

**TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DEL PROCESO DE DESENGRASE
DE AUTOPARTES CON FINES DE REUSO**

**SEBASTIÁN ARANGO GÓMEZ
ANDRÉS LÓPEZ GUTIÉRREZ**

Co-AUTOR: M.S.c. EDISON GILPAVAS

**UNIVERSIDAD EAFIT
ESCUELA DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA DE PROCESOS
MEDELLÍN
2008**

UNIVERSIDAD EAFIT

TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DEL PROCESO DE DESENGRASE DE AUTOPARTES CON FINES DE REUSO

**Trabajo de Grado para optar al título
Ingeniero de Procesos**

INVESTIGADORES:

**SEBASTIÁN ARANGO GÓMEZ
ANDRÉS LÓPEZ GUTIÉRREZ**

ASESOR-Coautor: M.Sc. Edison GilPavas

**DIRECTOR GRUPO DE INVESTIGACIÓN GIPAB
LÍNEA DE PROCESOS AVANZADOS DE OXIDACIÓN**

**UNIVERSIDAD EAFIT
ESCUELA DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA DE PROCESOS
MEDELLÍN
2008**

Nota de Aceptación

Firma Presidente del jurado

Firma del Jurado

Firma del Jurado

Ciudad y Fecha (día, mes, año)

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a las siguientes personas, por su colaboración, apoyo, asesoría y cordialidad, para lograr llevar a cabo este proyecto:

EDISON GILPAVAS, Director del grupo de investigación, profesor del departamento de Ingeniería de Procesos de la Universidad EAFIT, por su asesoría y dedicación para llevar a cabo este proyecto.

LUZ MARIA SIERRA MAYA, investigadora del GIPAB, por su colaboración.

EDGAR ARBELÁEZ, coordinador de los laboratorios de Ingeniería de Procesos de la Universidad EAFIT.

DIEGO ACOSTA, profesor del departamento de ingeniería de Procesos de la Universidad EAFIT.

JOHN JAIRO ESTRADA y SIGIFREDO CÁRDENAS, auxiliares de los laboratorios de Ingeniería de Procesos, por la colaboración prestada durante la realización del proyecto.

DIRECCIÓN DE INVESTIGACIÓN Y DOCENCIA UNIVERSIDAD EAFIT, por el apoyo financiero para la ejecución de este proyecto.

CONTENIDO

	Pág.
RESUMEN	13
ABSTRACT.....	15
INTRODUCCIÓN	16
1. OBJETIVOS.....	18
1.1. OBJETIVO GENERAL.....	18
1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	18
2. MARCO TEÓRICO	19
2.1. ELECTROQUÍMICA.....	19
2.2. ELECTRODEPOSICIÓN.....	19
2.3. ELECTROFLOTACIÓN.....	19
2.4. ELECTROOXIDACIÓN.....	20
2.5. ELECTROCOAGULACIÓN.....	21
2.6. AGUAS RESIDUALES DE UN PROCESO DE DESENGRASE DE AUTOPARTES	28
2.7. ANTECEDENTES DE LA ELECTROCOAGULACIÓN	29
2.7.1. Algunos antecedentes de la electrocoagulación en Colombia	29
2.7.2. Algunos antecedentes de la electrocoagulación en el Mundo.....	32
2.8. ESCALAMIENTO DEL PROCESO.....	39
2.8.1. Métodos de escalamiento y similitudes.	39
2.8.2. Tamaño de reactor y similitud geométrica.....	40
2.8.3. Mecánica de fluidos y similitud cinemática.	40

2.8.4.	Distribución de la concentración y similitud química.....	40
2.8.5.	Distribución de corriente y similitud eléctrica.....	40
2.8.6.	Transferencia de calor y similitud térmica.....	41
3.	DESCRIPCIÓN DEL EFLUENTE	42
4.	METODOLOGÍA	44
4.1.	MATERIALES Y EQUIPOS	46
4.1.1.	Reactivos	46
4.1.2.	Equipos:.....	46
4.2.	ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DE LA CELDA DE ELECTROCOAGULACIÓN.....	47
4.3.	MÉTODOS ANALÍTICOS	48
4.3.1.	Método de Medición de Grasas y Aceites	48
4.3.2.	Medición de la Demanda Química de Oxígeno (DQO).....	49
4.3.3.	Medición de la Demanda Biológica de Oxígeno (DBO ₅).....	50
4.3.4.	Medición de Hierro total.....	51
4.3.5.	Medición de Aluminio.	52
4.3.6.	Medición de surfactantes aniónicos.....	53
4.3.7.	Medición de Carbono Orgánico Total (COT).....	55
5.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.	56
5.1.	DISEÑO DE EXPERIMENTOS DE LOS ENSAYOS PRELIMINARES ...	56
5.2.	ANÁLISIS DE LOS ENSAYOS PRELIMINARES DEL DISEÑO DE EXPERIMENTOS.....	58
5.2.1.	Análisis de Varianza.....	58

