.

AGRADECIMIENTOS.

Agradezco a Dios por haberme acompañado y guiado a lo largo de mi carrera, por ser mi fortaleza en los momentos complicados y por brindarme una vida llena de aprendizajes, experiencias y sobre todo felicidad.

Agradezco a mi madre por la confianza y el apoyo brindado, que sin duda alguna en el trayecto de mi vida me ha demostrado su amor y consejos, corrigiendo mis equivocaciones y celebrando mis triunfos.

A mi padre por haberme dado la oportunidad de tener una buena educación en el transcurso de mi vida. Gracias por ser un excelente ejemplo de perseverancia a seguir.

A mis hermanos, gracias apoyo me han ayudado a salir adelante y representar la unidad familiar. Gracias por compartir sus vidas, pero sobre todo gracias por estar en otro momento tan importante en mi vida.

A mi sobrina Marianita por el amor que me da por alegrarme cada día antes de ir a ser mi actividades laborales.

RESUMEN.

El propósito de esta tesis es optar un método alternativo sin uso de reactivos químicos amigable con el medio ambiente para tratar aguas residuales No domésticas provenientes de la compañía GLORIA S.A., ubicada en Huachipa que produce productos lácteos y sus derivados, ya que ésta compañía descarga un elevado volumen de efluente diario y busca la posibilidad de poder optar otro método de tratamiento de sus efluentes. Por ésta razón se plantea remover aceites y grasas del agua residual mediante el método de electrocoagulación usando electrodos de aluminio.

Este trabajo se desarrolló a nivel campo y laboratorio en donde se utilizó equipos de medición de parámetros fisicoquímicos. Para la caracterización del efluente se realizaron muestreos simples diarios durante 3 días, de las muestras simples se obtuvieron una muestra patrón, bajo condiciones ambientales de la zona en función de la turbiedad.

En el experimento realizado en el reactor por lotes de 5 litros de capacidad se utilizó electrodos de aluminio, en donde se tomó 3 muestras en intervalos de 5 minutos a 3 diferentes densidades de corriente, para así determinar el valor de la densidad corriente que se debe aplicar para obtener mejores resultados.

Después del proceso, los resultados promedios de los parámetros físicos fueron: pH, varió de 7.07 a 8.01, temperatura de la muestra de 29 a 30.5 °C, turbiedad 357 NTU y sólidos suspendidos totales (SST) 32.2 mg/L. Los parámetros químicos tuvieron los siguientes promedios: demanda química de oxígeno (DQO) 974mg/L, También se realizó 2 corridas experimentales adicionales en el mismo reactor por lotes donde en la primera corrida: se utilizó 2 electrodos de aluminio y 1 electrodo de hierro y en la segunda corrida: se utilizó 1 electrodo de aluminio y 2 electrodos de hierro en ambas se tomó 3 muestras en intervalos de 5min pero con la misma corriente que se realizó en la primera prueba, para así ver si se produce sinergia en los electrodos y obtener mejores resultados.

Se desarrolló el diseño de equipos para la implementación del sistema, fijando las variables de operación determinadas en la parte experimental como densidad de corriente, tiempo de residencia, arreglo de los electrodos, dimensiones y distancias entre los electrodos, de manera que sean utilizados de manera óptima y obtener así la mayor eficiencia en el uso de la técnica de electrocoagulación.

Las muestras obtenidas en los experimentos fueron analizadas por el laboratorio N°20 de Química Aplicada de la Universidad Nacional de Ingeniería, en el laboratorio de AQA Química S.A., donde actualmente trabajo y por un laboratorio certificado por INACAL.

Con los resultados experimentales obtenidos de cada uno de los parámetros hay suficiente información del agua tratada para que cumpla el Decreto Supremo N°021-2015-Vivienda.

ABSTRACT

The purpose of this test is to opt for an alternative method for the use of environmentally friendly reagents for the treatment of non-domestic wastewater from the company GLORIA S.A., located in Huachipa that produces dairy products and their derivatives, since this company It discharges a high volume of daily effluent and looks for the possibility of being able to choose another method of treatment of their effluents. Why is it proposed to remove oil and grease from wastewater by the electrocoagulation method using aluminum electrodes.

This work was developed at the field and laboratory level where physical-chemical parameters measurement equipment was used. For the characterization of the effluent, simple daily samplings were carried out for 3 days, from the simple samples a standard sample was obtained, under environmental conditions of the zone in function of the turbidity.

In the result carried out in the batch reactor of 5 liters of capacity, aluminum electrodes, where 3 samples were taken in intervals of 5 minutes at 3 different current densities, to determine the value of the current that must be applied to obtain best results.

After the process, the average results of the physical parameters were: pH, varied from 7.07 to 8.01, sample temperature from 29 to 30.5 ° C, turbidity 357 NTU and total suspended solids (TSS) 32.2 mg / L. The chemical parameters had the following averages: chemical oxygen demand (COD) 974 mg / L.

We also performed 2 additional experimental runs in the same batch reactor where in the first run: 2 aluminum electrodes and 1 iron electrode were used and in the second run: 1 aluminum electrode and 2 iron electrodes were used in both took 3 samples at intervals of 5min but with the same current that was performed in the first test, to see if synergy occurs in the electrodes and obtain better results.

The design of equipment for the implementation of the system was developed, setting the operation variables determined in the experimental part as current density, residence time, arrangement of the electrodes, dimensions and distances between the electrodes, so that they are used in an optimal and obtain the highest efficiency in the use of the electrocoagulation technique.

The samples obtained in the experiments were analyzed by the Laboratory No. 20 of Applied Chemistry of the National University of Engineering, in the laboratory of AQA Química S.A., where I currently work and by a laboratory certified by INACAL.

Experimental results of each of the parameters, there is enough information on the water treated to comply with for Supreme Decree No. 021-2015-Housing.

PRÓLOGO.

El tratamiento de aguas residuales está cobrando gran importancia en nuestro país, ya que en los últimos años se han desarrollado numerosos sistemas de tratamiento de aguas residuales, dependiendo del origen y características de estas. Existen sistemas para el tratamiento de aguas residuales industriales que se adecúan de acuerdo al proceso de la empresa y los desechos producidos.

El sistema de tratamiento que se desarrolla en esta tesis lleva el nombre de “Remoción de aceites y grasas de un efluente industrial del sector láctico por electrocoagulación con electrodos de aluminio”. El tipo de aguas residuales a tratar con este sistema es de origen industrial.

El objetivo de la Tesis es determinar si este sistema de tratamiento de aguas residuales podrá remover aceites y grasas del efluente de la compañía GLORIA S.A, para luego ser descargadas al sistema de alcantarillado sanitario. En otras palabras de poder contar con un plan de manejo ambientalmente adecuado de sus aguas residuales.

El desarrollo de este trabajo aporta una alternativa más a los numerosos sistemas empleados para el tratamiento del agua residual No doméstica sanitaria y da a conocer los aspectos más importantes del proceso que se sigue en el tratamiento elegido.

El presente trabajo incorpora capítulos donde encontraremos el marco teórico del método de electrocoagulación como su descripción, alcance, ventajas y aplicaciones. En la parte final una lista bibliográfica de los libros, revistas y artículos utilizados, un apéndice documental de imágenes comentadas en el texto de la tesis y otro apéndice que responde a tablas con los parámetros del desarrollo experimental.

ÍNDICE DE CONTENIDO

ÍNDICE DE TABLAS.....	xiv
ÍNDICE DE FIGURAS	xvi
CAPÍTULO 1	18
EL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN	18
1.1. Antecedentes referenciales.....	18
1.2. Planteamiento de la realidad problemática.	22
1.3. Justificación de la investigación	26
1.4. Marco Legal.....	26
1.4.1 Constitución política	26
1.4.2 Legislación ambiental – ley general del ambiente	27
1.4.3 Relacionado al tratamiento de aguas residuales.....	27
1.4.4 Finalidad y obligatoriedad de tratar aguas residuales	27
1.4.5 Valores máximos admisibles – VMA	27
1.4.6 Normatividad internacional.....	28
1.5. Objetivos.....	29
1.5.1 Objetivos generales	29
1.5.2 Objetivos específicos.....	29
1.6. Formulación de hipótesis.....	29
CAPITULO 2	30
MARCO TEÓRICO	30
2.1. Industria láctea.....	30
2.2. Aguas residuales.	30
2.3. Caracterización del agua residual.	31
2.3.1 Físicas.....	32
2.3.2 Químicas.....	32
2.4. Coagulación química	32

2.5.	Historia de la electrocoagulación.....	33
2.6.	Electrocoagulación.....	34
2.6.1	Principios de la electrocoagulación.....	34
2.6.2	Teoría de la electrocoagulación.....	37
2.6.3	Alcance de la electrocoagulación.....	38
2.7.	Mecanismos en el proceso de electrocoagulación.....	39
2.8.	Reacciones involucradas en el proceso de electrocoagulación.....	40
2.9.	Factores que afectan la electrocoagulación.....	41
2.9.1	Densidad de corriente.....	42
2.9.2	Conductividad.....	42
2.9.3	Efectos del pH.....	43
2.9.4	Temperatura.....	44
2.9.5	Energía eléctrica.....	45
2.10.	Comparación de electrocoagulación y coagulación.....	45
2.11.	Ventajas de la electrocoagulación.....	45
2.12.	Comparación de electrocoagulación y tratamiento fisicoquímico.....	46
	A continuación de muestran las siguientes tablas:.....	46
2.13.	Aplicaciones de la electrocoagulación.....	47
2.14.	Lodo del proceso de electrocoagulación.....	48
2.15.	Coloides.....	49
2.15.1	Teoría de coloides.....	49
2.15.2	Clasificación de coloides.....	50
2.16.	Comparación de electrocoagulación y tratamiento biológico.....	50
	A continuación de muestran las siguientes tablas:.....	50
2.17.	Tecnología de la electrocoagulación.....	51
2.18.	Descripción de la electrocoagulación.....	52
2.19.	Diseño y operación de la electrocoagulación.....	55

2.20.	Influencia de los parámetros experimentales en el pH de la solución durante la electrólisis galvanostática con el uso de electrodos de aluminio.....	56
2.20.1	Influencia del pH inicial en el pH de la solución durante la electrólisis galvanostática con el uso de electrodos de aluminio.....	56
2.20.2	Influencia de la densidad de corriente en el pH de la solución durante la electrólisis galvanostática con el uso de electrodos de aluminio.	57
2.20.3	Efecto del electrolito en el pH de la solución durante la electrólisis galvanostática con el uso de electrodos de aluminio.....	58
2.21.	Estudio cinético.....	60
2.22.	Retos y oportunidades.	61
CAPITULO 3		62
METODOLOGÍA DEL TRABAJO.....		62
3.1.	Metodología experimental.....	62
3.2.	Diseño de la celda de electrocoagulación.....	62
3.3.	Materiales y equipos utilizados.....	63
3.4.	Reacciones ocurridas en el proceso.....	69
3.5.	Desarrollo de pruebas experimentales.....	69
3.6.	Proceso por lotes.....	70
3.6.1	Electrocoagulación con electrodos de Al.....	71
3.6.2	Electrocoagulación con electrodos de Al - Fe.....	71
3.7.	Resultados obtenidos.....	73
3.7.1	Caracterización del agua residual.....	73
3.8.	Resultados con electrodos de aluminio.....	76
3.8.1	Parámetro de turbiedad.....	76
3.8.2	Parámetro de aceites y grasas.....	77
3.8.3	Parámetro de DQO.....	79
3.8.4	Parámetro de sólidos suspendidos totales (SST).....	80

3.9. Variación del pH, conductividad y temperatura	82
3.9.1 Variación del pH	82
3.9.2 Variación de la conductividad.....	83
3.9.3 Variación de la temperatura.	85
3.10. Resultados con electrodos de aluminio y fierro	86
3.10.1 Segundo caso: 01 Al-02 Fe	86
3.10.2 Tercer caso: 02 Al-01 Fe.....	86
CAPÍTULO 4	100
EVALUACIÓN ECONÓMICA.....	100
4.1. Consumo de energía.....	100
ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	103
CONCLUSIONES.....	104
RECOMENDACIONES	105
GLOSARIO.....	106
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.	108
ANEXOS.....	110

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Valores Máximos Admisibles	28
Tabla 2 Parámetros Iniciales de la muestra	31
Tabla 3 Comparación entre EC y tratamiento fisicoquímico	46
Tabla 4 Comparación Técnico/Económica.....	47
Tabla 5 Comparación entre EC y tratamiento biológico	50
Tabla 6 Técnico/Económica	51
Tabla 7 Con electrodos de aluminio en el ánodo.....	71
Tabla 8 Con electrodos de 01 Al - 02 Fe en el ánodo	72
Tabla 9 Con electrodos de 02 Al - 01 Fe en el ánodo	72
Tabla 10 Valores iniciales de la muestra	74
Tabla 11 Remoción de la turbiedad en función del tiempo.....	76
Tabla 12 Remoción de Aceites y Grasas en función del tiempo.....	78
Tabla 13 Remoción de DQO en función del tiempo	79
Tabla 14 Remoción de SST en función del tiempo	81
Tabla 15 Variación del pH en función del tiempo.....	82
Tabla 16 Variación de la conductividad en función del tiempo	84
Tabla 17 Variación de la temperatura en función del tiempo.....	85
Tabla 18 Remoción de la turbiedad de la densidad de corriente óptima.....	87
Tabla 19 Remoción de Aceites-Grasas de la densidad de corriente óptima.....	88
Tabla 20 Remoción de DQO de la densidad de corriente óptima	89
Tabla 21 Remoción de SST de la densidad de corriente óptima.....	90
Tabla 22 Variación de pH de la densidad de corriente óptima.....	91
Tabla 23 Variación de Conductividad de la densidad de corriente óptima.....	92
Tabla 24 Masa Perdida de los electrodos	93

Tabla 25 Parámetros en evaluación económica ($J=59.83 \text{ A/m}^2$)	101
Tabla 26 Parámetros en evaluación económica ($J=68.38 \text{ A/m}^2$)	102
Tabla 27 Parámetros en evaluación económica ($J=76.92 \text{ A/m}^2$)	102

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Coagulación	33
Figura 2 Electrodisolución de un metal en la electrocoagulación	35
Figura 3 Esquema del Proceso de electrocoagulación.....	36
Figura 4.Sistema de EC con ánodo de aluminio y cátodo de fierro	38
Figura 5.Mecanismo de Electrocoagulación	40
Figura 6 Mecanismo de coagulación de partículas coloidales	49
Figura 7. Unidades de Electrocoagulación	52
Figura 8. Reactor con electrodos en conexión paralela	53
Figura 9. Reactor con electrodos en conexión serie*	54
Figura 10. Dimensiones de la celda para electrocoagulación.....	56
Figura 11. Distribución de especies de hidrólisis de aluminio en función del pH	59
Figura 12 Reactor Batch	64
Figura 13 Rectificador corriente continua	64
Figura 14 Conductímetro, marca: HACH.....	65
Figura 15 pHmetro, marca: HACH	65
Figura 16 Turbidímetro 2100P, marca: HACH	66
Figura 17 Bomba de vacío, marca: BOECO	66
Figura 18 Digestor, marca: Lovibond.....	67
Figura 19 Colorímetro medidor DQO MD200, marca: Lovibond	67
Figura 20 Balanza analítica, marca: BOECO	68
Figura 21 Horno, marca: FISHER	68
Figura 22 Toma de muestra del tanque ecualizador	75
Figura 23 Muestra de blanco en el reactor	75
Figura 24 Remoción de Turbiedad respecto al tiempo.....	77

Figura 25 Remoción de Aceites y Grasas respecto al tiempo	78
Figura 26 Remoción de DQO respecto al tiempo	80
Figura 27 Remoción de SST respecto al tiempo	81
Figura 28 Comportamiento del pH respecto al tiempo	83
Figura 29 Comportamiento de la Conductividad respecto al tiempo	84
Figura 30 Comportamiento de la Temperatura respecto al tiempo	86
Figura 31 Remoción de Turbiedad de la densidad de corriente óptima	87
Figura 32 Remoción de Aceites-Grasas de la densidad de corriente óptima	88
Figura 33 Remoción de DQO de la densidad de corriente óptima.....	89
Figura 34 Remoción de SST de la densidad de corriente óptima.....	90
Figura 35 Comportamiento del pH de la densidad de corriente óptima.....	91
Figura 36 Comportamiento de la Conductividad respecto al tiempo	92
Figura 37 Peso perdido en el proceso por lotes	93
Figura 38 Tanque Ecuilizador, Planta GLORIA-Huachipa.....	94
Figura 39 Tanque Primario (Coagulación-Floculación).....	94
Figura 40 Flotación por aire disuelto (DAF).....	95
Figura 41 Tanque Clorinador	95
Figura 42 Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR)-GLORIA.....	96
Figura 43 Muestra inicial antes del proceso de Electrocoagulación	96
Figura 44 Durante el proceso de Electrocoagulación.....	97
Figura 45 Vista frontal de remoción de aceites - grasas.....	97
Figura 46 Filtración de muestras obtenidas del reactor por lotes	98
Figura 47 Viales de análisis de DQO	98
Figura 48 Muestra inicial y final del proceso de electrocoagulación	99

CAPÍTULO 1

EL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

1.1. Antecedentes referenciales

En nuestros días, el agua se ha convertido en un elemento natural cada vez más importante, dado que en cierto modo hemos sobreexplotado los acuíferos y las represas ya no son suficientes para abastecer a la población; de ahí la importancia de reciclar el agua, sometiéndola a un tratamiento específico, para su reúso.

Los principales problemas en el tratamiento de aguas residuales aparecen con el vertido de efluentes industriales. Estos efluentes son generados en un volumen considerablemente inferior (dependiendo del grado de desarrollo de la población que los genere) al de los efluentes urbanos, pero la amenaza que constituyen para el *medio ambiente* es superior debido, normalmente, a la mayor concentración de contaminantes y a la mayor peligrosidad de cada uno de ellos, respecto a los contenidos en las aguas residuales urbanas. Especialmente interesante es el caso de los efluentes generados en las industrias químicas, petroquímicas o farmacéuticas, dado que parte de los mismos tienen asociadas elevadas cargas orgánicas no biodegradables (Cañizares, García, Lobato, & Rodrigo, 2004).

Los efluentes al descargar a cuerpos receptores deben seguir un proceso de operaciones unitarias, que tiene por finalidad remover contaminantes optimizando los recursos utilizados.

El reusar el agua ya tratada disminuye las demandas de volúmenes de las poblaciones hacia las fuentes de abastecimiento y, en algunas empresas, esto se refleja en la disminución de los costos de operación.

El reúso y recirculación son operaciones que hacen parte de las estrategias de manejo del agua. Sin embargo es necesario realizar tratamientos a los efluentes. Estos tratamientos deben ser adecuados para el propósito, tener una alta eficiencia, bajos costos y adicionalmente traer ventajas ambientales. Por consiguiente es importante desarrollar técnicas innovadoras que entren a competir técnica, económica y ambientalmente con las tecnologías tradicionales. Dentro de las tecnologías tradicionales se encuentran procesos biológicos y procesos físico-químicos.

El consumo descontrolado y los altos niveles de contaminación del agua, dan a investigar diversas tecnologías con el objetivo de reducir la carga orgánica e inorgánica que se encuentran presentes en los afluentes, la tecnología que estudiaremos es la electrocoagulación, que es un proceso donde se induce electricidad en el agua por medio de electrodos metálicos; en el cual las partículas que se están suspendidas, emulsionadas o disueltas en el medio son desestabilizadas (Chen, 2004).

Esta tecnología ha mostrado una alta eficiencia en la remoción de contaminantes; se han usado una gran variedad de geometrías en sus electrodos, las cuales han incluido placas, tubos entre otras. Igualmente, se han probado cátodos y ánodos de distintos materiales que se han seleccionado de acuerdo con la naturaleza de los contaminantes y del agua a tratar, los más utilizados han sido el hierro y el aluminio, dados a su alta disponibilidad y bajos costos.

En otras palabras la electrocoagulación es un proceso electroquímico que inicia en la disolución de un ánodo lo cual genera iones disueltos y se agrupan o juntan mediante enlaces electrostáticos con los contaminantes del afluente.

Cuando los ánodos se van corroyendo conforme el tiempo acontece, se debe realizar un mantenimiento y reponer los electrodos anódicos (Cañizares, García, Lobato, & Rodrigo, 2004).

En la industria láctea genera gran cantidad de agua residual en sus procesos, estos desechos líquidos son vertidos directamente a fuentes hídricas, sin ningún tratamiento previo. Para dar una solución a este problema, se estudió una técnica que permite el tratamiento de este tipo de aguas con alta carga orgánica, se la conoce como electrocoagulación (López & Harnisth, 2016).

La industria láctea representa una de las principales fuentes de contaminación de los recursos hídricos, ya que en sus procesos de producción se utiliza aproximadamente entre 1,3 - 3,2 litros de agua por kilogramo de leche recibida (López & Harnisth, 2016). Entre las operaciones que generalmente producen vertidos están: el lavado y esterilización de los depósitos, tanques, equipos de enfriamiento y suelos. Prácticamente el agua que se emplea en la elaboración de estos productos es para la limpieza de los utensilios y el área de trabajo (Nemerow & Dasgupta, 2009).

Del 90 al 95 % aproximadamente del DBO presente en las aguas residuales de la industria láctea, se debe a la pérdida de leche o productos lácteos en los procesos de elaboración. Los productos químicos limpiadores empleados en los procesos de lavado, se traducen en la presencia de *DQO* (López & Harnisth, 2016).

El propósito de este tema de investigación es proporcionar antecedentes sobre los avances que se han realizado sobre este método de tratamiento de aguas residuales. A continuación brindaremos algunos antecedentes en las diferentes industrias usando esta tecnología.

Los resultados obtenidos, en cuanto a porcentajes de remoción de contaminantes y efectividad del tratamiento, han sido muy alentadores; la electrocoagulación logra remover los contaminantes en el agua hasta en un 99%.

La remoción de aceites en aguas residuales de operaciones de limpieza y procesamiento de alimentos es generalmente entre 95 y 99% (Arango, 2012).

En una prueba piloto se realizó un tratamiento del efluente de la industria láctea; usando una celda de plexiglás, luego se seleccionaron parámetros los cuales algunos afectaron el proceso como el: pH, densidad de corriente y tiempo de tratamiento. La variable de respuesta fue el porcentaje de remoción de *DQO*. Adicionalmente, se realizó un seguimiento al pH y a la conductividad del proceso. Los mayores porcentajes de remoción de *DQO* se dieron para pH de 5, densidad de corriente de $43,23 A/m^3$ y 15 minutos de tratamiento; durante el proceso se observó un aumento del pH de hasta dos unidades y una disminución de la conductividad para pH ácido (Arango, 2012).

Se concluyó que el tratamiento por electrocoagulación de las aguas residuales de la industria láctea es más efectivo para pH inicial del agua de 5, una densidad de corriente eléctrica de $43,23 A/m^3$ y un tiempo de 15 minutos, en estas condiciones se remueve el 93,99 % de la DQO. Durante este proceso de electrocoagulación se presenta un aumento del pH de la solución acuosa, que va de 1.5 y 2 unidades. Adicionalmente, la conductividad del medio acuoso presenta una disminución durante todo el tratamiento a estas condiciones (Arango, 2012).

Se aplicó la electrocoagulación de un afluente que proviene del proceso de deshidratación del lodo de perforación de un pozo, por un proceso por lotes usando electrodos de aluminio con el fin de remover aluminio, bario, SST y turbiedad.

Los análisis por ICP a $222 A/m^2$ y 30 min, indican una remoción de 87,86% Al y 99,41% Ba, 99% SST y 93,40% turbidez. En todos los casos, el nivel de pH se mantuvo en un rango de 7,5 a 8,5. Los niveles de remoción alcanzados mediante este proceso permiten que el efluente cumpla con la norma peruana para la descarga de este tipo de efluente (Reátegui, Florencio, & King, 2015)

Aplicando esta tecnología a un efluente industrial con alto contenido de metales pesados (Cr, Pb, Mo, Zn, Fe, Ni, Tl, B, At, Cu, P, Sb, Ti, V), se empleó electrodos de hierro y aluminio en una planta productora de sulfatos de cinc y magnesio. La densidad de corriente empleada varió en un rango de 200 a $500 A/m^2$.

Los análisis mediante la espectrometría de masas con plasma de acoplamiento inductivo (ICP) muestran que el efluente contiene 32 metales y los niveles de remoción alcanzados para el Cr, Pb, Mo, Zn, Fe, Ni, Tl fueron de 99%, y del 80% para el At, Cu, P, Sb, Ti, V. El pH inicial de la muestra fue de 1, y al final del proceso se mantuvo en un rango entre 8 a 9. El nivel inicial de turbidez fue de 36 Unidades Nefelométricas de Turbiedad (NTU), y descendió en un 99% (Reátegui & Westres, 2013).

El consumo del ánodo fue de $0,05 g/g$ metal removido. Los resultados obtenidos indican que es posible aplicar ésta técnica a efluentes con grandes cantidades de metales pesados (Reátegui & Westres, 2013).

Del proceso por lotes se puede afirmar que cuando se utilizan electrodos de aluminio se consigue un porcentaje de remoción de metales pesados igual a 90%. Del proceso en flujo continuo utilizando primero electrodos de Fe, seguido por electrodos de Al, se alcanzó una remoción del 99% (Reátegui & Westres, 2013).

El objetivo de esta investigación fue el diseño de un proceso de electrocoagulación para el tratamiento de aguas residuales de la industria láctea. Mediante la determinación de los parámetros de operación en cuanto al tiempo, corriente, voltaje y número de placas. Para finalmente evaluar la eficiencia del proceso en la remoción de aceites y grasas, la demanda química de oxígeno (DQO), la turbiedad (NTU) y los sólidos suspendidos totales (SST); y así determinar el sistema óptimo de operación.

1.2. Planteamiento de la realidad problemática.

Uno de los principales desafíos que enfrenta la humanidad hoy en día es el de proporcionar agua limpia a una amplia mayoría de la población en todo el mundo. La necesidad de agua potable es particularmente crítico en países del tercer mundo. Ríos, canales, estuarios y otros cuerpos de agua están siendo constantemente contaminados debido a la descarga indiscriminada de efluentes industriales, así como otras actividades antropogénicas y procesos naturales (Yousuf, Schennach, Parga, & Cocke, 2001).

La contaminación del agua es uno de los problemas globales de mayor importancia. Una de las fuentes de contaminación son las descargas de aguas residuales a cauces naturales.

Cuando los ríos u otros cursos de agua reciben descargas de aguas servidas urbanas o efluentes de origen industrial, comienza el problema de contaminación o degradación de la calidad del cuerpo receptor, es decir disminuye la calidad del agua del curso, la hace menos útil y modifica su condición de elemento beneficioso para la salud, convirtiéndola en factor de amenaza para la misma.

En general, podemos decir que los problemas de contaminación por efluentes industriales se agravan por:

- Falta de tratamiento de los efluentes finales frente a las condiciones del cuerpo receptor.
- El gran desarrollo industrial acrecienta el efecto de la contaminación generando un mayor impacto ambiental. Hay tendencia al agrupamiento de industrias (parques industriales).
- Por otra parte, la continua variación tecnológica de los complejos industriales generan efluentes más complejos y de mayor poder de contaminación.
- Falta de planes reguladores para el establecimiento de industrias.

En los países en desarrollo un 70% de los desechos industriales se vierten al agua sin tratamiento alguno, contaminando así el agua disponible y más del 80% de los desechos peligrosos del mundo son producidos en los países *industrializados* (Restrepo, Arango, & Garcés, 2006).

Conforme a las exigencias de tipo ambiental que se han establecido en el Perú, que las diferentes industrias se han visto en la necesidad de darle un tratamiento adecuado a sus aguas residuales, así como a los lodos producidos por las mismas. Por lo tanto es necesario estudiar detenidamente el efluente a tratar para establecer los pasos a seguir en el cumplimiento de la Norma y Legislación vigente.

En este trabajo de investigación específico nos referiremos exclusivamente a la Industria Láctea, ya que los efluentes que se descargan serán el objetivo de nuestro análisis. Los vertidos de estas industrias son de composición variable, según su origen. Los procesos de pasteurización y envasado de la leche solo vierten agua de lavado que corresponden a una leche muy diluida pero pueden apreciarse algunas puntas muy ácidas o alcalinas debido al empleo de ácido nítrico o sosa para limpieza de los aparatos utilizados en el proceso de elaboración.

Para estos efluentes se deben determinar DBO5, DQO, Sólidos suspendidos Totales, pH, aceites y grasas; los cuales deberán cumplir con la Legislación ambiental y de descarga de efluentes que establece los Valores Máximos Admisibles (VMA), disposiciones y prohibiciones para descarga de aguas residuales No domésticas al alcantarillado sanitario.

La industria láctea genera gran cantidad de agua residual en sus procesos lo cual en las empresas de productos lácticos en nuestro país se ha detectado en su agua residual la presencia de una alta concentración de aceites y grasas, también alta carga orgánica por lo cual no puede ser descargado directamente a ningún cuerpo receptor pues produciría daños irreparables en el ecosistema. Se plantea en esta investigación hacer la remoción de dichos componentes empleando electrocoagulación con electrodos de aluminio.

Este trabajo lo desarrollaré en el laboratorio N°20 de Química Aplicada de la Universidad Nacional de Ingeniería, en el laboratorio de AQA Química donde actualmente trabajo y se va prescindir de los servicios de un laboratorio certificado por INACAL.

Para dar una solución a este problema, se estudió una técnica que permite el tratamiento de este tipo de aguas con alta carga orgánica, se la conoce como electrocoagulación. Para llevar a cabo el proceso de electrocoagulación se determinó factores que son: tiempo de residencia, número de placas del electrocoagulador, amperaje y voltaje del sistema (López & Harnisth, 2016).

La principal aplicación de la coagulación asistida electroquímicamente en el tratamiento de residuos líquidos es la eliminación de la materia orgánica coloidal y de las grasas presentes en algunos efluentes industriales, tales como los procedentes de las limpiezas de cisternas, sector lácteo, etc (Cañizares, García, Lobato, & Rodrigo, 2004).

En un proceso electrolítico, una fuente de corriente directa es conectada a un par de electrodos inmersos en un líquido que actúa como electrólito. La base de la electrocoagulación es la formación en el mismo lugar de una especie coagulante que puede remover contaminantes del agua y agua residual que está siendo tratado.

Se cree que las especies coagulantes son las responsables de la agregación, así como de la precipitación de partículas suspendidas y, simultáneamente, de la adsorción de disolventes contaminantes del agua y agua residual que está siendo tratado (Reátegui & Westres, 2013).

Hay tres mecanismos en el proceso total de electrocoagulación - electroflotación, que son oxidación del ánodo, desprendimiento de burbujas de gas hidrógeno en el cátodo, y sedimentación o flotación de flóculos formados (Reátegui & Westres, 2013).

Los materiales de electrodos más ampliamente usados en procesos de electrocoagulación son el aluminio (Al) y el hierro (Fe) (Reátegui & Westres, 2013).

El objetivo de esta investigación fue el diseño de un proceso de electrocoagulación para el tratamiento de aguas residuales de la industria láctea. Se empezó por realizar el muestreo de agua, para luego conocer la composición de la misma es decir su caracterización del agua residual. Los diferentes tratamientos del diseño experimental, se realizaron en un electrocoagulador a escala laboratorio, donde se trataron 5 litros de agua residual.

El orden de los experimentos llevados a cabo se realizó completamente al azar, con la interacción de los factores estudiados con cada uno de sus niveles de estudio. Para el presente estudio se tomó como base tres factores de operación: tiempo de reacción, amperaje y voltaje. La variable de respuesta fue la disminución de la turbiedad del agua tratada, tomando como referencia la turbiedad del agua residual.

Para finalmente evaluar la eficiencia del proceso como principal objetivo la remoción de aceites y grasas, luego como parámetros secundarios, la demanda química de oxígeno (DQO), sólidos suspendidos totales (SST), turbiedad (NTU), pH y conductividad eléctrica (us/cm); y así determinar los parámetros óptimos de operación.

Lo cual nos entregó resultados del proceso ya que por medio de estos resultados se seleccionó la corriente óptima. Luego se realizó una evaluación económica de la energía eléctrica utilizada.

Se debe obtener una solución sostenible ecológicamente a través de la reutilización del agua y de la disposición de los residuos al final del proceso. Por esto las industrias al generar efluentes líquidos que deben ser tratados para cumplir con las Normas y Leyes Nacionales e Internacionales con la finalidad de desecharlas y minimizar el impacto ambiental en el cuerpo receptor y así poder tener una mejor conciencia ambiental.

1.3. Justificación de la investigación

Debido a que el agua residual de una industria láctea posee una carga orgánica elevada nos hemos visto en la necesidad de plantear una alternativa para solucionar el problema de las descargas de agua de este tipo de industria.

Este estudio abarca la remoción de aceites y grasas del agua residual de la compañía GLORIA S.A., que se descarga al alcantarillado sanitario para luego verterlo en el río Huaycoloro. Tenemos previsto determinar los respectivos tiempos de residencia y la cantidad de corriente suministrada en el proceso como también las condiciones adecuadas y parámetros de operación para un buen funcionamiento del método de electrocoagulación con electrodos de aluminio.

Nuestra investigación va a ser realizada en el laboratorio N°21 de Química Aplicada de la Facultad de Ingeniería Química y Textil también en el laboratorio de AQA QUÍMICA S.A., actualmente donde realizo mis actividades laborales donde utilizaremos los equipos de medición necesarios para realizar dicho tratamiento y finalmente se va prescindir de los servicios de un laboratorio certificado por INACAL.

1.4. Marco Legal

1.4.1 Constitución política

La norma legal de mayor jerarquía del Perú es la constitución política (1993), que resalta entre los derechos esenciales de la persona humana, el derecho de gozar de un ambiente equilibrado y adecuado al desarrollo de la vida. Igualmente, en el título III del régimen económico, capítulo II del ambiente y los recursos naturales renovables y no renovables, son patrimonio de la nación, y mediante ley orgánica se fija las condiciones de su utilización y de su otorgamiento a particulares. Así mismo, promueve el uso sostenible de los recursos naturales. También menciona que el estado está obligado a promover la conservación de la diversidad biológica y de las áreas naturales protegidas.

1.4.2 Legislación ambiental – ley general del ambiente

La ley general del ambiente, ley N° 28611, fue aprobada el 13 de octubre del 2005, por el Congreso de la república. La norma establece los principios y normas básicas para asegurar el efectivo ejercicio del derecho a un ambiente saludable, equilibrado y adecuada para el pleno desarrollo de la vida. Asegura así mismo el cumplimiento del deber a contribuir a un efectivo gestión ambiental y de proteger el ambiente, lo mismo que sus componentes, con el objetivo de mejorar la calidad de vida de la población y lograr el desarrollo sostenible del país.

1.4.3 Relacionado al tratamiento de aguas residuales

Establece que la Ley General de Aguas, en su artículo 22°, dicta que prohíbe la descarga de cualquier afluente que contamine los cuerpos receptores y atente contra la salud humana o ponga en peligro la ecología. Estos afluentes deben ser tratados antes de su descarga.

1.4.4 Finalidad y obligatoriedad de tratar aguas residuales

El efluente de la Compañía del sector lácteo se rige bajo el Decreto Supremo N° 001-2015-Vivienda, que los efluentes descargados son supervisados por SEDAPAL para no dañar los sistemas de tubería de alcantarillado. Se controlan a través de los Valores Máximos Admisibles de acuerdo al Decreto Supremo mencionado.

1.4.5 Valores máximos admisibles – VMA

Son concentraciones de parámetros físicoquímicos, que determina a un efluente No doméstico que va a ser descargado al alcantarillado, y de sobrepasar estas concentraciones, dañaría a las instalaciones de tuberías.

Tabla 1
Cuadro referencial de VMA

Parámetro	Unidad	VMA para descargas al sistema de alcantarillado
Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO)	mg/L	500
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	mg/L	1000
Sólidos Suspendidos Totales (SST)	mg/L	500
Aceites y Grasas (A y G)	mg/L	100

Nota: D.S. N° 001-2015-Vivienda

1.4.6 Normatividad internacional

El tratamiento de aguas residuales ha empezado a centrarse en los problemas de salud pública relacionados con la descarga al medio ambiente de contaminantes químicos y biológicos, causando impactos medioambientales producidos por los vertidos de aguas residuales. Por esta razón se ha hecho necesaria la implementación de legislaciones estrictas que establezcan parámetros que se ajusten a las condiciones locales, teniendo en cuenta los factores epidemiológicos, socioculturales y ambientales; con el fin de los países puedan promulgar una legislación racional para controlar el aprovechamiento de las aguas residuales. Algunas legislaciones sobre aguas residuales.

Acuerdo Europeo sobre limitación del empleo de ciertos detergentes en los productos de lavado y limpieza, hecho en Estrasburgo el 16 de Septiembre de 1968 (Instrumento de ratificación de 29 de Julio de 1975) y Protocolo de Enmienda de 25 de Octubre de 1983 (Instrumento de ratificación de 13 de Noviembre de 1987).

1.5. Objetivos

Tiene el propósito de verificar que la electrocoagulación es un método que puede tratar aguas residuales del sector lácteo sin necesidad de adicionar reactivos en otras palabras es una técnica amigable con el medio ambiente y No causaría un gran impacto ambiental.

1.5.1 Objetivos generales

El objetivo de este tema de investigación es reducir el nivel de aceites y grasas del efluente proveniente del sector lácteo mediante electrocoagulación y que cumplan con los VMA (Valores Máximos Admisibles) del Decreto Supremo N° 001 - 2015 – Vivienda.

1.5.2 Objetivos específicos

Con la finalidad de satisfacer el objetivo general, se plantea estos objetivos.

- Definir los Parámetros de operación del proceso de electrocoagulación usando electrodos de aluminio.
- Cuantificar el nivel de reducción de aceites y grasas durante el proceso de electrocoagulación.
- Evaluar la inversión de energía eléctrica en la reducción de aceites y grasas empleando electrocoagulación con electrodos de aluminio.

1.6. Formulación de hipótesis.

Es posible reducir el nivel de aceites y grasas presentes en el efluente del sector lácteo mediante el método de electrocoagulación usando electrodos de aluminio.

CAPITULO 2

MARCO TEÓRICO

2.1. Industria láctea

La industria láctea, dedicada a la producción de leche y a la elaboración de quesos, yogures y mantequillas entre otros productos, genera una gran cantidad de agua residual. Actualmente, en la producción de leche, la generación de aguas residuales se estima de promedio entre 1 y 2 litros por litro de leche producida. Las aguas residuales se generan por fugas y derrames de materias primas, en las limpiezas de los equipos de proceso (tanques, pasteurizadores, tinas de cuajo, etc.), en el lavado de superficies (suelos y paredes) y en el vertido de las salmueras agotadas.

Las aguas residuales de la industria láctea se caracterizan por poseer una gran cantidad de materia orgánica, además de sólidos en suspensión y valores de pH que se salen de los rangos admisibles.

La electrocoagulación se presenta como alternativa de tratamiento para estas aguas residuales, considerando que ofrece varias ventajas respecto a las tecnologías tradicionales.

2.2. Aguas residuales.

Los efluentes de industrias lácteas se caracterizan por tener una elevada cantidad de aceites y grasas, carga orgánica, sólidos suspendidos y disueltos; así como también color y olor característico al de los productos que fabrican. Los caudales y la composición de los vertidos residuales de estas industrias varían mucho en función a las condiciones de fabricación; tales como: pérdidas de leche, mezclas de agua de refrigeración, tratamiento de la leche de forma adecuada.

2.3. Caracterización del agua residual.

En la caracterización del efluente a tratar es proveniente de la Compañía GLORIA S.A. pueden ser clasificados como físicos, químicos y biológicos. Entre los análisis que se realizan son los siguientes.

Tabla 2
Parámetros Iniciales de la muestra

PARÁMETRO	UNIDAD	RESULTADO
pH	----	7.07
Demandas Química de Oxígeno (DQO)	mg/L	2860
Sólidos Suspendidos Totales (SST)	mg/L	338.3
Aceites y Grasas (A y G)	mg/L	172.7
Conductividad	Us/cm	1384
Turbiedad	NTU	2274

Nota: Laboratorio UNI-AQA Química-Envirotest

2.3.1 Físicas

Entre las principales características físicas del agua residual son su contenido de sólidos, turbiedad, color, olor, temperatura, densidad y conductividad. Para efectuar estos análisis y conseguir que los resultados sean representativos.

2.3.2 Químicas

La caracterización química del agua residual son los parámetros como: pH, DQO, aceites y grasas, con lo cual se hacen mediciones para estimar la capacidad de reutilización de aguas residuales tratadas o verterlas al alcantarillado.

2.4. Coagulación química

La coagulación es un proceso químico en el que mediante la adición de reactivos se consigue desestabilizar los coloides presentes en un agua de abastecimiento o residual. En este tipo de aguas, la materia coloidal está estabilizada por las fuerzas de repulsión electrostática, que impiden la unión de las partículas para formar agrupaciones de mayor tamaño (no coloidales). El objetivo de la coagulación es agrupar estas partículas coloidales mediante la minimización de las fuerzas electrostáticas de repulsión. Este fenómeno se puede conseguir por distintos mecanismos entre los que están la compresión de la doble carga eléctrica, la neutralización de cargas en la superficie de las partículas o la inmersión de las partículas coloidales en un precipitado (Cañizares, García, Lobato, & Rodrigo, 2004).

En otras palabras, la coagulación química convencional consiste en la dosificación directa de una solución coagulante al agua residual con el fin de reducir las fuerzas eléctricas de repulsión que inhiben la agregación de partículas. En el proceso de coagulación química, la adición de hidrolizantes de sales metálicas (de Fe^{3+} o Al^{3+}) como reactivos coagulantes es típica (Cañizares, Jiménez, Lobato, Martínez, & Rodrigo, 2007).

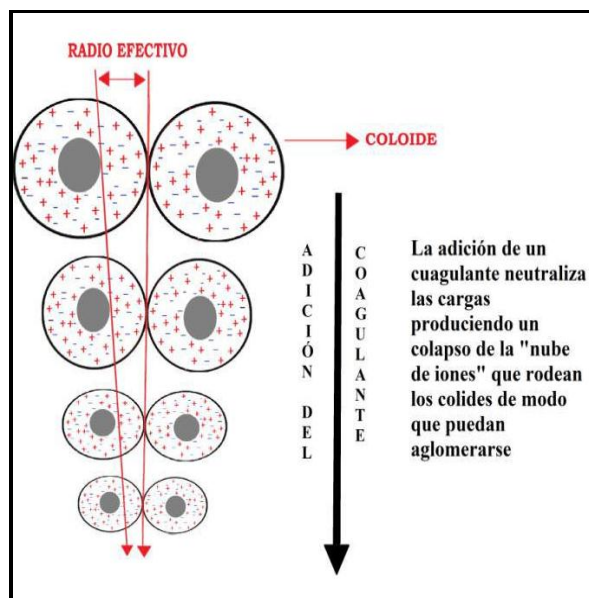


Figura 1. Coagulación

Nota: (Andía, 2000). Tratamiento de agua: Coagulación-Floculación

El coagulante se añade en forma de sustancias químicas adecuadas. Alumbre $[Al_2(SO_4)_3 \cdot 18H_2O]$ es una sustancia química tal que ha sido ampliamente utilizado para las edades para el tratamiento de aguas residuales.

La coagulación química implica el uso de alumbre (sulfato de aluminio), cloruro férrico ($FeCl_3$), o sulfato ferroso (Fe_2SO_4) que puede ser muy caro, dependiendo del volumen de agua tratada. Al aplicar el coagulante, el coagulante realiza una función similar a los electrodos, neutralizar la carga de las partículas, con lo que permite que se aglomeran y se depositen en el fondo del tanque (Butler, Yung-Tse, Yu-Li, & Al Ahmad, 2011).

2.5. Historia de la electrocoagulación

La electrocoagulación ha sido una tecnología que nace en 1906, en Estados Unidos. Se originaron caídas y atrasos de esta tecnología debido a la financiación. En el año 1888 en Londres, se ejecutó esta tecnología lo cual el proceso utilizaba ánodos de hierro soluble, con

una densidad de corriente de $6.45 A/m^2$, un voltaje de 1.8 vatios y una distancia de 2.54 cm entre los electrodos (Restrepo, Arango, & Garcés, 2006).