5.2.2.	Diagrama de pareto.....	59
5.2.3.	Efecto de la interacción entre las variables.....	60
5.2.4.	Gráfica de superficie de respuesta estimada.....	61
5.2.5.	Gráfica de efectos principales para el % de remoción de grasas.	62
5.2.6.	Condiciones óptimas.	63
5.3.	DISEÑO DE EXPERIMENTOS DE LOS ENSAYOS FINALES.....	64
5.4.	ANÁLISIS DEL DISEÑO DE EXPERIMENTOS.....	66
5.4.1.	Análisis de Varianza.....	66
5.4.2.	Diagrama de Pareto.....	67
5.4.3.	Efecto de interacción entre las variables.....	67
5.4.4.	Gráfica de superficie de respuesta estimada.....	69
5.4.5.	Gráfica de efectos principales para el % de remoción de grasas.	69
5.5.	EFFECTO DEL pH, TEMPERATURA ,CONDUCTIVIDAD DENSIDAD DE CORRIENTE, SEPARACIÓN ENTRE ELECTRODOS Y TIPO DE ELECTRODO.....	71
5.5.1.	pH.....	71
5.5.2.	Temperatura.....	72
5.5.3.	Conductividad.....	72
5.5.4.	Densidad de corriente.....	73
5.5.5.	Distancia entre electrodos.....	73
5.5.6.	Tipo de electrodos.....	73
5.6.	CONDICIONES ÓPTIMAS DE OPERACIÓN.....	74
5.6.1.	Condiciones óptimas de operación.....	74

5.6.2.	Estudio cinético para las condiciones óptimas.....	75
5.6.2.1.	Estudio cinético para la remoción de grasas y aceites.....	75
5.6.2.2.	Estudio cinético para la DQO.....	78
5.6.2.3.	Análisis de remoción del Carbono Orgánico Total (COT).....	80
5.6.2.4.	Análisis de remoción surfactantes.....	80
5.6.2.5.	Análisis de Biodegradabilidad de la muestra.....	81
5.6.2.6.	Análisis de potencia.	82
5.6.3.	Estudio cinético alternativo.....	82
5.6.3.1.	Estudio cinético para la remoción de grasas y aceites.....	83
5.6.3.2.	Estudio cinético para la remoción de la DQO.	85
5.6.3.3.	Análisis de la remoción del Carbono Orgánico Total (COT).....	88
5.6.3.4.	Análisis de Remoción de surfactantes.	90
5.6.3.5.	Análisis de Biodegradabilidad de la muestra.....	90
5.6.3.6.	Análisis de hierro y aluminio.	91
5.6.3.7.	Análisis de potencia.	92
6.	ANÁLISIS ECONÓMICO PRELIMINAR.....	94
6.1.	ESCALAMIENTO DEL PROCESO.....	94
6.2.	COSTOS DE OPERACIÓN	96
6.2.1.	Costo de Materiales.....	98
6.2.2.	Costo de la Electricidad.....	99
6.2.3.	Costo de Mano de Obra.	100
6.2.4.	Costos fijos. Disposición final de lodos.....	101
6.3.	COSTO DE CAPITAL.....	102

6.4. COSTO TOTAL.....	104
6.5. ANÁLISIS DE RESULTADOS ECONÓMICOS.....	104
7. CONCLUSIONES.....	108
8. RECOMENDACIONES.....	110

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Esquema de una celda electroquímica.....	21
Figura 2. Celda de electrocoagulación con configuración monopolar en paralelo	23
Figura 3. Celda de electrocoagulación con configuración monopolar en serie.	23
Figura 4. Celda de electrocoagulación con configuración bipolar en paralelo	24
Figura 5. Efluente	43
Figura 6. Montaje de Electrocoagulación.....	47
Figura 7. Curva de calibración del hierro.....	52
Figura 8. Curva de calibración del aluminio.	53
Figura 9. Diagrama de Pareto.....	59
Figura 10. Efecto de la interacción pH-tipo de electrodo en el proceso de remoción de Grasas.....	61
Figura 11. Gráfica de superficie de respuesta estimada.....	62
Figura 12. Efectos principales para la remoción de grasas.	63
Figura 13. Diagrama de Pareto. Ensayos finales del diseño de experimentos.	67
Figura 14. Efecto de la interacción Distancia entre electrodos-Voltaje en el proceso de remoción de Grasas.....	68
Figura 15. Gráfica de superficie de respuesta estimada.....	69
Figura 16. Efectos principales para el % de remoción de grasas.	70
Figura 17. Remoción de grasas y aceites en el tiempo.....	76
Figura 18. Método de integración cinética de segundo orden para la remoción de grasas y aceites.	77
Figura 19. Remoción de la DQO en el tiempo.....	78
Figura 20. Método de integración cinética de segundo orden para la remoción de la DQO.....	79
Figura 23. Remoción de grasas y aceites en el tiempo.....	84