Con el cada vez mayor nivel de abastecimiento de agua potable y las estrictas regulaciones ambientales respecto la descarga de aguas residuales, tecnologías electroquímicas han recuperado su importancia en todo el mundo durante las últimas dos décadas. Hay empresas que suministran instalaciones para la recuperación de metales, para el tratamiento de agua potable o agua de proceso, el tratamiento de diversas aguas residuales resultante de la curtiembre, galvanoplastia, tratamiento de los textiles, el aceite y emulsión de aceite en agua, etc. Hoy en día, tecnologías electroquímicas han alcanzado tales un estado que no sólo son comparables con otras tecnologías en términos de coste, sino también son más eficientes y más compacto (Chen, 2004).

2.6. Electrocoagulación

La electrocoagulación es una tecnología utilizada para el tratamiento de efluentes, mediante el cual no necesita añadir insumos químicos o consumibles sólo se aplica corriente eléctrica al agua (Restrepo, Arango, & Garcés, 2006).

2.6.1 Principios de la electrocoagulación

La Electrocoagulación implica la generación de coagulantes in situ disolviendo eléctricamente ya sea de iones de aluminio o iones de hierro desde electrodos de aluminio o de hierro, respectivamente. La generación iones metálicos tiene lugar en el ánodo; gas de hidrógeno se libera del cátodo. El gas de hidrógeno también ayudaría a flote las partículas floculadas fuera del agua. Este proceso a veces se llama electrofloculación. Los electrodos pueden estar dispuestos en un modo monopolar o bipolar. Los materiales pueden ser de aluminio o de hierro en forma de placa o forma de embalado tales como virutas de acero, fresados (Chen, 2004).

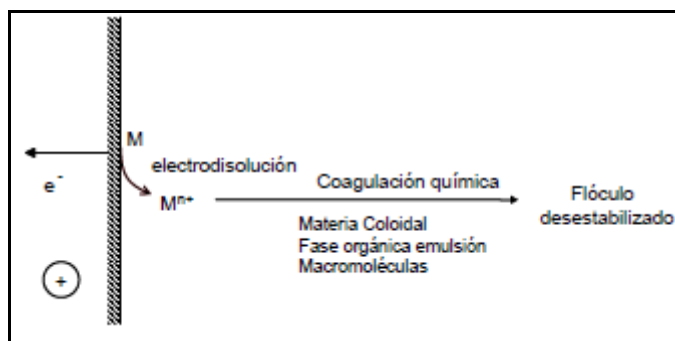


Figura 2. Electrodisolución de un metal en la electrocoagulación

Nota: (Martinez, 2008). Tratamiento de aguas residuales industriales mediante electrocoagulación y coagulación convencional

En este proceso se originan tres etapas: se oxida el ánodo y forma un coagulante, después se desestabiliza los contaminantes y finalmente por adsorción entre el contaminante y el coagulante se genera la formación de flóculos para ser finalmente removidos (Yousuf, Schennach, Parga, & Cocke, 2001).

La eficiencia del proceso de electrocoagulación en el tratamiento de aguas residuales depende en gran medida de la cantidad y especiación de aluminio disuelto durante el proceso de tratamiento electroquímico. Con el fin de evaluar la disolución de aluminio durante la electrólisis, se midió la cantidad de aluminio disuelto (Mexp) para luego compara con la cantidad teórica calculada esperada que sea disuelto usando la ley de Faraday (Mansouri, Ibrik, & Abdel-Wahab, 2011).

Ya que la pasividad de electrodos de sacrificio de aluminio son muy problemáticos para el tratamiento de efluentes industriales por electrocoagulación. Películas pasivas se forman fácilmente en la superficie de aluminio y sus aleaciones en aire libre y en el agua. La resistencia a la corrosión de aluminio depende en gran medida de la formación de una película de óxido nativo en su superficie. La película de óxido de aluminio es relativamente inerte químicamente, exhibiendo el comportamiento pasivo de aluminio. La formación de esta película pasiva que se adhiere a la superficie del ánodo impide la disolución de aluminio y restringe la transferencia de carga entre la solución y los electrodos. La pasivación de los ánodos de sacrificio conduce a un consumo excesivo de energía eléctrica y reduce la eficiencia

del tratamiento de aguas residuales por electrocoagulación (Mansouri, Ibrik, & Abdel-Wahab, 2011).

La velocidad de corrosión de los ánodos de sacrificio de aluminio depende principalmente de dos mecanismos: la formación y la acumulación de una capa de óxido de aluminio pasiva y destrucción parcial posterior de esa capa a través de picaduras.

El aluminio es mucho más susceptible a las picaduras que otros metales, y una variedad de aniones que puede existir en la solución puede producir picaduras. En los casos más prácticos de la corrosión del aluminio, la reacción química de aniones adsorbidos en la superficie de la película de óxido de aluminio con catiónico. Todas las especies en la red de óxido afectan de manera significativa la reacción global de disolución de aluminio. Esta reacción química produce la descomposición local de la película de óxido pasa, que a menudo es seguido por la corrosión por picadura (Mansouri, Ibrik, & Abdel-Wahab, 2011).

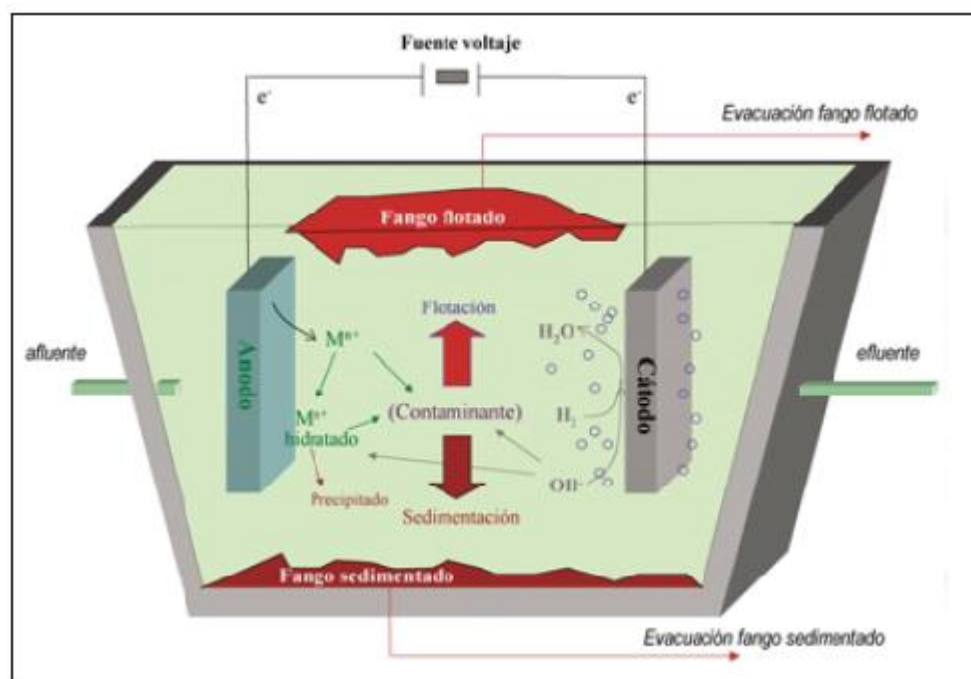


Figura 3. Esquema del Proceso de electrocoagulación

Nota: (Cañizares, García, Lobato, & Rodrigo, 2004). El tratamiento electroquímico de la depuración de efluentes industriales líquidos

2.6.2 Teoría de la electrocoagulación

Electrocoagulación es un proceso que aplica corriente eléctrica para tratar y flocular contaminantes sin tener que añadir reactivos químicos. La coagulación se produce con la corriente que se aplica, capaz de eliminar las partículas pequeñas ya que la corriente continua aplicada, poniéndolos en movimiento. También podría reducir la electrocoagulación de residuos para la producción de residuos (Butler, Yung-Tse, Yu-Li, & Al Ahmad, 2011).

La electrocoagulación se compone de pares de hojas de metal llamados electrodos, que están dispuestos en pares de ánodos y cátodos. Utilizando los principios de la electroquímica, se oxida el ánodo (pierde electrones), mientras que en el cátodo el agua se reduce (gana electrones), con lo que el agua residual se trata mejor. Cuando el electrodo de cátodo entra en contacto con las aguas residuales, el metal se emite en el aparato (Butler, Yung-Tse, Yu-Li, & Al Ahmad, 2011).

Cuando esto sucede, las partículas son neutralizadas por la formación de complejos de hidróxido con el fin de formar aglomerados. Estos aglomerados se empiezan a formar en la parte inferior del tanque y se pueden pasar por un sifón a través de filtración.

Sin embargo, si se considera un aparato de electrocoagulación-flotación, las partículas tendrían lugar a flotar en la parte superior del tanque por medio de burbujas de hidrógeno formados que se crean desde el ánodo. Las partículas que flotan pueden desnatarse por la parte superior del tanque (Butler, Yung-Tse, Yu-Li, & Al Ahmad, 2011).

Para tener en cuenta la eficacia del reactor EC, hay que considerar las siguientes entradas o tipo de variables a las aguas residuales, el pH, la densidad de corriente, el tipo de electrodos de metal (aluminio, acero, hierro), número de electrodos, el tamaño de los electrodos, y la configuración de metales. Estas variables afectarían al tiempo total de tratamiento, la cinética, y también la eficiencia de remoción medido (Butler, Yung-Tse, Yu-Li, & Al Ahmad, 2011).

La electrocoagulación es capaz de reducir la producción de residuos de tratamiento de aguas residuales y también reduce el tiempo necesario para el tratamiento (Butler, Yung-Tse, Yu-Li, & Al Ahmad, 2011).

2.6.3 Alcance de la electrocoagulación

En la electrocoagulación, se producen una secuencia de reacciones en los electrodos que se manifiestan por medio de unos sucesos fisicoquímicos. El electrodo anódico también genera iones metálicos disueltos, a través de la disolución del mismo. Estos iones generados desestabilizan a los contaminantes presentes en el agua por medio de fuerzas electrostáticas, ya que estos contaminantes tienen por lo general carga negativa y se atraen con los iones disueltos de carga positiva para finalmente neutralizarse. Al neutralizarse, se inicia la coagulación formándose los conocidos flóculos (Restrepo, Arango, & Garcés, 2006).

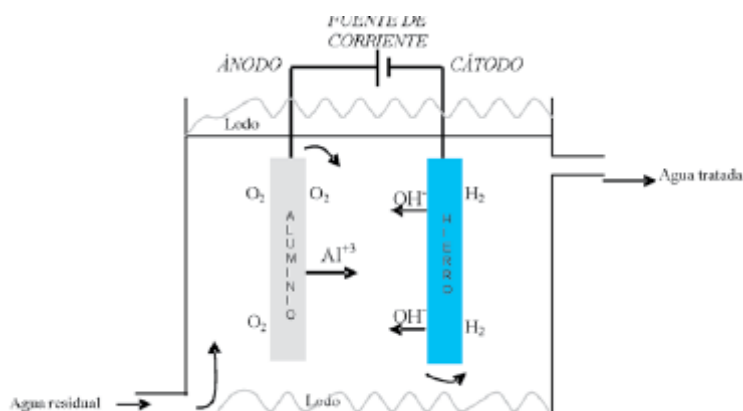


Figura 4. Sistema de EC con ánodo de aluminio y cátodo de hierro

Nota: (Restrepo, Arango, & Garcés, 2006). La Electrocoagulación: retos y oportunidades en el tratamiento de aguas

Se realizó un diseño una celda de electrocoagulación para analizar a los distintos parámetros que afectan en el proceso. Se estudió aspectos como: intensidad de corriente, diferencia de tensión (voltaje), tipo de materiales de la celda y electrodos utilizados.

Se desea obtener información sobre el comportamiento a la corrosión de los ánodos de sacrificio de aluminio y de evaluar los efectos de la naturaleza y la concentración de electrolito, el pH y la densidad de corriente en la disolución electroquímica de aluminio. Para luego cumplir el objetivo de remover aceites y grasas del agua residual estudiada.

Es necesario continuar con los estudios propuestos en esta línea de investigación para consolidar procesos y variables, necesarios para optimizar la técnica de electrocoagulación como tratamiento de vertimientos líquidos, no sólo de la industria galvánica, sino de otras industrias que generen metales y otras sustancias disueltas para ser recuperadas o para liberar los cuerpos de agua, de estos contaminantes.

2.7. Mecanismos en el proceso de electrocoagulación

Durante la electrocoagulación sucede tres etapas sucesivas: oxidación del ánodo que genera coagulantes, desestabilización de las partículas de los contaminantes del efluente y la formación de flóculos.

Este mecanismo se describe a continuación (Yousuf, Schennach, Parga, & Cocke, 2001).

1. Debido a la corriente inducida en la solución se produce iones disueltos por la oxidación de los ánodos lo cual rodean a los contaminantes.

2. Los iones disueltos neutralizan las cargas de los contaminantes por fuerzas electrostáticas (Van Der Walls), aglomerando a los coloides (coagulación), para luego formar flóculos.

3. La coagulación genera los flóculos que se adhieren en los coloides (Yousuf, Schennach, Parga, & Cocke, 2001).

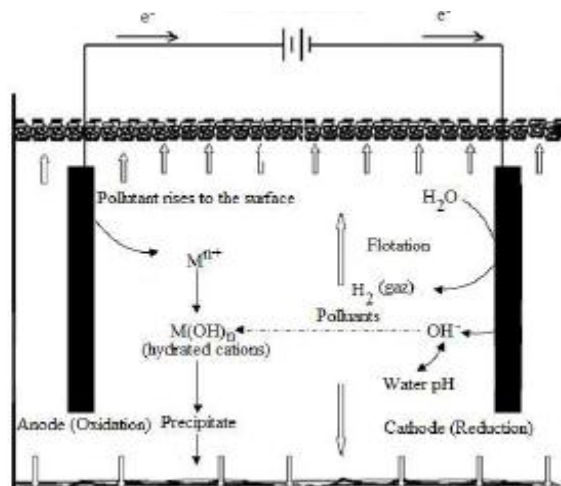


Figura 5. Mecanismo de Electrocoagulación

Nota: (Lekhlif, Oudrhiri, Zidane, Drogui, & Blais F, 2014). Estudio de la electrocoagulación de aguas residuales industriales de galvanoplastia cargadas de níquel (II) y cromo (VI)

2.8. Reacciones involucradas en el proceso de electrocoagulación

En el proceso de la EC, el coagulante se genera in situ mediante la oxidación electrolytica de un material de ánodo adecuado.

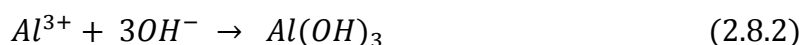
En este proceso, especies iónicas cargadas en metales o de otra manera se retiran de las aguas residuales por lo que le permite reaccionar con un ion con carga opuesta, o con flóculos de hidróxidos metálicos generados en el efluente (Yousuf, Schennach, Parga, & Cocke, 2001).

Las reacciones involucradas son las siguientes.

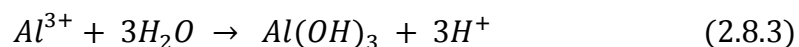
Para ánodo de aluminio:



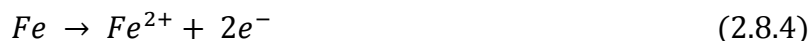
En condiciones alcalinas:



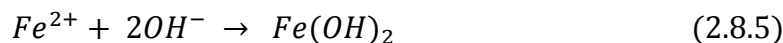
En condiciones ácidas:



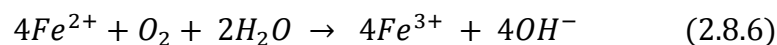
Para ánodo de Hierro:



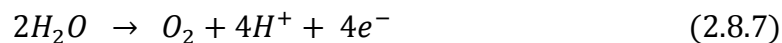
En condiciones alcalinas:



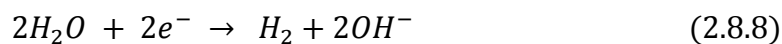
En condiciones ácidas:



En adición, hay una reacción de oxígeno liberado:



La reacción en el cátodo es:



Los nacientes iones Al^{3+} o Fe^{2+} son coagulantes muy eficientes para las partículas de floculación.

Por lo general, para el tratamiento de aguas residuales se emplea el electrodo de hierro mientras que para el tratamiento de aguas se emplea electrodos de aluminio. Las ventajas de la EC incluyen alta eficiencia de remoción de partículas, instalación de tratamiento compacta, relativamente bajo costo y posibilidad de automatización completa (Chen, 2004).

2.9. Factores que afectan la electrocoagulación

Durante la electrocoagulación, existen parámetros que afectan el proceso como el pH del efluente, temperatura, densidad de corriente, voltaje y la conductividad. Ya que determinan y examinan las reacciones ocurridas en el proceso.

2.9.1 Densidad de corriente

En la electrocoagulación, cuando se utiliza corriente demasiado grande, hay una alta probabilidad de perder la energía eléctrica en el calentamiento del agua. Por lo tanto, una densidad de corriente demasiado grande daría lugar a una disminución significativa en eficiencia de corriente. La corriente inducida que se aplica a los electrodos determina la cantidad iones (Al^{3+} o Fe^{2+}). Para garantizar una alta eficiencia de corriente debe seleccionarse la densidad de corriente y conjugarse con otros parámetros que afectan el proceso mencionados anteriormente (Chen, 2004).

El eficiencia de corriente para el electrodo de aluminio es aproximadamente de 120 a 140 %, mientras que para el hierro es de alrededor de 100 %. La eficiencia de corriente depende de la densidad de corriente, así como los tipos de los aniones (Chen, 2004).

La densidad de corriente se puede determinar experimentalmente. Si ya no se llega a remover más contaminantes durante el proceso quiere decir que se llegó a la densidad de corriente óptima (Chen, 2004).

2.9.2 Conductividad

La sal de mesa se emplea generalmente para aumentar la conductividad del agua o de aguas residuales a tratar. Además de su contribución iónica en la realización de la carga eléctrica, se encontró que los iones de cloruro reduzcan considerablemente el efecto adverso de otros aniones tales como HCO_3^- , SO_4^{2-} , ya que estos aniones ayudan a precipitar a los cationes Ca^{2+} o Mg^{2+} , que forman una capa aislante en la superficie de los electrodos que disminuye la eficiencia de la corriente (Chen, 2004).

Por esa razón, se sugiere que debe haber 20% Cl^- , para asegurar un buen funcionamiento de esta tecnología.

La adición de NaCl también llevaría a la disminución en el consumo de energía debido al aumento de la conductividad. Por otra parte, se encontró el cloro generado electroquímicamente para ser eficaz en la desinfección de agua (Chen, 2004).

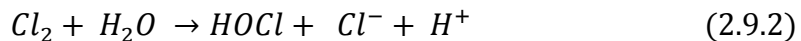
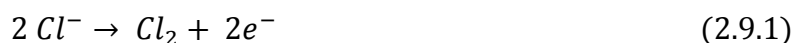
2.9.3 Efectos del pH

Los efectos del pH de agua o de aguas residuales en la electrocoagulación son reflejados por la eficiencia de la corriente, así como la solubilidad de los hidróxidos de metales. Cuando hay presentes iones cloruro, la liberación de cloro también se vería afectada. Generalmente se encontró que los rendimientos de corriente de aluminio son más altos, ya sea en condiciones ácidas o alcalinas que en neutras. El rendimiento del tratamiento depende de la naturaleza de los contaminantes con la mejor remoción de contaminantes encontrados cerca del pH 7.

El consumo de energía es, sin embargo, superior en pH neutro, debido a la variación de la conductividad. Cuando la conductividad es alta, el efecto de pH no es significativo (Chen, 2004).

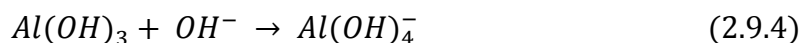
El pH del efluente después del tratamiento de electrocoagulación aumentaría para afluente ácido pero disminuye para afluente alcalino. Esta es una de las ventajas de este proceso. El aumento de pH en condiciones ácidas se atribuyó al desprendimiento de hidrógeno en cátodos. En realidad, además del desprendimiento de hidrógeno, la formación de $Al(OH)_3$ cerca del ánodo liberaría de H^+ conduciendo a una disminución del pH. Además, también hay reacción de desprendimiento de oxígeno que conduce a disminución del pH.

Cuando hay iones de cloro, se producen las siguientes reacciones químicas:



Por lo tanto, el aumento de pH debido a la liberación de hidrógeno es más o menos compensada por las reacciones de liberación H^+ anteriormente. Para el aumento de pH en afluente ácido, el aumento de pH se cree que es debido a la liberación de CO_2 por burbujeo de hidrógeno, debido a la formación de precipitados de otros aniones con Al^{3+} , y debido al desplazamiento del equilibrio hacia la izquierda durante la liberación H^+ en las reacciones.

En cuanto a la disminución del pH en condiciones alcalinas, puede ser el resultado de la formación de precipitados de hidróxido con otros cationes, la formación de $Al(OH)_4^-$ (Chen, 2004).



La eficiencia de remoción de los contaminantes se encontró que era el mejor un pH casi neutro usando un electrodo de aluminio.

Cuando se utilizó electrodo de hierro en la impresión textil y el tratamiento de aguas residuales, se encontró que el afluente alcalino da un mejor color así como las remociones de DQO (Chen, 2004).

2.9.4 Temperatura

Aunque la electrocoagulación ha existido por más de 100 años, el efecto de la temperatura en esta tecnología no fue investigado mucho. Para el tratamiento del agua, muestran que la eficiencia de corriente en el electrodo de aluminio aumenta inicialmente con la temperatura hasta aproximadamente 60 °C donde se encontró un EC máximo.

Un aumento adicional en la temperatura da lugar a una disminución en EC. El aumento de EC con la temperatura se atribuyó a la mayor actividad de destrucción de la película de óxido de aluminio sobre la superficie del electrodo.

Al aumentar la temperatura, disminuye el tamaño de los poros del gel de $Al(OH)_3$, dando como resultado flóculos más compactos con más capacidad de adherirse sobre la superficie del electrodo. Similar a la eficiencia actual, el consumo de energía también da un máximo a un valor ligeramente inferior de temperatura 35 °C, para el tratamiento de aguas residuales que contienen aceite (Chen, 2004).

Entonces, Una temperatura más alta da una mayor conductividad, por lo tanto, un menor consumo de energía (Chen, 2004).

2.9.5 Energía eléctrica.

Cuando la corriente pasa a través de un reactor electroquímico, debe superar la diferencia de potencial de equilibrio, sobrepotencial de ánodo, sobrepotencial de cátodo y caída de potencial óhmico de la solución (Chen, 2004).

El sobrepotencial del ánodo incluye el sobrepotencial de activación y el sobrepotencial de concentración, así como el posible sobrepotencial pasivo resultante de la película pasiva en la superficie del ánodo, mientras que el sobrepotencial del cátodo está compuesto principalmente por el sobrepotencial de activación y el sobrepotencial de concentración. Debe observarse que el sobrepotencial pasivo depende en gran medida del estado superficial del electrodo. Para los nuevos electrodos no pasivados, el sobrepotencial pasivo puede ser despreciado (Chen, 2004).

Por lo general, la fuente de alimentación de corriente continua se emplea. Con el fin de minimizar la oxidación superficial del electrodo o la pasivación, la dirección de la fuente de alimentación se cambia a un cierto intervalo de tiempo.

2.10. Comparación de electrocoagulación y coagulación

La electrocoagulación por medio de la electrooxidación de los ánodos genera hidróxidos metálicos dentro del agua. En la coagulación química, se genera la hidrólisis de sales metálicas de sulfatos y cloruros de aluminio o férricos (Liu, Zhao, & Qu, 2010).

En la electrocoagulación no se utiliza insumos químicos mientras que la coagulación química si se utiliza dichos insumo; por lo que eso conlleva una menor cantidad de lodos y es más factible de eliminarlos a comparación de la coagulación.

2.11. Ventajas de la electrocoagulación

La electrocoagulación presenta las siguientes ventajas:

- La electrocoagulación genera menor cantidad de lodos y es más fácil de tratarlos así como también disponerlos ya que está compuesto de metálicos óxidos e hidróxidos.

- En la electrocoagulación produce flóculos que se puede separar más eficientemente por filtración debido a que son más grandes y con menor cantidad de agua.
- Genera efluente con menos contenido total de sólidos disueltos (TDS) en comparación a otras alternativas. Por lo tanto la recuperación de agua es más viable económicamente.
- El sistema al no tener partes móviles y usarse en cualquier zona urbana o rural dónde sólo se necesita un suministro de energía va requerir un menor costo de mantenimiento (Yousuf, Schennach, Parga, & Cocke, 2001).

2.12. Comparación de electrocoagulación y tratamiento fisicoquímico

A continuación de muestran las siguientes tablas:

Tabla 3
EC - Tratamiento Fisicoquímico

Detalle	Electrocoagulación	Fisicoquímico
Superficie	Representa [50-60]% del sistema	Requiere de gran superficie
Obras Civiles	No	Si
Inversión	Alto	Sólo un 80% de la EC
O&M	Aprox.0.8 Kwh/m3	Aprox.0.7 Kwh/m3
Químicos	No	Si
Lodos	Menor cantidad	Mayor cantidad

Nota: (Systems, 2010). Efluentes industriales tratados por medio de la EC

Tabla 4
Evaluación económica EC/Fisicoquímico

Detalle	Electrocoagulación	Fisicoquímico
Costo energético	Aprox. 0.032 US\$/m ³	Aprox. 0.30 US\$/m ³
Consumibles	No	Alrededor 0.30 US\$/m ³
Tiempo de reacción	Aprox. 60 s	Aprox. 90 s
Tiempo de residencia	~20 min	~40 min
Desinfección	Ozono	Cloración/ Dechloración

Nota: (Systems, 2010). Efluentes industriales tratados por medio de la EC

2.13. Aplicaciones de la electrocoagulación.

Una de las aplicaciones más conocidas de la electrocoagulación es el tratar efluentes de la industria galvánica, lo cual remueve metales disueltos en el efluente de cualquier actividad industrial (Restrepo, Arango, & Garcés, 2006).

La electrocoagulación es una técnica para remover cromo en este tipo de efluente ya sea de la industria de curtiembre, metalúrgica entre otras. Esta técnica da resultados con concentraciones de cromo menores a 0.5 ppm en el efluente (Restrepo, Arango, & Garcés, 2006).

Esta técnica desestabiliza emulsiones y por lo tanto remueve aceites y grasas; ya sea de la industria de hidrocarburos, mecánica entre otras (Restrepo, Arango, & Garcés, 2006).

También se utiliza en la industria de alimentos, estos efluentes tienen altos contenidos de DBO, DQO y de grasas. En Hong Kong, se trató este tipo de efluentes lo cual removió un 99 % en grasas y 88 % en DQO (Restrepo, Arango, & Garcés, 2006).

En la industria textil, se obtuvieron considerables porcentajes de remoción de materia orgánica, turbiedad y color. La corriente eléctrica en la potabilización del agua actúa como un

desinfectante que elimina microorganismos mayores a 99% (Restrepo, Arango, & Garcés, 2006).

También elimina nitratos de aguas que están en la napa freática que se contaminan por los fertilizantes añadidas en los cultivos (Restrepo, Arango, & Garcés, 2006).

Los tipos de aguas residuales o efluentes industriales que pueden ser tratados eficazmente por la electrocoagulación son:

- Revestimiento del efluente de la planta.
- Los lixiviados de vertederos.
- Petroquímica residuos.
- Sentina de agua.
- Proceso de minas y aguas residuales.
- Desechos de la industria alimentaria.
- Aguas superficiales o subterráneas.
- Las aguas residuales municipales.
- Agua potable.
- Las lavanderías comerciales y aguas de lavado.
- Eliminación de isótopos radiactivos.
- Tela de aguas residuales.
- Pulpa y papel de aguas residuales.
- Matadero y curtiembres residuos.
- Pre-tratamiento de residuos industriales.
- Residuos farmacéuticos

2.14. Lodo del proceso de electrocoagulación.

El lodo residual extraído de los procesos de tratamiento de las aguas residuales, ya sean biológicos o fisicoquímicos, generalmente suele ser un líquido o líquido semisólido con gran contenido en agua en sólidos. Su nombre proviene de la producción de una masa activada de microorganismos capaz de estabilizar un residuo. La producción de lodo residual en los

tratamientos de aguas residuales es muy alta, por lo cual se convierte en un problema muy complejo ya que son costosos y difíciles de tratar.

Una de las ventajas de la electrocoagulación ofrece es que sus lodos residuales son muchos más secos y estabilizados que los lodos residuales obtenidos en otros procesos convencionales como el físico químico y lodos activados, esto es de gran beneficio para ahorrar costos en su tratamiento, para luego realizar su disposición final.

2.15. Coloides

2.15.1 Teoría de coloides

Un coloide, se compone por dos fases: la fase continua es un líquido y la fase dispersa compuesta por partículas; también son de características sólidas y de tamaño entre 1 μm y 1nm. En otras palabras estudia fundamentalmente sistemas que contienen moléculas grandes o partículas pequeñas (Camci & Akbal, 2011).

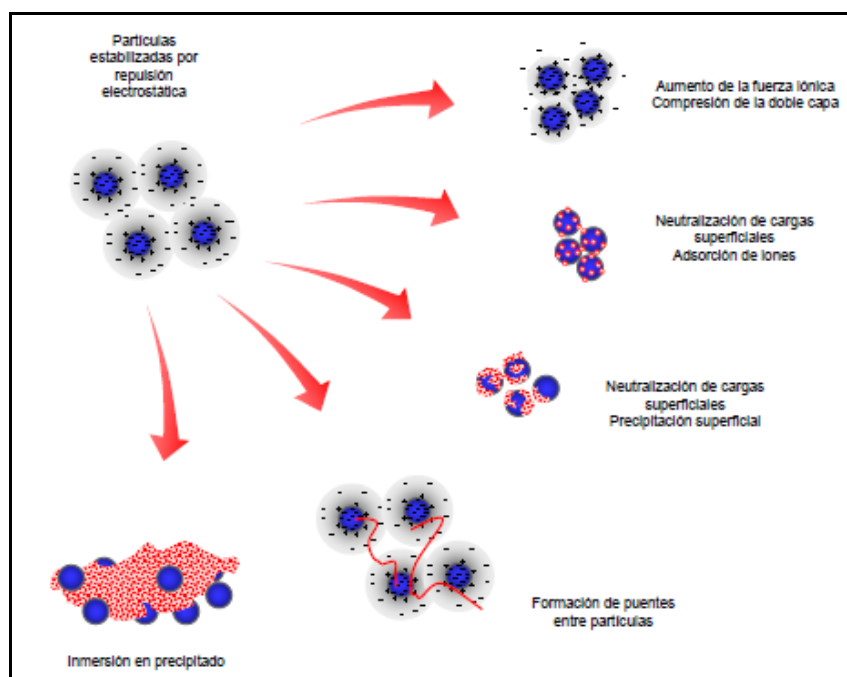


Figura 6. Mecanismo de coagulación de partículas coloidales

Los coloides tienen la tendencia a agregar o formar coágulos que no se aprecian a simple vista (Camci & Akbal, 2011).

2.15.2 Clasificación de coloides

Los sistemas coloidales se clasifican en tres tipos:

- Dispersiones coloidales: No se pueden volver unirse luego de ser separados por eso se dice que son irreversibles.
- Disoluciones macromoleculares: se pueden volver unirse luego de ser separados por eso se dice que son reversibles.
- Coloides de asociación, que son termodinámicamente estables (Camci & Akbal, 2011).

2.16. Comparación de electrocoagulación y tratamiento biológico.

A continuación se muestran las siguientes tablas:

Tabla 5
EC y tratamiento Biológico

Detalle	Electrocoagulación	Biológico
Superficie	Solo un [50-60]% del sistema	Gran superficie
Obras Civiles	No	Si
Inversión	50% de Sist. Biológico	Alto
O&M	Aprox. 0.8 Kwh/m ³	Aprox. 0.7 Kwh/m ³
Químicos	No	Para desinfección
Lodos	Menor cantidad	Mayor cantidad

Nota: (Systems, 2010). Efluentes industriales tratados por medio de la EC

Tabla 6
Evaluación Económica EC/Biológico

Detalle	Electrocoagulación	Biológico
Costo energético	Aprox. 0.032 US\$/m ³	Aprox. 0.35 US\$/m ³
Consumibles	No usa químicos.	[0.008 – 0.009] US\$/m ³
Tiempo de reacción.	Aprox. 60 s	24h en TK-aireación
Tiempo de residencia	~20min	~60 min.
Desinfección	Uso de Ozono	Cloración/ Dechloración

Nota: (Systems, 2010). Efluentes industriales tratados por medio de la EC

2.17. Tecnología de la electrocoagulación

Esta tecnología es una alternativa que presenta una solución para remover metales, sólidos coloidales y partículas, y los contaminantes inorgánicos solubles mediante la introducción de hidróxidos de metales en el medio acuoso (Yousuf, Schennach, Parga, & Cocke, 2001).

Estas especies neutralizan las cargas electrostáticas en sólidos en suspensión y las gotitas de aceite para facilitar la aglomeración o coagulación y la separación resultante de la fase acuosa. El tratamiento solicita la precipitación de ciertos metales y sales (Yousuf, Schennach, Parga, & Cocke, 2001).

Al inducir corriente eléctrica genera una secuencia de reacciones químicas, en donde los contaminantes llegan a ser estables. La estabilidad da partículas sólidas menos coloidales. Si esto acontece, los contaminantes forman componentes hidrofóbicos que no se disuelven o mezclan con el agua y en vez de eso precipitan o flotan dependiendo su densidad, ocasionando mayor facilidad al momento de separarlos. Los iones metálicos disueltos al estar dispersos en el medio se atraen con los contaminantes por fuerzas electrostáticas (Van Der Walls) (Restrepo, Arango, & Garcés, 2006).

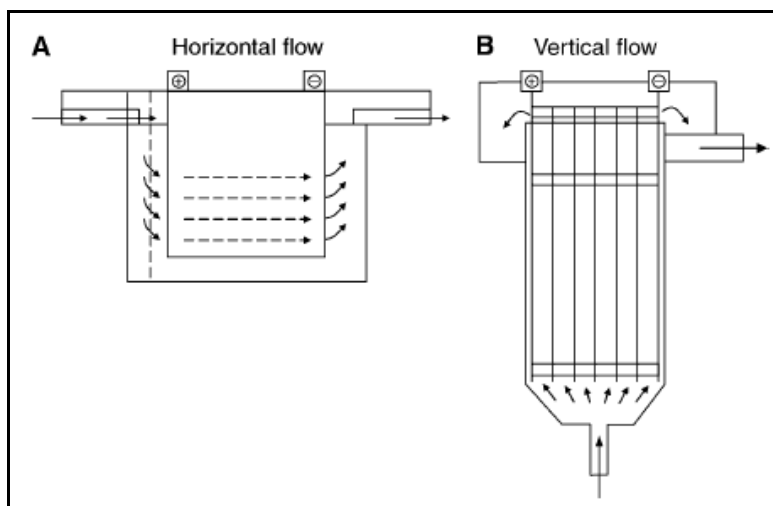


Figura 7. Unidades de Electrocoagulación

Nota: (Chen, 2004). Tecnologías electroquímicas en el tratamiento de aguas residuales. Tecnología de separación y purificación

2.18. Descripción de la electrocoagulación

En la electrocoagulación, se necesita de una celda electrolítica con un ánodo y un cátodo. Cuando se induce corriente eléctrica, el ánodo se corroe debido a la electrooxidación, mientras que el cátodo se expondrá a una pasivación. Para el tratamiento de aguas residuales, se requiere el uso de electrodos con una gran área superficial ya que se necesita una velocidad viable de disolución del metal (Yousuf, Schennach, Parga, & Cocke, 2001).

Esto se ha logrado mediante el uso de celdas con electrodos monopolares o bien en conexiones en paralelo o en serie. A continuación se muestra una disposición sencilla de una celda con un par de ánodos y un par de cátodos en disposición en paralelo (Yousuf, Schennach, Parga, & Cocke, 2001).

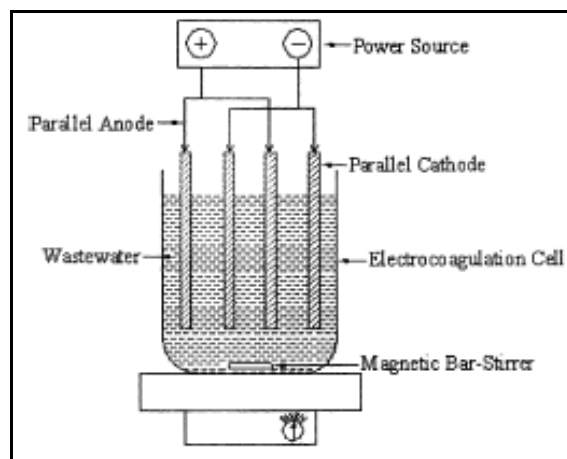


Figura 8. Reactor con electrodos en conexión paralela

Nota: *M.Yousuf A. Mollah et al.(2001). Journal of Hazardous Materials B84.029-41*

Consiste esencialmente en pares de placas metálicas conductoras colocadas entre dos electrodos paralelos y una fuente de alimentación de corriente continua. El montaje experimental también requiere una caja de resistencia para regular la densidad de corriente y un multímetro para leer los valores actuales. Las placas metálicas conductoras se conocen como "electrodos de sacrificio".

El "ánodo de sacrificio" reduce el potencial de disolución del ánodo y minimiza la pasivación del cátodo. Los electrodos de sacrificio pueden ser hechos del mismo o de diferentes materiales (Yousuf, Schennach, Parga, & Cocke, 2001).

Además se muestra un arreglo de celda en serie que contiene pares de ánodos y cátodos como se muestra en la figura, a continuación..

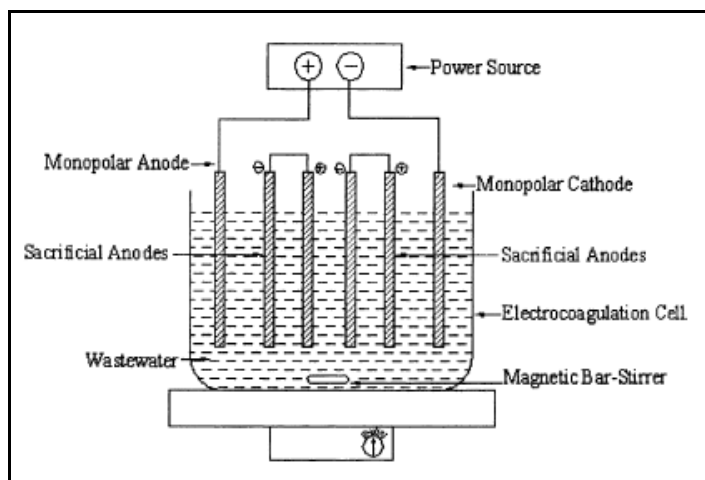


Figura 9. Reactor con electrodos en conexión serie

Nota: Yousuf A. Mollah et al.(2001). *Journal of Hazardous Materials B84.29-41*

El arreglo de celdas en serie tiene mayor resistencia debido a su estructura de conexión de los electrodos, la corriente eléctrica al pasar necesita un mayor voltaje y sería la misma corriente. Por otro lado, el arreglo en paralelo pues la corriente eléctrica no es la misma ya que se distribuye entre todos los electrodos.

Los lectores se hace referencia a un artículo de Pretorius et al para la discusión de los arreglos paralelo y en serie de celdas monopolares (Yousuf, Schennach, Parga, & Cocke, 2001).

Por lo tanto, durante la electrólisis, el lado positivo sufre reacciones anódicas, mientras que en el lado negativo, se encontró reacción catódica. Placas de metal consumibles, tales como hierro o aluminio, se utilizan generalmente como electrodos de sacrificio para producir continuamente iones en el sistema. Los iones liberados neutralizan las cargas de las partículas y con ello iniciar la coagulación. Los iones liberados pueden eliminar los contaminantes no deseados, ya sea por productos químicos reacción y precipitación, o haciendo que los materiales coloidales que se unen y luego se retira por flotación electrolítica (Yousuf, Schennach, Parga, & Cocke, 2001).

Para optimizar las eficiencias de eliminación, las características del agua tales como el pH, el potencial de oxidación-reducción, y la conductividad se pueden ajustar para contaminantes específicos.

En el proceso de EC, un campo eléctrico se aplica al medio por un corto tiempo, y la dispersión tratada transferido a un sistema clarificador integrado en el que la mezcla de contaminantes del agua se separa en una capa flotante, un sedimento rico en minerales, y agua clara. La masa agregada se establece debido a la fuerza de la gravedad. El agua clara se puede extraer mediante métodos convencionales (Yousuf, Schennach, Parga, & Cocke, 2001).

2.19. Diseño y operación de la electrocoagulación.

Se realiza la caracterización del efluente industrial del sector lácteo, tomando muestras del tanque equalizador de la Planta de la empresa GLORIA localizada en Huachipa, luego se mide la turbiedad como parámetro de respuesta durante el proceso. Por consiguiente al final del proceso se realiza mediciones de los parámetros fisicoquímicos como el DQO, aceites y grasas, conductividad, pH y sólidos suspendidos totales. Como referencia a este tipo de efluente se realiza un diseño una celda de material de plexiglás lo cual se dispone de electrodos de una geometría en forma de placas paralelas pero conectadas en serie para después conectarse a un rectificador que transforma la corriente alterna en continua pero sujetos a una fuente de diferencia de potencial (Arango & Garcés, 2007).

De acuerdo a lo mencionado anteriormente se llegó a la conclusión que en el diseño de la celda es importante el arreglo pero también: la distancia, material y número los electrodos así como también el amperaje y el voltaje.

Durante la operación del proceso la celda está distribuida en tres zonas: zona de flotación donde se encuentran los lodos menos densos, zona de reacción donde se producen las reacciones electroquímicas, zona de sedimentación donde se depositan los lodos más densos. A continuación se muestra la figura (Arango & Garcés, 2007).

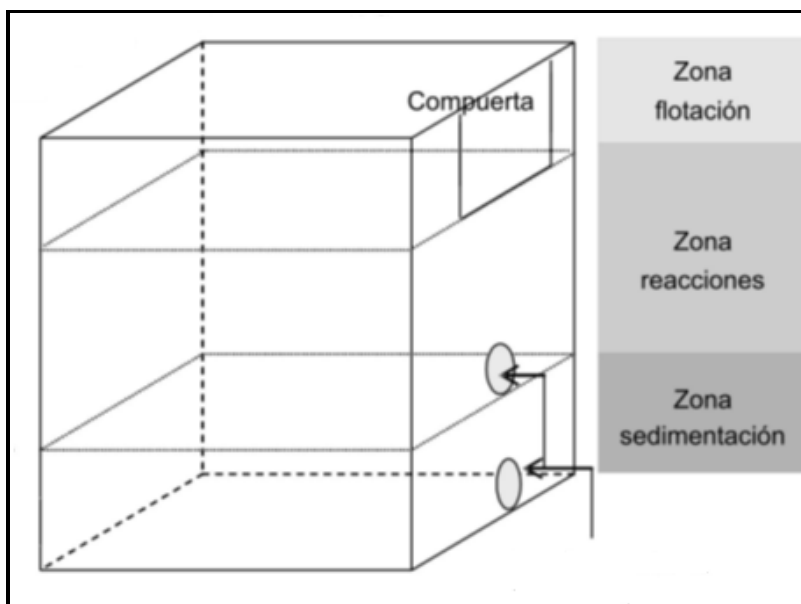


Figura 10. Dimensiones de la celda para electrocoagulación

Nota: (Arango & Garcés, 2007). Revista Universidad EAFIT 43. 56-67

2.20. Influencia de los parámetros experimentales en el pH de la solución durante la electrólisis galvanostática con el uso de electrodos de aluminio.

La solución de pH influye en la velocidad de disolución de aluminio durante la electrólisis de soluciones acuosas galvanostático utilizando electrodos de aluminio. Esto nos llevó a investigar la influencia de los parámetros experimentales sobre los cambios de pH durante la electrólisis galvanostático entre dos placas de aluminio. Basado en la literatura, se informó de que el pH inicial, la densidad de corriente, y la naturaleza del electrólito de soporte son los principales parámetros que pueden causar cambios de pH durante la electrólisis galvanostático (Mansouri, Ibrik, & Abdel-Wahab, 2011).