Figura 24. Método de integración cinética de segundo para la remoción de grasas y aceites.....	85
Figura 25. Remoción de la DQO en el tiempo.	86
Figura 26. Método de integración cinética de segundo orden para la remoción de DQO.....	87
Figura 27. Remoción del COT en el tiempo.....	88
Figura 28. Método de integración cinética de segundo orden para la remoción de COT.	89

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Investigaciones de la electrocoagulación en Colombia	29
Tabla 2. Investigaciones de la Electrocoagulación en el Mundo	32
Tabla 3. Caracterización del Efluente	42
Tabla 4. 1ª Extracción de MBAS.....	54
Tabla 5. 2ª Extracción MBAS.....	54
Tabla 6. Variables del diseño de experimentos. Ensayos preliminares	57
Tabla 7. Ensayos preliminares del diseño de experimentos.....	57
Tabla 8. Tabla ANOVA para la remoción de grasas. Ensayos preliminares..	58
Tabla 9. Variables del diseño de experimentos. Ensayos finales.....	64
Tabla 10. Ensayos finales del diseño de experimentos.....	65
Tabla 11. Tabla ANOVA para la remoción de grasas.	66
Tabla 12. Variación de la concentración de grasas y aceites en el tiempo....	75
Tabla 13. Variación de la DQO en el tiempo.....	78
Tabla 14. Variación del COT en el tiempo.	80
Tabla 15. Variación de la concentración de surfactantes en el tiempo.	80
Tabla 16. Datos de biodegradabilidad	81
Tabla 17. Variación de la concentración de grasas y aceites en el tiempo....	83
Tabla 18. Variación de la DQO en el tiempo.....	86
Tabla 19. Variación del COT en el tiempo.	88
Tabla 20. Variación de la concentración de surfactantes en el tiempo.	90
Tabla 21. Datos de biodegradabilidad	91
Tabla 22. Cuantificación de hierro y aluminio disuelto.....	92
Tabla 23. Información para el cálculo del costo de operación.....	97
Tabla 24. Consumo de electrodos.	98
Tabla 25. Depreciación de los equipos	103
Tabla 26. Tabla de Evaluación de Costos.	107

RESUMEN

Este estudio presenta los resultados obtenidos al utilizar la electrocoagulación con el fin de reducir las grasas y aceites, la demanda química de oxígeno, el carbono orgánico total, surfactantes y aumentar la biodegradabilidad de aguas residuales provenientes de un proceso de desengrase de autopartes, de una planta ensambladora de autos de la ciudad de Medellín. Se utilizaron cuatro electrodos conectados en paralelo, configuración bipolar, usando hierro como electrodo de sacrificio y aluminio como cátodo. Se realizaron ensayos preliminares con pH de 4, 8 y 12, además se evaluaron dos combinaciones de electrodos Al-Fe y Fe-Al, esto con el fin de dejar fijas estas variables para los ensayos experimentales finales.

Los experimentos se programaron con ayuda del software estadístico Statgraphics 5.1. Se utilizó un diseño de experimentos multivariable, donde se estudiaron los factores voltaje, pH y distancia entre electrodos, y la variable de respuesta, la remoción de grasas y aceites. Se determinaron las condiciones óptimas: voltaje 13.2, pH 12, distancia entre electrodos de 1.5 cm, y el tiempo de operación fue de tres horas.

Se realizó un estudio cinético con las condiciones óptimas de operación y se obtuvieron los porcentajes de remociones: grasas y aceites 94.96%, DQO 87.44%, COT 70.59%, surfactantes aniónicos 25.62% y se alcanzó un valor de la biodegradabilidad de 0.54. Adicionalmente, con el fin de reducir costos en el consumo de energía del proceso, se realizó un estudio cinético alternativo con pH 12, separación entre electrodos 2 cm, ánodo hierro, cátodo aluminio, 5 voltios, en el cual se obtuvieron los porcentajes de remociones: grasas y aceites 90.57%, DQO 81.93%, COT 50%, surfactantes aniónicos 20.38% y se alcanzó un valor de la biodegradabilidad de 0.56.

Palabras Claves: Electroquímica, electrocoagulación, aguas residuales aceitosas, DQO, COT, reactor electroquímico, tratamiento de aguas residuales.