2.20.1 Influencia del pH inicial en el pH de la solución durante la electrólisis galvanostática con el uso de electrodos de aluminio.

Los cambios de pH con el tiempo dependen del valor pH inicial de la solución electrolizada. Estos resultados demuestran que, independientemente del valor de pH inicial, la evolución del

pH en función del tiempo sigue dos etapas: una etapa de rápido cambio de pH con el tiempo y una etapa en la que el pH permanece casi constante. Es de destacar que la curva de pH frente al tiempo es ascendente para las soluciones de pH inicial inferior o igual a 9 y es descendente en soluciones alcalinas ($\text{pH} > 9$). Para las condiciones ácidas de pH inicial, el aumento de pH se puede explicar por la formación de iones OH^- a partir de la reducción de H^+ o H_2O en la superficie del cátodo (Mansouri, Ibrik, & Abdel-Wahab, 2011).

En estas circunstancias, parece que los iones de hidróxido formados en el cátodo no estaban involucrados completamente en la formación de especies de hidróxido de aluminio. Más bien, el exceso de iones OH^- incrementó el pH del medio.

Por el contrario, para soluciones con pH inicial mayor que 9, la disminución en el pH se puede atribuir al consumo de cantidades más altas de iones OH^- para formar especies de hidroxialuminio aniónicos tales como $\text{Al}(\text{OH})_4^-$ y $\text{Al}(\text{OH})_5^{2-}$. Se debe tenerse en cuenta que en condiciones altamente alcalinas, la cantidad de iones Al^{3+} obtenido por disolución química desempeña un papel significativo en la cantidad total de iones de aluminio generadas in situ. Al final de la electrólisis, la mayoría de las soluciones acuosas se estabilizan a un valor pH cercano a 9. (Mansouri, Ibrik, & Abdel-Wahab, 2011).

La estabilización del pH a un valor cercano a 9 para todos los valores iniciales de pH puede explicarse por un efecto de amortiguación de las especies de hidroxialuminio que equilibra la variación cuasi estática de la concentración de iones hidroxilo a través de la formación de complejos monoméricos y poliméricos de hidróxidos de aluminio. Varios pares ácido-base se pueden formar en el medio que amortiguan el pH a un valor alrededor de pH 9 (Mansouri, Ibrik, & Abdel-Wahab, 2011).

2.20.2 Influencia de la densidad de corriente en el pH de la solución durante la electrólisis galvanostática con el uso de electrodos de aluminio.

Los cambios de pH frente al tiempo durante la electrólisis galvanostáticas a diferentes densidades de corriente de 0,1 M de NaCl soluciones acuosas utilizando placas de aluminio como electrodos a un pH inicial 9. Ningún cambio significativo del pH con el tiempo se observó el uso de diferentes densidades de corriente, y similares se obtuvieron los perfiles para todas las densidades de corriente aplicadas. Al inicio de la electrólisis, el pH se redujo en una

unidad, y luego se aumenta con el tiempo hasta que alcanza un valor próximo a su valor inicial de pH 9) y, finalmente, se estabiliza.

Este cambio insignificante de pH causada por el cambio de densidad de corriente durante la electrólisis galvanostático puede explicarse por el hecho de que el aumento de la densidad de corriente en los resultados de rango estudiado sólo en un aumento tanto de la velocidad de la disolución del ánodo de aluminio y la producción de H_2 en la superficie del cátodo (Mansouri, Ibrik, & Abdel-Wahab, 2011).

2.20.3 Efecto del electrolito en el pH de la solución durante la electrólisis galvanostática con el uso de electrodos de aluminio.

La variación de pH en función del tiempo durante la electrólisis galvanostática de soluciones acuosas que contienen diferentes electrolitos de soporte ($NaCl$, Na_2SO_4 o NaH_2PO_4) utilizando electrodos de aluminio a una densidad de corriente de $60 A/m^2$ (Mansouri, Ibrik, & Abdel-Wahab, 2011).

La naturaleza del electrolito de soporte tiene un efecto significativo en la variación del pH con el tiempo durante la electrólisis galvanostático. En presencia de NaH_2PO_4 , pH aumentó continuamente hasta que se alcanzó un valor de 11,4.

Mientras que en presencia de $NaCl$ o Na_2SO_4 , pH disminuyó ligeramente al principio y luego aumenta gradualmente hasta que se estabilizó en 9,3 y 10, respectivamente. Estas variaciones se deben probablemente a la naturaleza y la estabilidad de los complejos de aluminio formados en cada electrolito. En particular, la presencia de NaH_2PO_4 , en la solución conduce a la formación de complejos estables con iones Al^{3+} ($Al(PO)_4$, $AlH(PO)_4^+$ y $AlH_2(PO)_4^{2+}$).

Como tal, una parte importante de los iones Al^{3+} formados durante la electrólisis reacciona con los iones de fosfato. Esto conduce a un exceso de OH^- , disponible en la solución, lo que aumenta pH de la solución con el tiempo (Mansouri, Ibrik, & Abdel-Wahab, 2011).

Es notable que en presencia de Na_2SO_4 o NaH_2PO_4 , pH de la solución se estabilizó en un valor mayor que pH 10, lo que facilita la disolución de $Al(OH)_3$ en especies hidroxialuminio aniónicas tales como $Al(OH)_4^-$ y $Al(OH)_5^{2-}$ y la formación de estas especies hace floculación y electroprecipitación difícil que se produzca. Mientras que en el caso de NaCl, pH permanece en el intervalo entre 8,3 y 9,3 durante todo el experimento. En este intervalo de pH, hidróxido de aluminio amorfo ($Al(OH)_3$) se precipita, que tiene una gran área superficial que es beneficioso para coagulación por adsorción (Mansouri, Ibrik, & Abdel-Wahab, 2011).

El siguiente diagrama muestra algunas fases de monómero formadas por Al^{3+} en función del pH.

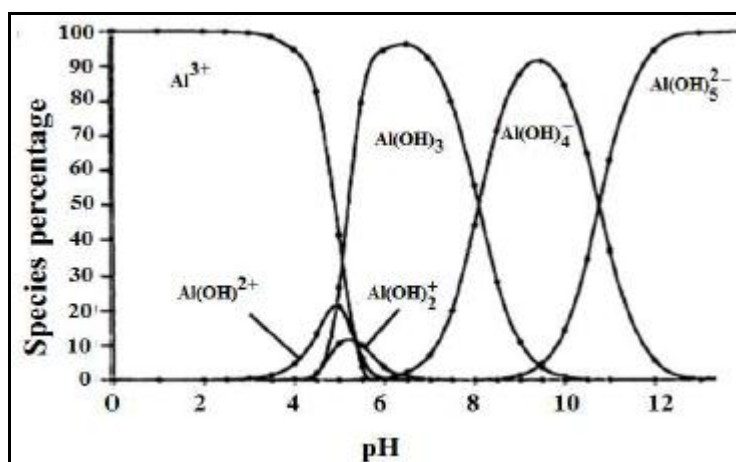


Figura 11. Distribución de especies de hidrólisis de aluminio en función del pH

Nota: (Lekhlif, Oudrhiri, Zidane, Drogui, & Blais F, 2014). Estudio de la electrocoagulación de aguas residuales industriales de galvanoplastia cargadas de níquel (II) y cromo (VI)

2.21. Estudio cinético

En el proceso de la Electrocoagulación con el fin de dilucidar la cinética de eliminación de contaminantes, el efecto de estos parámetros sobre la tasa de adsorción de contaminantes.

Los datos cinéticos se analizan usando la ecuación de velocidad de Lager gran. Cuando no se conoce el mecanismo de reacción, a veces intentamos ajustar los datos con una ecuación cinética de orden n, de la forma donde C es concentración de aceites y grasas y al tiempo t (min), y K (min⁻¹) es la constante de velocidad de remoción. (Levenspiel, 2001).

$$-dC/dt = KC_A^n$$

La forma integrada de la ecuación anterior, donde C_A es la concentración de aceites y grasas en equilibrio y la constante de velocidad de remoción K.

$$C_A^{1-n} - C_{A0}^{1-n} = (n - 1)Kt \quad ; \quad n \neq 1$$

El orden n no puede calcularse directamente a partir de la ecuación sino que ha de efectuarse se calculó por tanteo. Para un valor supuesto de n se calcula K para todos y cada uno de los puntos; el valor de n que de mínima variación en K es el valor buscado.

Las constantes de velocidad de eliminación de los metales dependerá de la concentración inicial disminuirá al aumentar la concentraciones de iones metálicos en la solución.

Los iones de aluminio se hidrolizan y los complejos mononucleares se forman. La presencia de iones de aluminio y complejos de aluminio desestabilizan las partículas coloidales, rompiendo la emulsión. Este proceso conduce a floculación, que genera partículas más grandes. Los flóculos se asientan y forman un lodo en el fondo del reactor.

2.22. Retos y oportunidades.

La electrocoagulación es una tecnología que actualmente presenta ventajas y tiene un mayor protagonismo en el tratamiento de aguas residuales, lo cual nos posibilita estudiar esta tecnología con mayor profundidad y con un mejor procedimiento. Por lo tanto, nos brinde las herramientas necesarias para poder optimizar los recursos y tener una mejor evaluación tanto económica (costo de inversión, energético) como técnica (operación y mantenimiento).

Se ha aplica esta tecnología para efluentes de distintas industrias que tengan como caracterización alta carga orgánica (DBO y DQO) o elevadas concentraciones de aceites y grasas. Es una tecnología limpia es decir amigable con el medio ambiente pues descarga lodos compactos y con menor porcentaje de humedad, eso posibilita más facilidad de separar y disponer los residuos por consiguiente conlleva a un menor impacto ambiental.

La electrocoagulación se conjunta con otras tecnologías de tratamiento de aguas ya sea previamente o posteriormente, cuyo objetivo es realizar un mejor tratamiento.

CAPITULO 3

METODOLOGÍA DEL TRABAJO

3.1. Metodología experimental

Metodología experimental, se basa en un reactor de capacidad de 5 litros lo cual se realizó pruebas en un proceso por lotes. Este reactor es de tipo Bach, consta de una serie de electrodos que actúan como coagulantes, lo cual se debe operar con un volumen determinado de agua residual.

Estos electrodos están conectados a una fuente de poder la cual suministra la corriente para el proceso de electrocoagulación, en una primera etapa se utilizó una fuente de poder de voltaje constante, mientras que en las pruebas definitivas se utilizó una fuente de poder de voltaje y amperaje variable, permitiendo modificar el suministro de corriente que se le proporciona a la celda.

La electrocoagulación es capaz de reducir la producción de residuos o lodos de efluentes así como también reduce el tiempo necesario para el tratamiento.

3.2. Diseño de la celda de electrocoagulación

El dimensionamiento de la celda es basado en un sistema que opera como como un reactor tipo Bach a escala laboratorio con capacidad de tratar 5 litros de agua residual. El material usado para la fabricación de la celda fue de material de metacrilato de metilo de color transparente de tal forma que nos permita apreciar con claridad todos los procesos físicoquímicos del agua que se presentan en el proceso de electrocoagulación.

El reactor es de forma de un paralelepípedo rectangular, en el cual están sumergidos los electrodos de forma rectangular que son de aluminio en un caso, y aluminio - hierro en otro caso.

Se tuvo el criterio desde el inicio de fabricarla totalmente desarmable, para eso se fabricaron soportes de acrílico para los electrodos de tal manera que se pudiera variar los espaciamentos entre las placas y realizar una mejor limpieza de la celda después de cada prueba.

3.3. Materiales y equipos utilizados

En las pruebas experimentales de laboratorio se utilizaron diversos materiales, reactivos y/o equipos para las mediciones de los parámetros físicoquímicos. Estos equipos y materiales se exponen a continuación:

Materiales y/o reactivos.

- Papel filtro
- Ácido sulfúrico al 20%
- Agua desmineralizada
- Agua residual provenientes de la Industria láctea.

Equipos:

- Reactor Tipo Batch
- Electrodos de aluminio y hierro
- Rectificador DC (0 – 100A/ 0 - 20 V)
- Medidor pH (pHmetro), marca: HACH
- Medidor de Conductividad y Temperatura, marca: HACH
- Turbidímetro 2100 P Marca HACH
- Colorímetro MD-200 Marca: Lovibond
- Balanza Analítica de precisión
- Horno o mufla
- Bomba de vacío

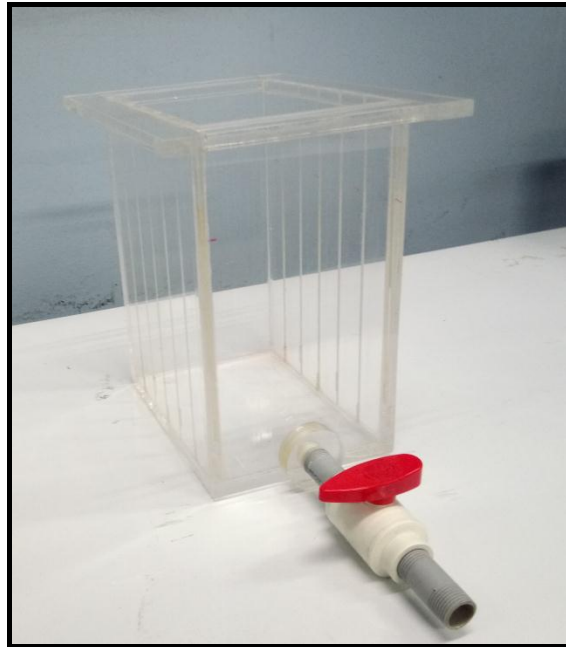


Figura 12. Reactor Batch



Figura 13. Rectificador corriente continua



Figura 14. Conductímetro, marca: HACH



Figura 15. pH-metro, marca: HACH



Figura 16. Turbidímetro 2100P, marca: HACH

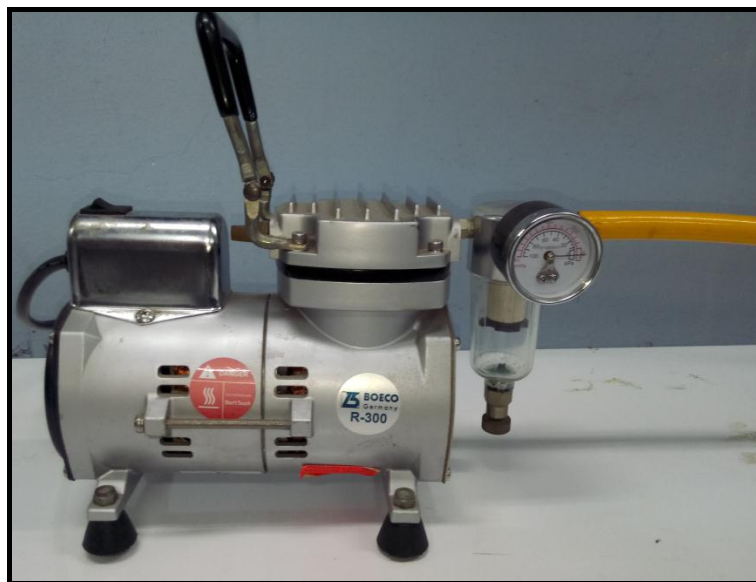


Figura 17. Bomba de vacío, marca: BOECO



Figura 18. Digestor, marca: Lovibond



Figura 19. Colorímetro medidor DQO MD200, marca: Lovibond

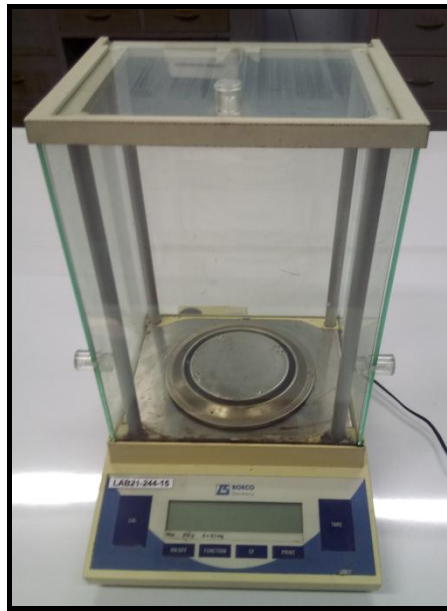


Figura 20. Balanza analítica, marca: BOECO



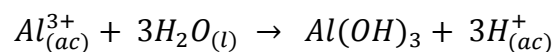
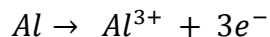
Figura 21. Horno, marca: FISHER

3.4. Reacciones ocurridas en el proceso

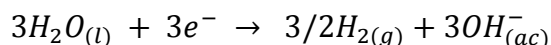
Los electrodos de sacrificio son de aluminio que tienen la forma de placas, durante el proceso al inducir corriente eléctrica y voltaje a la celda se forman iones de aluminio disueltos, quiere decir que los ánodos van degradándose conforme transcurre el tiempo, llegando un momento en el que se requiere reponerlos (Cañizares, Jiménez, Lobato, Martínez, & Rodrigo, 2007).

Durante la electrocoagulación se produce una serie de reacciones tanto en el ánodo como en el cátodo. A continuación se muestran las siguientes reacciones.

Para ánodo: se produce la oxidación del aluminio:



En el cátodo: se produce la reducción del agua



El compuesto $Al(OH)_3(s)$, es gelatinoso, que tiene la función de adsorber los contaminantes del efluente (Restrepo, Arango, & Garcés, 2006).

3.5. Desarrollo de pruebas experimentales

Se realizó las pruebas experimentales en un proceso por lotes pero en tres casos distintos, la primera fue usando sólo electrodos de aluminio, en el segundo y tercer caso fueron usando electrodos de aluminio y hierro.

En el primer caso realizado en un reactor por lotes de 5 litros de capacidad se utilizaron 5 electrodos de aluminio distribuidos en 2 electrodos en el cátodo y 3 electrodos en el ánodo en donde se tomaron 3 muestras en intervalos de 5 minutos a 3 diferentes densidades de corriente. Para luego determinar el valor óptimo de la densidad de corriente que se debe aplicar para obtener resultados de remoción.

En el segundo caso se empleó el mismo reactor, se utilizaron 2 electrodos de aluminio en el cátodo, 1 electrodo de aluminio más 2 electrodos de fierro en el ánodo, en donde se tomarán 3 muestras en intervalos de 5 minutos. Se toma el valor óptimo de densidad de corriente del primer experimento, y así poder determinar si hay sinergia en los electrodos tanto de aluminio como hierro para obtener mejores resultados de remoción.

En el tercer caso se empleó el mismo reactor, se utilizaron 2 electrodos de aluminio en el cátodo, 2 electrodos de aluminio más 1 electrodo de fierro en el ánodo, en donde se tomarán 3 muestras en intervalos de 5 minutos. Se toma el valor óptimo de densidad de corriente del primer experimento, y así poder determinar si hay sinergia en los electrodos tanto de aluminio como hierro para obtener mejores resultados de remoción.

Las variables de operación son: caudal de efluente generado, densidad de corriente, tiempo de residencia, arreglo de los electrodos, dimensiones y distancias entre los electrodos, de manera que sean utilizados de manera óptima y obtener así la mayor porcentaje de remoción.

Las muestras obtenidas en los tres casos experimentales serán analizadas por el Laboratorio N°20 de Química Aplicada de la Universidad Nacional de Ingeniería, en el laboratorio de AQA Química donde actualmente trabajo y de un laboratorio certificado por INACAL para respaldar la veracidad de los resultados.

3.6. Proceso por lotes

La celda de electrocoagulación tiene una capacidad de 5 litros, que consta de electrodos de ánodo y cátodo que están conectados un rectificador (Arango & Garcés, 2007).

El sistema de electrocoagulación requiere de una fuente de corriente directa, en este caso utilizamos un rectificador para leer los valores de corriente y el voltaje que varían durante el proceso.

3.6.1 Electrocoagulación con electrodos de Al

En este experimento es encontrar la densidad de corriente óptima en la cual se quiere obtener la mayor remoción posible de aceites y grasas presentes en el efluente, usando electrodos de aluminio.

Tabla 7
Con electrodos de aluminio en el ánodo

Experimentos electrodos de al	J (A/m ²)	Voltios (V)	Tiempo (min)	Análisis de muestras
Blanco			15	1
Prueba N°1	J_1		20	3
			25	
			15	
Prueba N°2	J_2		20	3
			25	
			15	
Prueba N°3	J_3		20	3
			25	

3.6.2 Electrocoagulación con electrodos de Al - Fe

Segundo caso experimental: Luego de haber determinado el valor óptimo de la densidad de corriente, se utilizaron 2 electrodos de aluminio en el cátodo, 1 electrodo de aluminio más 2 electrodos de fierro en el ánodo.

Tabla 8
 Con electrodos de 01 Al - 02 Fe en el ánodo

Experimentos de electrodos de al	J (A/m ²)	Voltios (v)	Tiempo (min)	Análisis de muestras
			15	
	J_{opt}		20	3
			25	

Tercer caso experimental: Luego de haber determinado el valor óptimo de la densidad de corriente, se utilizaron 2 electrodos de aluminio en el cátodo, 2 electrodos de aluminio más 1 electrodo de fierro en el ánodo.

Tabla 9
 Con electrodos de 02 Al - 01 Fe en el ánodo

Experimentos de electrodos de al	J (a/m ²)	Voltios (v)	Tiempo (min)	Análisis de muestras
			15	
	J_{opt}		20	3
			25	

3.7. Resultados obtenidos

El agua residual seleccionada para las pruebas de laboratorio definitivas fue un efluente proveniente de la compañía Gloria S.A., que se dedica al rubro de la Industria láctea, la cual fue monitoreada en la misma Planta de Tratamiento de Agua Residual (PTAR).

Luego del monitoreo se envió la muestra del efluente crudo a los laboratorios: laboratorio N°20 de Química Aplicada de la Universidad Nacional de Ingeniería, en el laboratorio de AQA Química donde actualmente trabajo y de un laboratorio certificado por INACAL, para la realización de los análisis fisicoquímicos para establecer las condiciones iniciales del efluente.

3.7.1 Caracterización del agua residual

El efluente presenta a simple vista un color blanco, con una alta DQO aproximadamente de 2860 mg/l, evidenciando su alta carga orgánica de contaminación. También se puede apreciar una alta turbiedad y sólidos suspendidos totales. Con respecto al pH es 7.07 que es casi neutro y la conductividad tiene un valor de 1384 $\mu\text{S}/\text{cm}$ siendo un valor aceptable por lo cual no fue necesario agregarle cloruro de sodio (NaCl) para modificar su valor en las pruebas. Estos resultados se indican a continuación en la siguiente tabla:

Tabla 10
Valores iniciales de la muestra

Parámetro	Unidad	VMA para descargas al sistema de alcantarillado
pH	----	7.07
DQO	mg/L	2860
SST	mg/L	338.3
A y G	mg/L	172.7
Conductividad	uS/cm	1384
Turbiedad	NTU	2274

Nota: Laboratorio UNI-AQA Química-Envirotest



Figura 22. Toma de muestra del tanque ecualizador

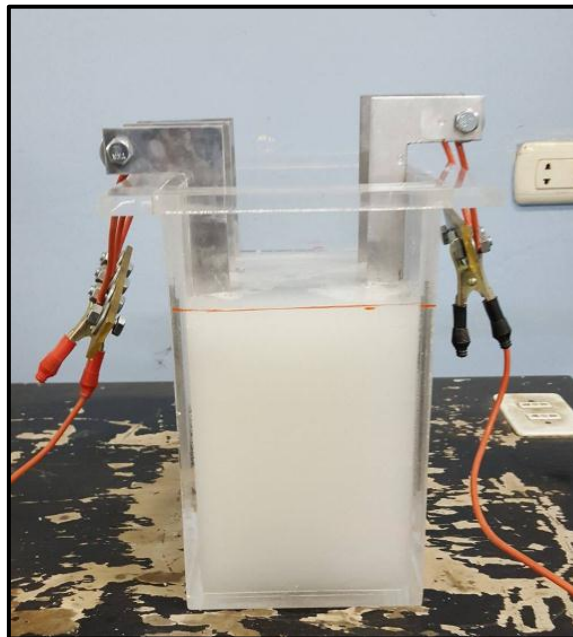


Figura 23. Muestra de blanco en el reactor

3.8. Resultados con electrodos de aluminio

Para la realización del experimento, se utilizó como efluente a tratar la muestra obtenida de la Planta de Tratamiento de Agua Residual de la compañía Gloria, la muestra tomada fue de 120 litros. En el reactor batch se realizó variando el parámetro de densidad de corriente, y se tomaron muestras a diferentes tiempos.

3.8.1 Parámetro de turbiedad

El agua residual alcanzar una turbiedad de 2274 NTU, se realizaron pruebas con la celda de electrocoagulación como una fase preliminar antes de realizar las pruebas definitivas. En esta etapa se evaluó la remoción de turbiedad, obteniéndose buenos resultados llegándose a reducir de 2274 hasta 326 NTU en un tiempo de 25 minutos. La eficiencia promedio obtenida con el proceso de electrocoagulación fue del 85.66% en la remoción de turbiedad.

Tabla 11
Remoción de la turbiedad en función del tiempo

Corriente (A)	Tiempo (min)	Turbiedad (NTU)	% De Remoción
	0	2274	0.00
	15	1850	18.65
7	20	683	69.96
	25	579	74.54
	15	1724	24.19
8	20	527	76.82
	25	388	82.94
	15	1607	29.33
9	20	492	78.36
	25	326	85.66

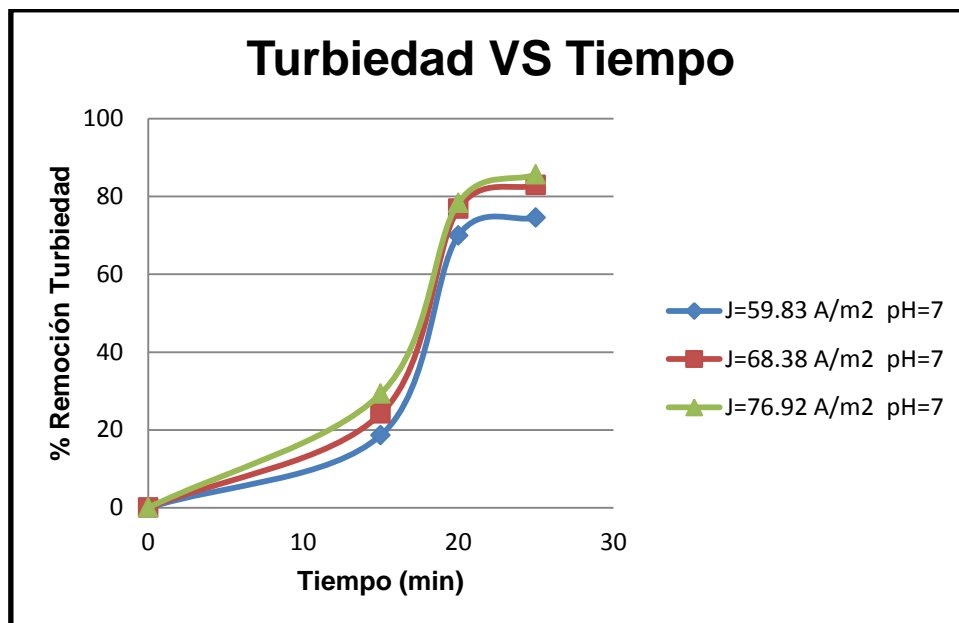


Figura 24. Remoción de Turbiedad respecto al tiempo

3.8.2 Parámetro de aceites y grasas

Como se muestra en la tabla 13, se evaluó la remoción de aceites y grasas, obteniéndose buenos resultados llegando a reducir de 172.7 hasta 51.3 mg/l en un tiempo de 25 minutos. La eficiencia promedio obtenida con el proceso de electrocoagulación fue del 70.30% en la remoción de Aceites y Grasas.

Tabla 12
Remoción de Aceites y Grasas en función del tiempo

Corriente (A)	Tiempo (min)	Aceites y Grasas (mg/L)	% De Remoción
	0	172.7	0.00
	15	148.9	13.78
7	20	74	57.15
	25	72.1	58.25
	15	138.8	19.63
8	20	124.5	27.91
	25	58.9	65.89
	15	131	24.15
9	20	121.5	29.65
	25	51.3	70.30

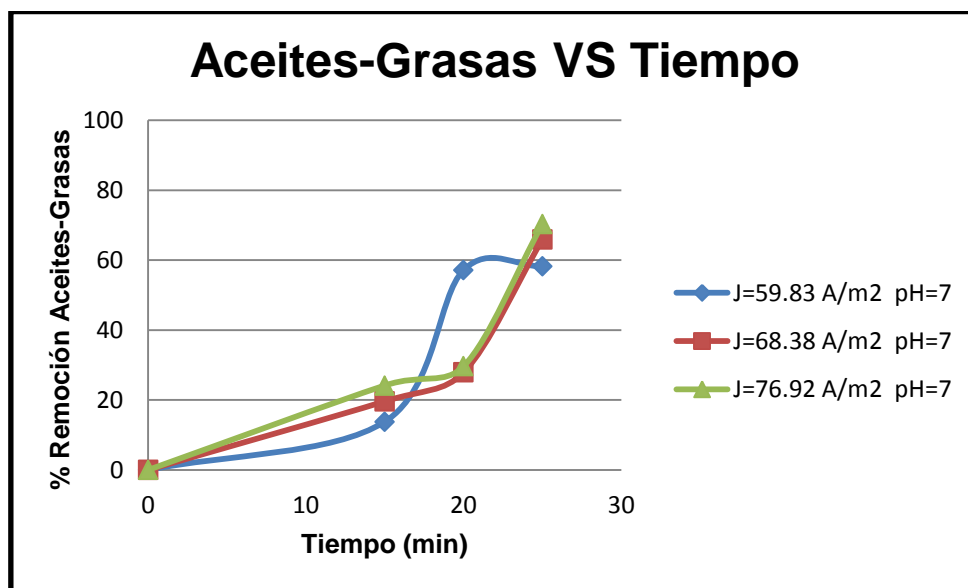


Figura 25. Remoción de Aceites y Grasas respecto al tiempo

3.8.3 Parámetro de DQO

Como se observa en la gráfica N°14, se evaluó la remoción de DQO, obteniéndose buenos resultados llegándose a reducir de 2860 hasta 704 mg/L en un tiempo de 25 minutos. La eficiencia obtenida con la electrocoagulación fue del 75.38% en la remoción de DQO.

Tabla 13
Remoción de DQO en función del tiempo

Corriente (A)	Tiempo (min)	DQO (mg/l)	% De Remoción
	0	2860	0.00
	15	1854	35.17
7	20	1305	54.37
	25	910	68.18
	15	1725	39.69
8	20	1147	59.90
	25	795	72.20
	15	1642	42.59
9	20	1065	62.76
	25	704	75.38

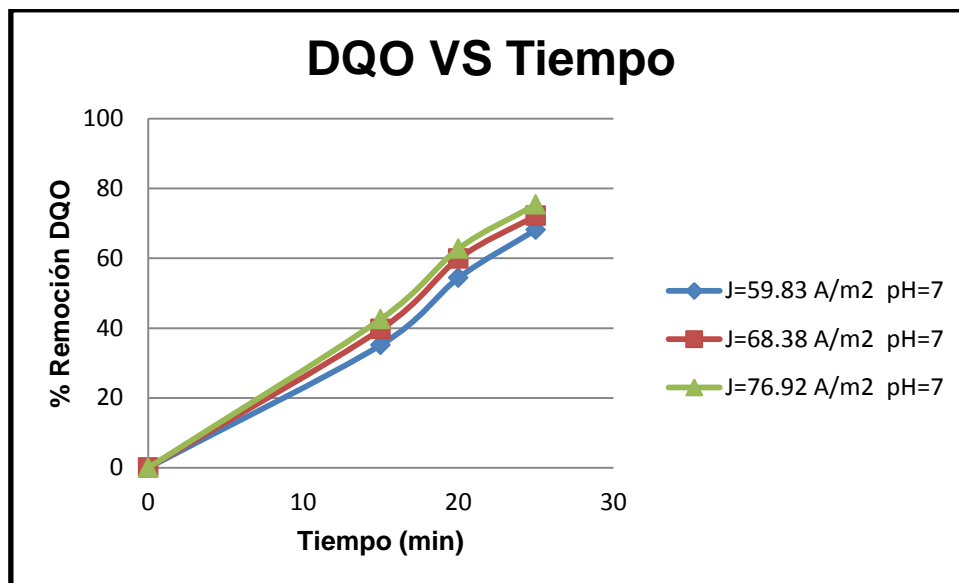


Figura 26. Remoción de DQO respecto al tiempo

3.8.4 Parámetro de sólidos suspendidos totales (SST)

Se evaluó la remoción de SST, obteniéndose buenos resultados llegándose a reducir de 338.3 hasta 65.1 mg/l en un tiempo de 25 minutos. La eficiencia promedio obtenida con el proceso de electrocoagulación fue del 80.76% en la remoción de SST.

Tabla 14

Remoción de SST en función del tiempo

Corriente (A)	Tiempo (min)	SST (mg/L)	% Remoción
	0	338.3	0.00
	15	192.9	42.98
7	20	152.2	55.01
	25	94.8	71.98
	15	173.3	48.77
8	20	136.5	59.65
	25	78.2	76.88
	15	160.7	52.50
9	20	110.6	67.31
	25	65.1	80.76

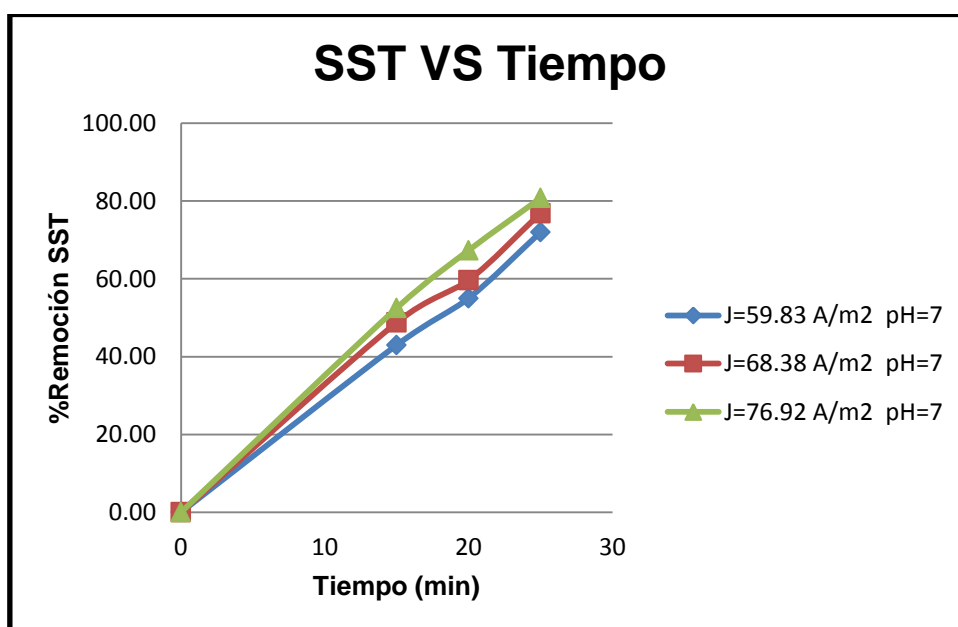


Figura 27. Remoción de SST respecto al tiempo

3.9. Variación del pH, conductividad y temperatura

Basado en estudios anteriores, el proceso de electrocoagulación depende de variables como la densidad de corriente, pH, conductividad, tiempo de tratamiento, así como el material de los electrodos y espaciamiento entre las placas. Optimizar estas variables nos permite tener una mejor eficiencia en el tratamiento del agua residual.

3.9.1 Variación del pH

Los valores de pH se encuentran en un rango 7.07 a 8.01 lo cual hace que no exista mucha variación en el proceso. Los valores óptimos de pH según estudios anteriores para este tipo de tratamiento son con valores cercanos a 7.

Tabla 15
Variación del pH en función del tiempo

Corriente (A)	Tiempo (min)	pH
	0	7.07
	15	7.29
7	20	7.47
	25	7.55
	15	7.55
8	20	7.64
	25	7.80
	15	7.85
9	20	7.96
	25	8.01

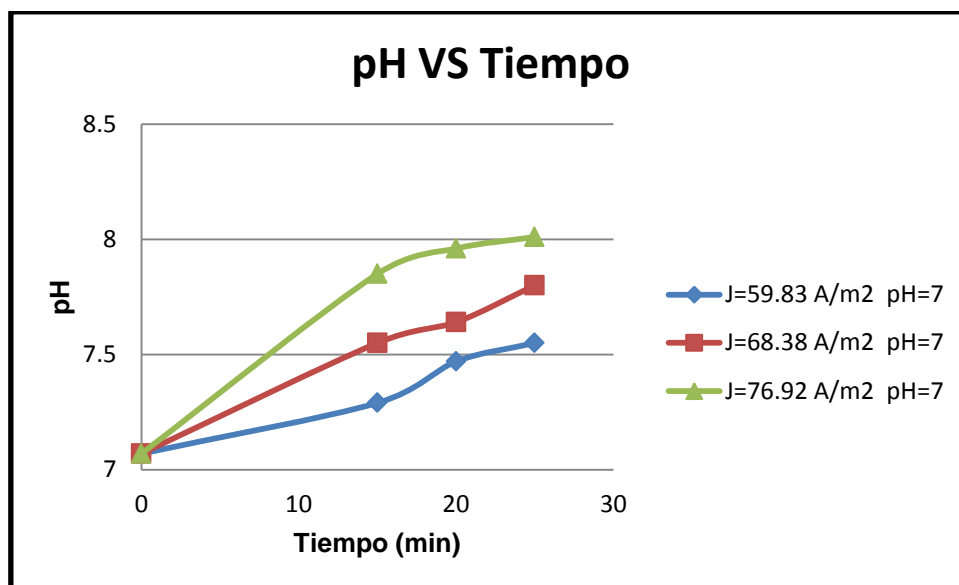


Figura 28. Comportamiento del pH respecto al tiempo

3.9.2 Variación de la conductividad

La conductividad es uno de los parámetros que influye en la eficiencia de la electrocoagulación, un incremento de esta genera un aumento en la densidad de corriente. La conductividad inicial del efluente presentó un valor de 1384 uS/cm. Según la bibliografía en algunos casos es necesario agregar cloruro de sodio (NaCl) para mejorar la conductividad del efluente, en el caso de nuestro proyecto no fue necesario ya que hubo una buena conducción de corriente.

Tabla 16
Variación de la conductividad en función del tiempo

Corriente (A)	Tiempo (min)	Conductividad (uS/cm)
	0	1384
	15	1299
7	20	1281
	25	1242
	15	1282
8	20	1274
	25	1239
	15	1250
9	20	1234
	25	1213

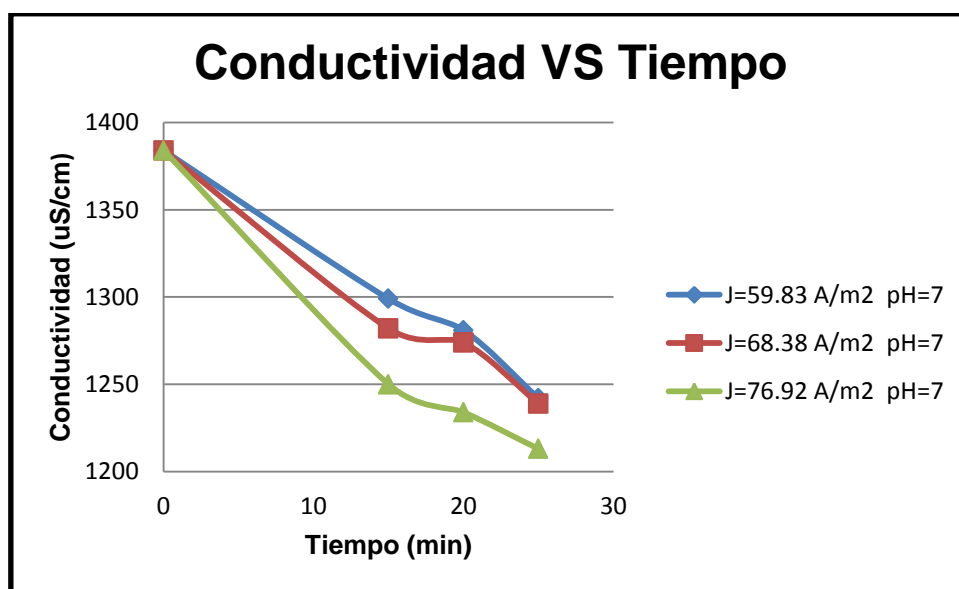


Figura 29. Comportamiento de la Conductividad respecto al tiempo

3.9.3 Variación de la temperatura.

La temperatura también influye en el proceso de electrocoagulación ya que un incremento de temperatura aumenta la velocidad de la reacción, independientemente de que ésta sea exotérmica o endotérmica. La temperatura varió de 28.5°C a 36.1°C.

Según *Chen, G*; la eficiencia de corriente en el electrodo de aluminio aumenta inicialmente con la temperatura hasta aproximadamente 60 °C donde se encontró una mayor remoción de contaminantes. La velocidad de la reacción se duplica por cada 10°C de aumento de temperatura. Esto hace de suponer que podría ser beneficioso para el proceso, sin embargo un incremento de temperatura en el proceso de electrocoagulación lleva a la dispersión de los flóculos formados durante el proceso.

Tabla 17
Variación de la temperatura en función del tiempo

Corriente (A)	Tiempo (min)	Temperatura (°C)
	0	28.5
	15	29.6
7	20	31.7
	25	32.2
	15	30.3
8	20	32.6
	25	34.3
	15	31.4
9	20	34.7
	25	36.1

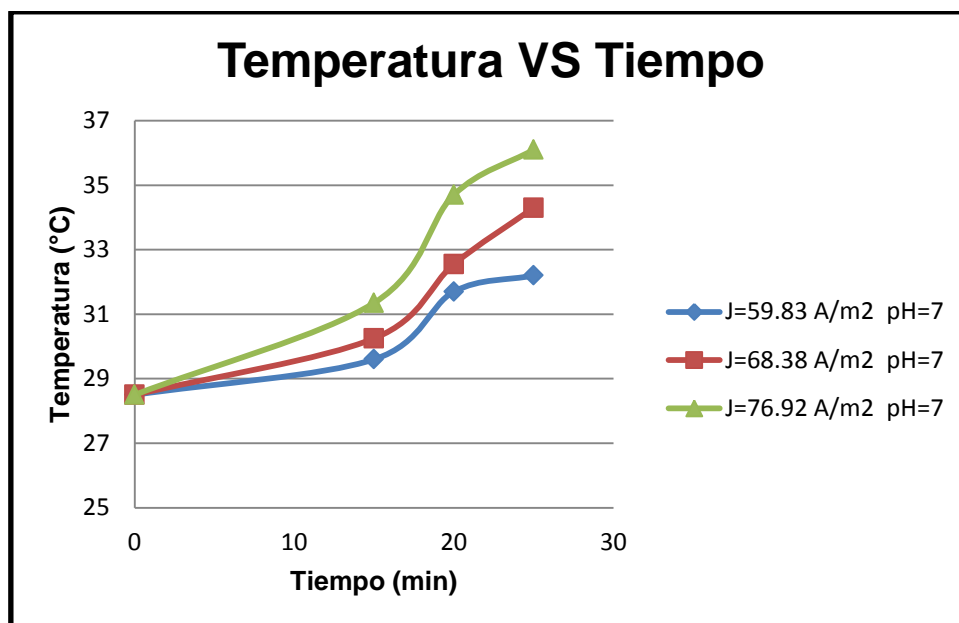


Figura 30. Comportamiento de la Temperatura respecto al tiempo

3.10. Resultados con electrodos de aluminio y fierro

3.10.1 Segundo caso: 01 Al-02 Fe

Luego de haber determinado el valor óptimo de la densidad de corriente que es 68,38 A/m², se utilizaron 02 electrodos de aluminio en el cátodo, 01 electrodo de aluminio más 02 electrodos de fierro en el ánodo.

3.10.2 Tercer caso: 02 Al-01 Fe

Luego de haber determinado el valor óptimo de la intensidad de corriente que es 8A, se utilizaron 02 electrodos de aluminio en el cátodo, 02 electrodos de aluminio más 01 electrodo de fierro en el ánodo.

A continuación se muestra los resultados del agua residual tratada de ambos casos.

Tabla 18
Remoción de la turbiedad de la densidad de corriente óptima

N° Caso	Tiempo (min)	Turbiedad (NTU)	% De Remoción
	0	2274	0.00
01 Al-02 Fe	15	1987	12.62
	20	470	79.33
	25	372	83.64
	15	1359	40.24
02 Al-01 Fe	20	531	76.65
	25	425	81.31

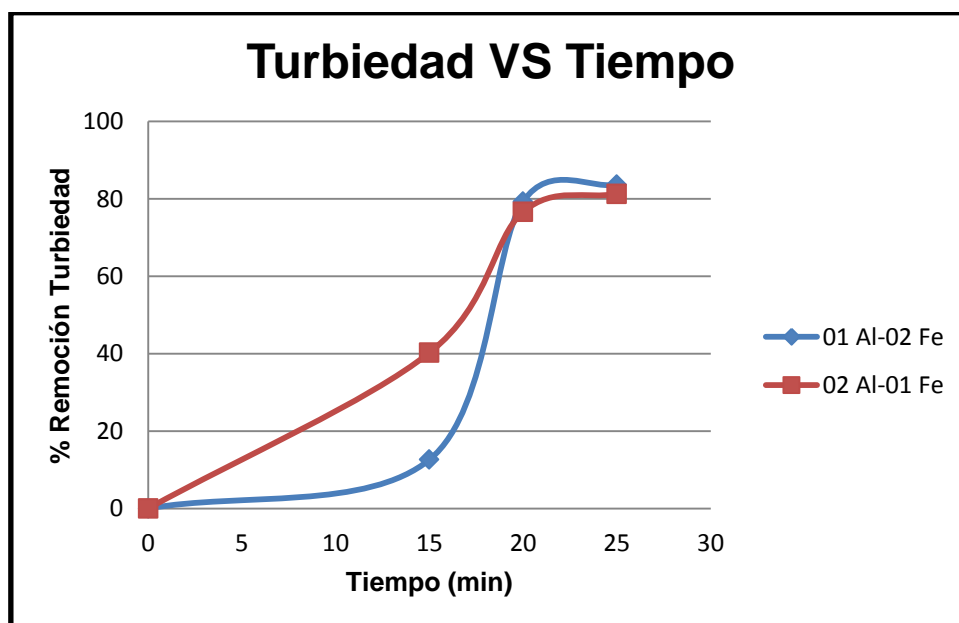


Figura 31. Remoción de Turbiedad de la densidad de corriente óptima

Tabla 19
Remoción de Aceites-Grasas de la densidad de corriente óptima

N° Caso	Tiempo (min)	Aceites y Grasas	% De Remoción
	0	172.7	0.00
	15	169.3	1.97
01 Al-02 Fe	20	86	50.20
	25	43.8	74.64
	15	82.8	52.06
02 Al-01 Fe	20	63.1	63.46
	25	51.8	70.01

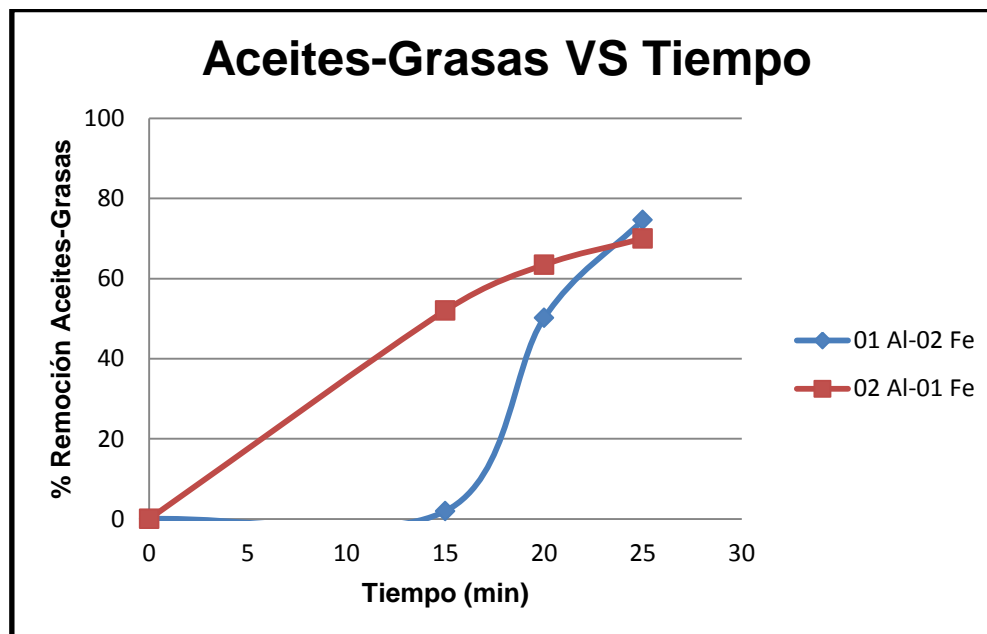


Figura 32. Remoción de Aceites-Grasas de la densidad de corriente óptima

Tabla 20
Remoción de DQO de la densidad de corriente óptima

N° Caso	Tiempo (min)	DQO (mg/l)	% De Remoción
	0	2860	0.00
01 Al-02 Fe	15	2325	18.71
	20	1357	52.55
	25	835	70.80
	15	1965	31.29
02 Al-01 Fe	20	1148	59.86
	25	976	65.87

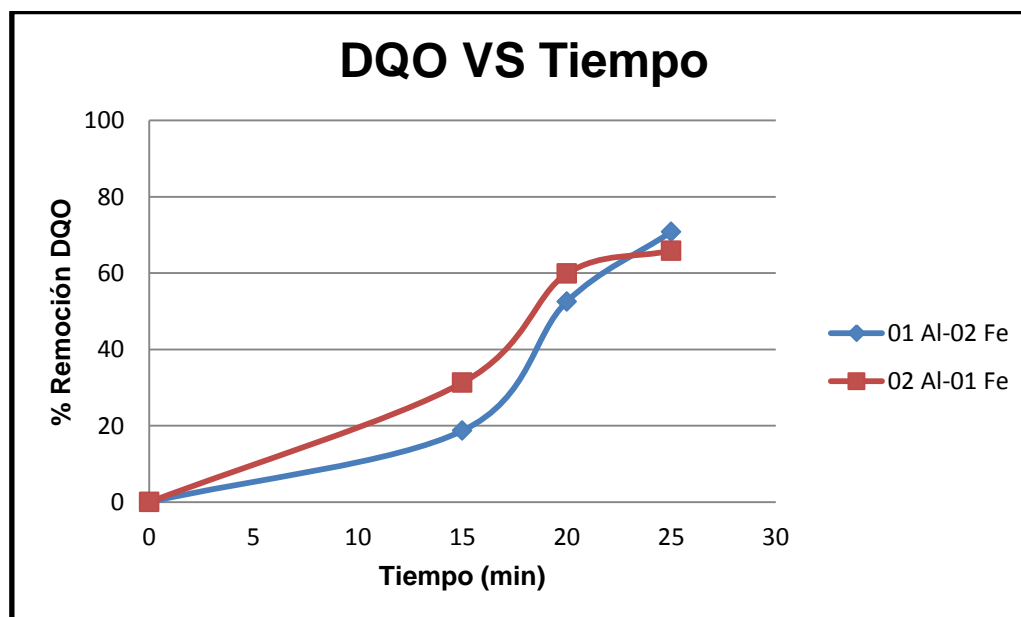


Figura 33. Remoción de DQO de la densidad de corriente óptima

Tabla 21
Remoción de SST de la densidad de corriente óptima

N° Caso	Tiempo (min)	SST (mg/l)	% De Remoción
	0	338.3	0.00
01 Al-02 Fe	15	190.4	43.72
	20	125.1	63.02
	25	62.7	81.47
	15	154.0	54.48
02 Al-01 Fe	20	112.2	66.83
	25	71.6	78.84

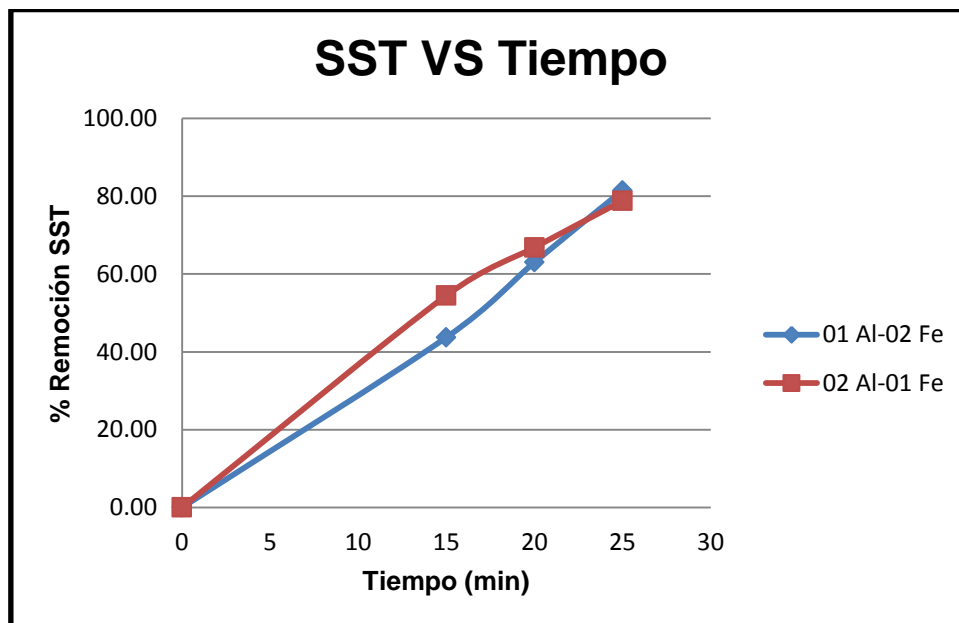


Figura 34. Remoción de SST de la densidad de corriente óptima

Tabla 22
Variación de pH de la densidad de corriente óptima

N° Caso	Tiempo (min)	pH
	0	7.07
	15	7.29
01 Al-02 Fe	20	7.47
	25	7.55
	15	7.55
02 Al-01 Fe	20	7.64
	25	7.80

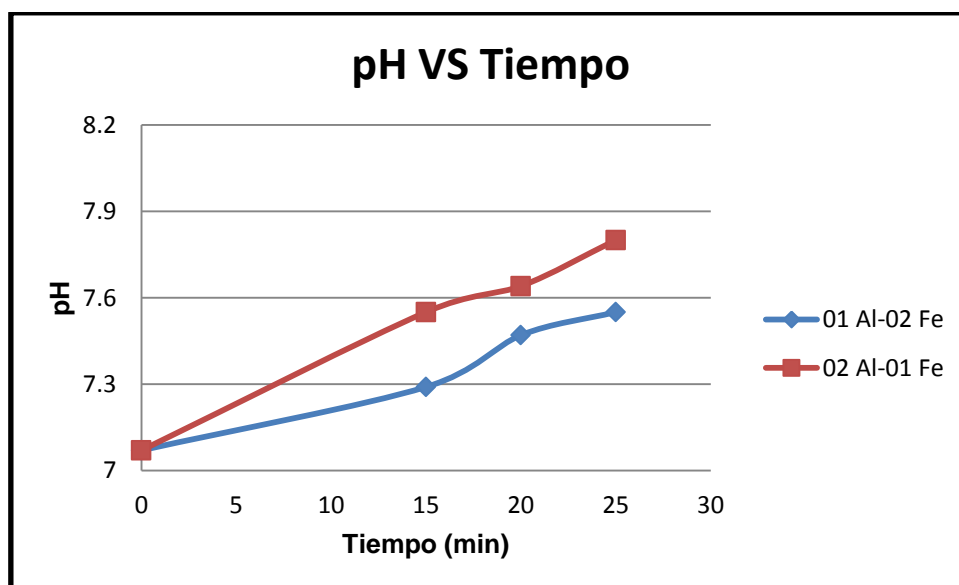


Figura 35. Comportamiento del pH de la densidad de corriente óptima

Tabla 23
Variación de Conductividad de la densidad de corriente óptima

N° Caso	Tiempo (min)	Conductividad (uS/cm)
	0	1384
	15	1292
01 Al-02 Fe	20	1251
	25	1232
	15	1276
02 Al-01 Fe	20	1205
	25	1199

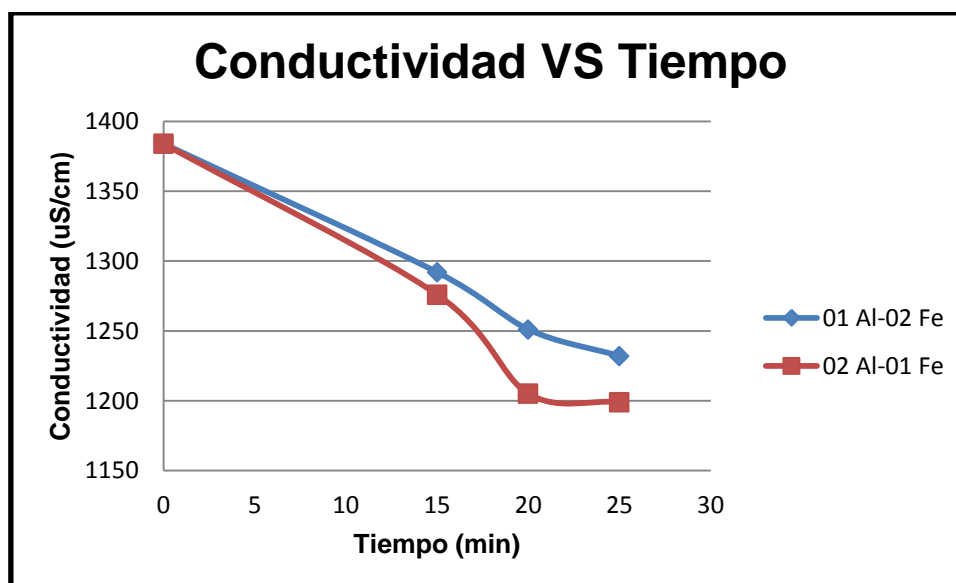


Figura 36. Comportamiento de la Conductividad respecto al tiempo

Tabla 24
Masa Perdida de los electrodos del ánodo

Corriente (A)	Tiempo (min)	Masa Perdida (g)
	0	0.000
	15	0.588
7	20	0.783
	25	0.979
	15	0.672
8	20	0.895
	25	1.119
	15	0.755
9	20	1.007
	25	1.259

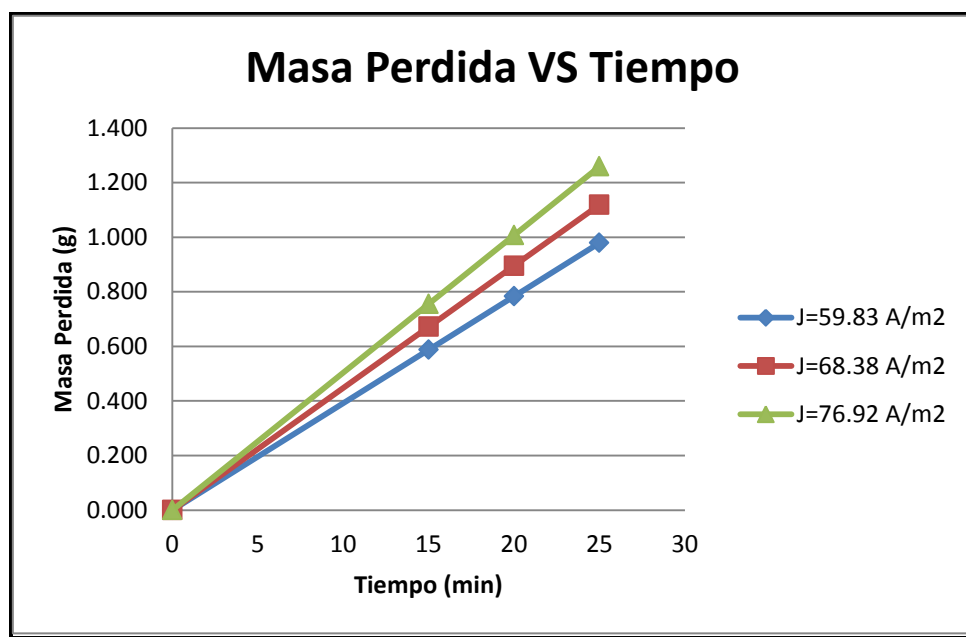


Figura 37. Peso perdido en el proceso por lotes

A continuación se muestran imágenes, la planta de tratamiento de aguas residuales de la compañía GLORIA.



Figura 38. Tanque Ecuilizador, Planta GLORIA-Huachipa



Figura 39. Tanque Primario (Coagulación-Floculación)



Figura 40. Flotación por aire disuelto (DAF)



Figura 41. Tanque Clorinador



Figura 42. Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR)-GLORIA

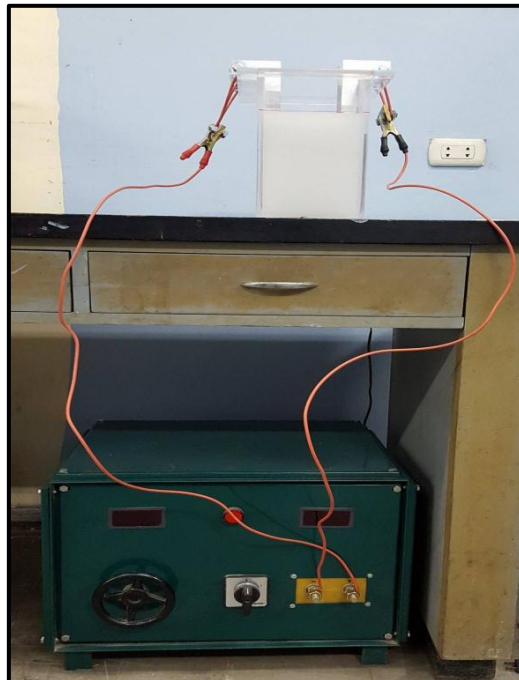


Figura 43. Muestra inicial antes del proceso de Electrocoagulación

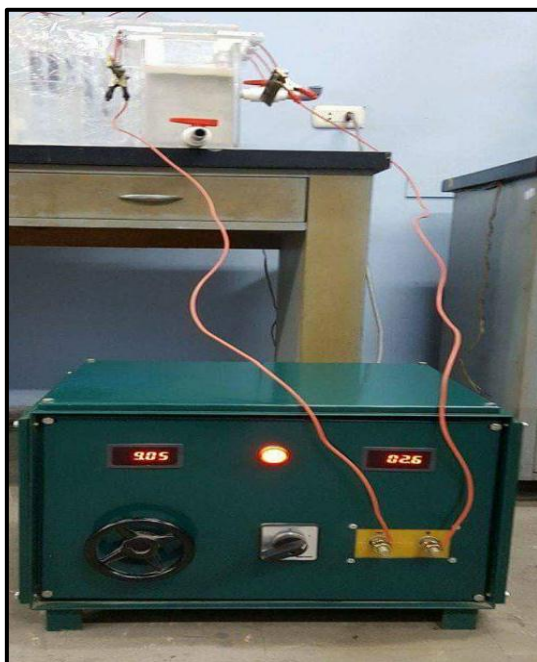


Figura 44. Durante el proceso de Electrocoagulación



Figura 45. Vista frontal de remoción de aceites – grasas



Figura 46. Filtración de muestras obtenidas del reactor por lotes



Figura 47. Viales de análisis de DQO

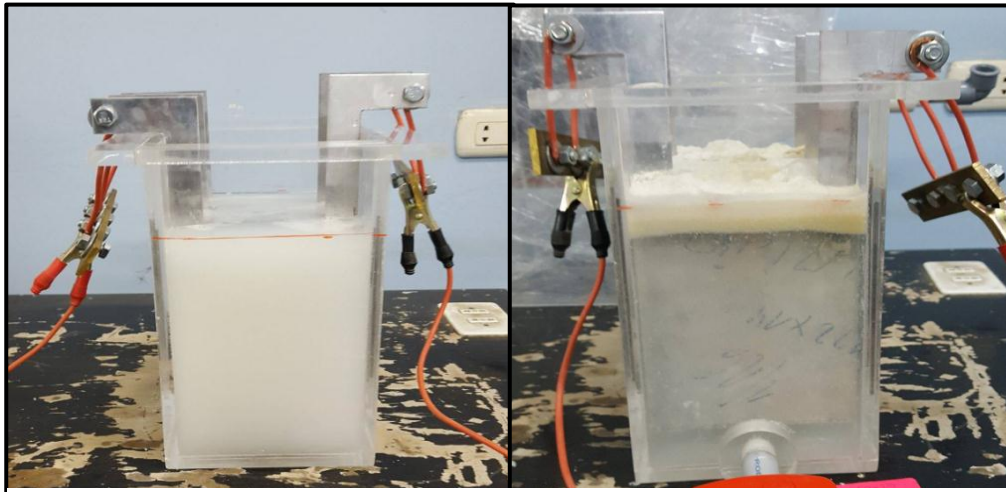


Figura 48. Muestra inicial y final del proceso de electrocoagulación

CAPÍTULO 4

EVALUACIÓN ECONÓMICA

En la evaluación económica del proyecto de Tesis, el costo de tratamiento en el proceso de electrocoagulación está asociado a dos factores principales que son el consumo de corriente eléctrica y la reposición de los electrodos después de su corrosión.

Según las fuentes bibliográficas el consumo de energía es menor que el tratamiento físico-químico, además no necesita adición de coagulantes y polímeros sintéticos, estos en un tratamiento convencional incrementan los costos de tratamiento. También los electrodos de sacrificio son de bajo costo, por lo tanto resulta que los costos para implementar el tratamiento con la electrocoagulación son económicamente viables.

Se instaló un rectificador que permite convertir la corriente alterna en continua el cual nos permite obtener el consumo de energía de la red fiable e ininterrumpida en la celda de electrocoagulación. Para lo cual se realizó mediciones de amperaje y voltaje luego se tomaron valores de costo por Kwh con la tarifa de electricidad vigente en el país. Otro aspecto a considerar es la reposición de los electrodos de fierro y aluminio, el cual se cambian generalmente después de 6 meses y son costo bajo en el mercado.

4.1. Consumo de energía

El consumo energético por la celda de electrocoagulación se halló utilizando la siguiente formula:

$$E = \frac{V \cdot I \cdot t}{Q} \quad (4.1)$$

Dónde:

E: Consumo energético por volumen de agua residual tratada en Kwh/m³

V: Voltaje aplicado, en V.

I: Corriente aplicada, en A.

t: Tiempo de tratamiento, en h.

Q: Volumen del efluente tratado, en m³.

Es bueno acotar que se eligió estos valores ya que la diferencia de porcentajes de remoción era mínima, optando por un amperaje de 8 amperios, dejando de lado utilizar 9 amperios ya que implicaría mayor consumo energético.

Tabla 25
Parámetros en evaluación económica (J=59.83 A/m²)

Parámetros	Valores
Voltaje (v)	1.3
Amperímetro (A)	7
Tiempo (min)	25
Volumen (L)	5

Luego realizando la conversión para el reemplazo en la fórmula (5.1), se obtiene el siguiente valor:

Energía consumida = 0.758 Kwh/m³

Si asumimos la tarifa cobrada por una de las empresas eléctricas que es

S/. 0.48 por Kwh, nos arrojaría un costo de **0.364 S/. / m³**

Tabla 26
Parámetros en evaluación económica (J=68.38 A/m²)

Parámetros	Valores
Voltaje (v)	1.5
Amperímetro (A)	8
Tiempo (min)	25
Volumen (L)	5

De manera análoga, reemplazando en la fórmula (5.1):

Energía consumida = 1.000 Kwh/m³

Si asumimos la tarifa cobrada por una de las empresas eléctricas que es

S/. 0.48 por Kwh, nos arrojaría un costo de **0.480 S/. / m³**.

Tabla 27
Parámetros en evaluación económica (J=76.92 A/m²)

Parámetros	Valores
Voltaje (v)	1.6
Amperímetro (A)	9
Tiempo (min)	25
Volumen (L)	5

De manera análoga:

Energía consumida = 1.200 Kwh/m³

Si asumimos la tarifa cobrada por una de las empresas eléctricas que es

S/. 0.48 por Kwh, nos arrojaría un costo de **0.576 S/. / m³**.

ANÁLISIS DE RESULTADOS

- Las condiciones óptimas que permiten obtener los mayores porcentajes de remoción de Turbiedad como tratamiento de las aguas residuales de la industria láctea a un pH de 7 a 8, a una densidad de corriente eléctrica de 68,38 A/m² y un tiempo de 25 minutos, da un valor de 82.94% de remoción, el cual es muy aceptable; también a una densidad de corriente de 76.92 A/m² y 25 minutos, da un valor mayor de 85.66 % de remoción, el cual también es muy aceptable.
- Durante el proceso de electrocoagulación de aguas residuales de la industria láctea se observa un aumento del pH de la solución acuosa; este aumento está entre 0.5 y 1 unidad. Adicionalmente, la conductividad del medio acuoso presenta una disminución durante todo el tratamiento debido a la interacción de iones disueltos con los contaminantes (coloides, materia orgánica, aceites y grasas).

CONCLUSIONES

- En esta investigación se demostró que la electrocoagulación se aplica con éxito en el tratamiento de efluentes del sector lácteo ya que remueve en gran porcentaje las materias coloidales, aceites y grasas, siendo una técnica alternativa viable para su aplicación en el país.
- Usando ánodos de aluminio, se obtuvo un alto porcentaje de remoción de Aceites y Grasas presentes en este tipo de agua residual industrial con un pH 7-8, unas densidades de corriente de 68,38 A/m² y 76.92 A/m² ambos con un tiempo de residencia de 25 minutos. Estas condiciones de operación permiten obtener un porcentaje de remoción del 65.89 % y 70.30% respectivamente, con lo cual se cumple la normativa ambiental el D.S. N° 021-2015-Vivienda.
- Es importante señalar que a un pH de 7 a 8, las densidades de corriente de 68,38 A/m² y 76.92 A/m², se observó una remoción de turbiedades casi similares 82.94% y 85.66% respectivamente, siendo la de mayor valor la que se descartó, ya que influiría en un aumento de costos de operación y mantenimiento (OPEX) por el gasto de energía.
- Las prueba realizadas en laboratorio nos permiten concluir que las mejores condiciones para obtener una alta eficiencia en la remoción de DQO a densidades de corriente de 68,38 A/m² y 76.92 A/m², permitieron obtener un porcentaje de remoción de 72.20% de 75.38%.
- En el ánodo: usando arreglos de electrodos de aluminio y fierro, nos permiten concluir en esta investigación que no existe **Sinergia** en el proceso de electrocoagulación ya que los parámetros fisicoquímicos no difieren mucho comparados usando sólo electrodos de aluminio.

RECOMENDACIONES

- Realizar pruebas con pH ácidos o alcalinos para poder verificar si con esa agua residual hay un mayor porcentaje de remoción de los parámetros fisicoquímicos.
- Ensayar con arreglos de electrodos pero de diferentes materiales ya sea acero inoxidable, cobre, bronce, etc; ya que podría generarse una sinergia y por consiguiente un ahorro de energía.
- Realizar algún tipo de tratamiento al lodo producido en el proceso y así generar una mejor disposición de ello para que finalmente genere un menor impacto ambiental.

GLOSARIO

Aceites y Grasas: Son aquellas sustancias de naturaleza lipídica, que al ser no mezclarse con el agua, van a permanecer en la superficie debido a su densidad menor que la del agua.

Acidez: capacidad de una solución acuosa para reaccionar con iones hidroxilo. Se mide cuantitativamente por titulación con una solución alcalina normalizada se expresa como calcio en mg/l.

Afluente: Agua residual u otro líquido que ingresa a reservorio o proceso de tratamiento.

Aguas crudas: Agua que no ha sido sometida a un tratamiento para disminuir sus contaminantes.

Agua residuales: Agua que contiene material disuelto y en suspensión luego de ser usada por comunidad o industria.

Aireación: Proceso de transferencia de masa, generalmente referido a la transferencia de oxígeno al agua por medios naturales (flujo natural o cascada) o artificial (agitación mecánica o difusión de aire comprimido).

Ambiente aerobio: Proceso que requiere o no es destruido por presencia de oxígeno.

Análisis: Examen del agua residual o lodos, efectuado por un laboratorio.

Bacteria: Grupo de organismos microscópicos unicelulares rígidos carentes de clorofila que desempeñan una serie de procesos de tratamiento que incluyen oxidación biológica fermentación, digestión nitrificación y desnitrificación.

Biodegradación: Degradación de la materia orgánica por acción de microorganismos sobre el suelo aire cuerpos de agua receptores o procesos de tratamiento de aguas residuales.

Carga orgánica: Producto de la concentración media de la DBO por el caudal medio determinado en el mismo sitio; se expresa en Kg/día.

Concentración: Denomínese concentración a la relación entre peso y volumen del líquido que contiene.

Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO): Es un parámetro que mide la cantidad de oxígeno consumido al degradar la materia orgánica de una muestra líquida.

Demanda Química de Oxígeno (DQO): Es un parámetro que mide la cantidad de sustancias tanto orgánicas como inorgánicas aptos para ser oxidados por medios químicos.

Eficiencia del tratamiento: Relación entre masa o concentración removida y masa o concentración del efluente para un proceso o planta de tratamiento y un parámetro específico generalmente se expresa en porcentaje.

Efluente: Líquido que sale del proceso de tratamiento. Es cualquier forma de agua que se haya contaminado durante un proceso industrial o doméstico, incluyendo aguas negras y productos derivados de una fábrica o actividad del hombre.

Lodo: Lodo excedente que se genera en procesos de tratamiento de aguas residuales.

Muestreo puntual: Muestra tomada al azar en un cuerpo receptor y a una hora determinada para el examen de un parámetro que normalmente no puede preservarse.

Oxígeno disuelto: Cantidad de oxígeno medida en un líquido por debajo de saturación.

pH: logaritmo con signo negativo de concentración de iones de hidrógeno en moles por litro.

Planta piloto: Planta de tratamiento a escala de laboratorio o técnica que sirve para estudio de cómo tratar un desecho líquido o diluido de constantes cinéticas y parámetros de diseño del proceso.

Sedimentación: Proceso de clarificación de las aguas residuales mediante la precipitación de materia orgánica o materia putrescible.

Sólidos Suspendidos Totales (SST): Indica la cantidad de sólidos, presentes en suspensión y que pueden ser separados por medios mecánicos (filtros).

Tanque de aireación: Cámara usada para inyectar aire dentro del agua.

Tiempo Retención Hidráulica: Tiempo medio que se demora las partículas de agua en un proceso de tratamiento usualmente se expresa como razón entre caudal y volumen útil.


Turbiedad: Es una forma indirecta de medir la concentración de las partículas suspendidas en un líquido; mide el efecto de la dispersión de estas partículas.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.

- Andía, C. (2000). Evaluación de Plantas y Desarrollo Tecnológico. *Tratamiento de agua: Coagulación-Floculación.SEDAPAL*.
- Arango, A. (2012). Efectos del pH y la conductividad en la electrocoagulación de aguas residuales de la industria láctea. *Producción más limpia*, 59-67.
- Arango, A., & Garcés, L. (2007). Diseño de una celda de electrocoagulación para el tratamiento de aguas residuales de la industria. *REVISTA Universidad EAFIT*, 56-67.
- Butler, E., Yung-Tse, H., Yu-Li, R., & Al Ahmad, M. (2011). Electrocoagulation in Wastewater Treatment. *Water*, 495-525.
- Camci, S., & Akbal, F. (2011). Chromium and nickel removal from metal plating wastewater by electrocoagulation. *Desalination*, 214-222.
- Cañizares, P., García, J., Lobato, J., & Rodrigo, M. (2004). El tratamiento electroquímico en la depuración de efluentes industriales líquidos. *Ingeniería Química*, 188-206.
- Cañizares, P., Jiménez, C., Lobato, J., Martínez, F., & Rodrigo, A. (2007). Study of the Electrocoagulation Process Using Aluminum and Iron Electrodes. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 6189-6195.
- Chen, G. (2004). Electrochemical technologies in wastewater Treatment. *Separation and Purification Technology*, 38, 11-41.
- La Cueva, C. (2010). Descontaminación de aguas residuales por electrólisis en continuo. *Sistema de electrocoagulación* , 189.
- Lekhlif, B., Oudrhiri, L., Zidane, F., Drogui, P., & Blais F. (2014). Study of the electrocoagulation of electroplating industry wastewaters charged by nickel (II) and chromium (VI). *J. Mater. Environ. Sci*, 111-120.
- Levenspiel, O. (2001). *Ingeniería de las reacciones químicas*. España: Editorial Reverte S.A.
- Liu, H., Zhao, X., & Qu, J. (2010). Electrocoagulation in Water Treatment. *Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences*, 245-261.
- López, P., & Harnisth, A. (2016). Electrocoagulación de aguas residuales de la industria láctea. *Enfoque Universidad Tecnológica de Ecuador*, 13-21.
- Mansouri, K., Ibrik, K., & Abdel-Wahab, A. (2011). Anodic Dissolution of Pure Aluminum during Electrocoagulation Process: Influence of Supporting Electrolyte, Initial pH, and Current Density. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 13662-13672.
- Martínez, F. (2008). Tratamiento de aguas residuales industriales mediante electrocoagulación y coagulación convencional. *Universidad de Castilla-La Mancha*, 19-44.


- Nemerow, N., & Dasgupta, A. (2009). *Tratamiento de vertidos industriales y peligrosos*. Madrid, España: Ediciones Díaz de Santos.
- Reátegui, W., & Westres, R. (2013). Remoción de metales pesados de un efluente industrial. *Industria Química*, 62-67.
- Reátegui, W., Florencio, K., & King, M. (2015). Tratamiento del agua residual procedente del lodo de perforación del pozo petrolero Peruano Bretaña norte 95-2-1. *Industria Química*, 88-94.
- Restrepo, A., Arango, Á., & Garcés, L. (2006). La Electrocoagulación: retos y oportunidades en el tratamiento de aguas. *Producción más Limpia*, 58-77.
- Systems, G. W. (2010). Sistema de tratamiento para las aguas residuales mediante la tecnología de electrocoagulación. *Innovaciones que crean futuro*, 3-5.
- Yousuf, M., Schennach, R., Parga, J., & Cocke, D. (2001). Electrocoagulation (EC) - Science and applications. *Journal of Hazardous Materials*, 29-41.

ANEXOS



Environmental Testing Laboratory S.A.C.

LABORATORIO DE ENSAYO ACREDITADO POR EL ORGANISMO
PERUANO DE ACREDITACION INACAL - DA
CON REGISTRO N° LE-056



INACAL
DA - Perú
Laboratorio de Ensayo
Acreditado
Registro N° LE-056

INFORME DE ENSAYO N° 171456 CON VALOR OFICIAL

Nombre del Cliente : **SERGIO MORALES QUEVEDO**
 Dirección : Jr. Pedro Helms Mz. Z Lt. 41 Villa Norte - Los Olivos
 Solicitado Por : Sergio Morales
 Referencia : Cotización N° 04066-17
 Proyecto : Electrocoagulación
 Procedencia : Reservado por el Cliente
 Muestreo Realizado Por : Sergio Morales
 Cantidad de Muestra : 16
 Producto : Agua Residual
 Fecha de Recepción : 2017/05/15
 Fecha de Ensayo : 2017/05/15 al 2017/05/30
 Fecha de Emisión : 2017/05/30

La muestra fue recepcionada en buenas condiciones.

I. Resultados

Código de Laboratorio	171456-01	171456-02	171456-03	171456-04	171456-05	171456-06		
Código de Cliente	AYG-0	AYG-1	AYG-2	AYG-3	AYG-4	AYG-6		
Fecha de Muestreo	15/05/2017	12/05/2017	12/05/2017	12/05/2017	12/05/2017	12/05/2017		
Hora de Muestreo (h)	14:00	09:30	10:00	10:30	11:00	11:30		
Tipo de Producto	Agua Residual	Agua Residual	Agua Residual	Agua Residual	Agua Residual	Agua Residual		
Tipo Ensayo	Unidad	L.C.M.	Resultados					
Fisicoquímicas								
Acetres y Grasas	mg/L	0,5 ¹⁰	172,7	148,9	74,0	72,1	138,8	124,5

Leyenda: L.C.M. = Límite de cuantificación del método; L.D.M. = Límite de detección del método; ¹⁰ Mayor que el L.C.M. o L.D.M. indicado ¹¹ Resultado cuantificable; ¹² No Analizado; ¹³ Mayor al rango lineal permitido por la técnica analítica ¹⁴ Límite de Detección de Método.

Código de Laboratorio	171456-07	171456-08	171456-09	171456-10	171456-11	171456-12		
Código de Cliente	AYG-6	AYG-7	AYG-8	AYG-9	AYG-10	AYG-11		
Fecha de Muestreo	12/05/2017	12/05/2017	12/05/2017	12/05/2017	12/05/2017	12/05/2017		
Hora de Muestreo (h)	12:00	12:30	15:00	15:30	16:00	16:30		
Tipo de Producto	Agua Residual	Agua Residual	Agua Residual	Agua Residual	Agua Residual	Agua Residual		
Tipo Ensayo	Unidad	L.C.M.	Resultados					
Fisicoquímicas								
Acetres y Grasas	mg/L	0,5 ¹⁰	55,9	131,0	121,5	51,3	169,3	86,0

Leyenda: L.C.M. = Límite de cuantificación del método; L.D.M. = Límite de detección del método; ¹⁰ Mayor que el L.C.M. o L.D.M. indicado ¹¹ Resultado cuantificable; ¹² No Analizado; ¹³ Mayor al rango lineal permitido por la técnica analítica ¹⁴ Límite de Detección de Método.

Código de Laboratorio	171456-13	171456-14	171456-15	171456-16		
Código de Cliente	AYG-12	AYG-13	AYG-14	AYG-15		
Fecha de Muestreo	12/05/2017	12/05/2017	12/05/2017	12/05/2017		
Hora de Muestreo (h)	17:00	17:30	18:00	18:30		
Tipo de Producto	Agua Residual	Agua Residual	Agua Residual	Agua Residual		
Tipo Ensayo	Unidad	L.C.M.	Resultados			
Fisicoquímicas						
Acetres y Grasas	mg/L	0,5 ¹⁰	43,8	92,8	63,1	61,8

Leyenda: L.C.M. = Límite de cuantificación del método; L.D.M. = Límite de detección del método; ¹⁰ Mayor que el L.C.M. o L.D.M. indicado ¹¹ Resultado cuantificable; ¹² No Analizado; ¹³ Mayor al rango lineal permitido por la técnica analítica ¹⁴ Límite de Detección de Método.

FO-LAB-54
F.8. 04/09
F.9. 7/04/16

Calle B Mz C lote 40 Urb. Panamericana - Lima 31° - Perú, Central Telefónica (511) 522-3758 / 523-1828
info@envirotest.com.pe / www.envirotest.com.pe

Página 1 de 2

INFORME DE ENSAYO N° 171456 CON VALOR OFICIAL

II - Métodos y Referencias

Tipo Ensayo	Norma Referencia	Título
Fisicoquímicos		
Aceites y Grasas	SM 5520-B, 22nd. Ed. 2012	Oil and Grease. Liquid-Liquid, Partition-Gravimetric Method

SIGLAS: *SM* Standard methods for the examination of Water and Wastewater APHA, AWWA, WEF 22nd Ed. 2012



Alfonso Vilca M.
 GCSSA
 C.Q.P. N° 587

Los resultados presentados corresponden sólo a la muestra indicada, según la cadena de custodia correspondiente.

Estos resultados no deben ser utilizados como una certificación de conformidad con normas del producto.

El tiempo de custodia de la muestra es de un mes calendario desde el ingreso de la muestra al Laboratorio.

El tiempo de perecibilidad de la muestra está en función a lo declarado en los métodos normalizados de ensayo y rige desde la toma de muestra.

Está prohibido la reproducción parcial del presente documento, salvo autorización de Envirotest S.A.C.

** FIN DEL INFORME **

Oficina Comercial:
Parque Manuel González Prada 705
Magdalena del Mar, Lima 17 – Perú
Tel. (511) 204 5700
Administración de ventas: (51) 998 371 386
ventas@aqaquimica.com

Oficina Administrativa:
Av. General Garzón
Jesús María, Lima 11 - Perú
Tel: (511) 512 2500
www.aqaquimica.com



Caracterización del efluente.

PARÁMETRO	UNIDAD	RESULTADO
pH	----	7.07
Demandas Química de Oxígeno (DQO)	mg/L	2860
Sólidos Suspendidos Totales (SST)	mg/L	338.3
Aceites y Grasas (A y G)	mg/L	172.7
Conductividad	Us/cm	1384
Turbiedad	NTU	2274

Oficina Comercial:
Parque Manuel González Prada 705
Magdalena del Mar, Lima 17 – Perú
Tel. (511) 204 5700
Administración de ventas: (51) 998 371 386
ventas@aqaquimica.com

Oficina Administrativa:
Av. General Garzón
Jesús María, Lima 11 - Perú
Tel: (511) 512 2500
www.aqaquimica.com



Resultados de la Turbiedad.

Corriente (A)	Tiempo (min)	Turbiedad (NTU)
	15	1850
7	20	683
	25	579
	15	1724
8	20	527
	25	388
	15	1607
9	20	492
	25	326

N° Caso	Tiempo (min)	Turbiedad (NTU)
	15	1987
01 Al-02 Fe	20	470
	25	372
	15	1359
02 Al-01 Fe	20	531
	25	425

Oficina Comercial:
Parque Manuel González Prada 705
Magdalena del Mar, Lima 17 – Perú
Tel. (511) 204 5700
Administración de ventas: (51) 998 371 386
ventas@aqaquimica.com

Oficina Administrativa:
Av. General Garzón
Jesús María, Lima 11 - Perú
Tel: (511) 512 2500
www.aqaquimica.com



Resultados de Sólidos Suspendidos Totales (SST).

Corriente (A)	Tiempo (min)	SST (mg/L)
	15	192.9
7	20	152.2
	25	94.8
	15	173.3
8	20	136.5
	25	78.2
	15	160.7
9	20	110.6
	25	65.1

N° Caso	Tiempo (min)	SST (mg/l)
	15	190.4
01 Al-02 Fe	20	125.1
	25	62.7
	15	154.0
02 Al-01 Fe	20	112.2
	25	71.6

Oficina Comercial:
Parque Manuel González Prada 705
Magdalena del Mar, Lima 17 – Perú
Tel. (511) 204 5700
Administración de ventas: (51) 998 371 386
ventas@aqaquimica.com

Oficina Administrativa:
Av. General Garzón
Jesús María, Lima 11 - Perú
Tel: (511) 512 2500
www.aqaquimica.com



Resultados del pH.

Corriente (A)	Tiempo (min)	pH
	15	7.29
7	20	7.47
	25	7.55
	15	7.55
8	20	7.64
	25	7.80
	15	7.85
9	20	7.96
	25	8.01

N° Caso	Tiempo (min)	pH
	15	7.29
01 Al-02 Fe	20	7.47
	25	7.55
	15	7.55
02 Al-01 Fe	20	7.64
	25	7.80

Oficina Comercial:
Parque Manuel González Prada 705
Magdalena del Mar, Lima 17 – Perú
Tel. (511) 204 5700
Administración de ventas: (51) 998 371 386
ventas@aqaquimica.com

Oficina Administrativa:
Av. General Garzón
Jesús María, Lima 11 - Perú
Tel: (511) 512 2500
www.aqaquimica.com



Resultados de la Conductividad (uS/cm).

Corriente (A)	Tiempo (min)	Conductividad (uS/cm)
	15	1299
7	20	1281
	25	1242
	15	1282
8	20	1274
	25	1239
	15	1250
9	20	1234
	25	1213

N° Caso	Tiempo (min)	Conductividad (uS/cm)
	15	1292
01 Al-02 Fe	20	1251
	25	1232
	15	1276
02 Al-01 Fe	20	1205
	25	1199

Oficina Comercial:
Parque Manuel González Prada 705
Magdalena del Mar, Lima 17 – Perú
Tel. (511) 204 5700
Administración de ventas: (51) 998 371 386
ventas@aqaquimica.com

Oficina Administrativa:
Av. General Garzón
Jesús María, Lima 11 - Perú
Tel: (511) 512 2500
www.aqaquimica.com



Ante todo expongo que estos análisis de laboratorio tienen validez, ya que fueron elaborados con los procedimientos respectivos.



Ing. Guillermo Marchena.
Supervisor de Laboratorio