ABSTRACT

This project presents the results obtained in a wastewater treatment study, where electrocoagulation is used to remove the chemical oxygen demand (COD), total organic carbon (TOC), and grease. The wastewater comes from an auto parts degreasing process, in an automotive assembly plant, at Medellin, Colombia. For this study, the following setup was utilized: four electrodes connected in parallel, with a bipolar configuration; iron as the sacrificial electrode; and aluminum as the cathode. The intermediate electrodes were aluminum and iron, placed between the anode and the cathode. Preliminary experiments were at a pH of 4,8 and 12 pH, with two different combination of electrodes, Al-Fe and Fe-Al, to keep these variables constant for the experimental trials.

In order to find the optimum conditions for COD, TOC, and grease removal, a multivariable design of experiments was employed, using Statgraphics 5.1. The optimum conditions were: Voltage: 13.2, pH: 12, conductivity: 15 mS/cm, distance between electrodes: 1.5cm, and processing time: 3 hours.

A kinetics study was done using optimum conditions found previously by DCE and the removal percentage findings were: oils and greases 94.96%, COD 87.44%, TOC 70.59%, anionic surfactants 25.62% y and 0.54 biodegradability was reached. Additionally, in order to reduce costs in the consumption of energy of the process, another kinetics study was developed with pH of 12, iron electrode, aluminum catode and 5 volts, in which the following removal were found: greases and oils 90.55%, COD 81.93%, TOC 50%, anionic surfactants 20.38%, and a biodegradability value of 0.56.

Key Words: electrochemistry, electrocoagulation, oily wastewater, COD, TOC, electrochemical reactor, wastewater treatment.

INTRODUCCIÓN

El agua es un recurso natural no renovable, patrimonio común de la humanidad, por esto, es nuestro deber hacer un buen uso de esta.

Con el incremento de la población mundial y el desarrollo tecnológico, se ha incrementado de manera proporcional el consumo del agua. Por esto, se requiere evaluar los problemas ambientales generados por este consumo y su utilización en el desarrollo industrial del mundo. Desde el punto de vista físico, químico y biológico, y también las implicaciones socio-económicas que puedan tener estos problemas ambientales, para proponer las mejores soluciones.

Los tratamientos convencionales como coagulación química, han sido utilizados en el tratamiento de aguas residuales, la cual consiste en la formación de lodos debido a la unión de coloides formando masas de tamaño considerable, para luego separarlas del agua mediante la adición de más químicos como el Sulfato de Aluminio, Cloruro Férrico, entre otros (Brown, 2001). También han sido utilizados en el tratamiento de aguas residuales procesos biológicos y biotecnológicos. (Farré, 2007)

El uso de la electricidad para el tratamiento de agua fue propuesto por primera vez en el Reino Unido en 1889. En 1904 fue patentado el uso de la electrólisis para el tratamiento de agua mineral (Elmore, 1905). La electrocoagulación con electrodos de aluminio y hierro fue patentada en 1909 en Estados Unidos y fue aplicada por primera vez en una planta de potabilización de agua a gran escala en 1946. Debido al alto costo de inversión y el costo de la electricidad, la electroquímica no tuvo mucha acogida en la industria a mediados del siglo XX, sin embargo, en Estados Unidos y Rusia se realizó una gran cantidad de investigaciones y se logró acumular conocimiento valioso (Chen, 2004).

En las últimas dos décadas el tema del medio ambiente ha cobrado gran importancia. Por esta razón la electroquímica ha recuperado la importancia en el tratamiento de aguas. (Chen, 2004)

Por todos los motivos mencionados anteriormente en este proyecto se realizaron los análisis necesarios al estudio de esta técnica propuesta en el tratamiento de aguas residuales.

En este proyecto se plantea la utilización de la tecnología de electrocoagulación utilizando electrodos de hierro (ánodo, electrodo de sacrificio) y aluminio, como cátodo. Los electrodos se usaron de forma intercalada, y se conectaron en configuración bipolar en paralelo. Para la realización de cada uno de los experimentos se empleó el diseño de experimentos y para su programación y análisis se utilizó el software estadístico Statgraphics 5.1.

El proyecto se realizó con el fin de encontrar un tratamiento adecuado, que permita recuperar el agua utilizada en el proceso de desengrase de autopartes de una planta ensambladora de carros, con el fin de reducir costos, evaluar posibilidades de reuso, y finalmente, contribuir de manera significativa con el mejoramiento del medio ambiente.

1. OBJETIVOS

1.1. OBJETIVO GENERAL

Evaluar la recuperación de agua residual resultante del proceso de desengrase de autopartes de una empresa de Medellín, mediante el tratamiento de Electrocoagulación, con el fin de economizar el consumo de agua y minimizar la contaminación causada por la misma.

1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Caracterizar las aguas residuales provenientes del proceso de desengrase de autopartes, con el fin de conocer la concentración de detergentes, aceites, grasas, DQO y DBO.
- Construir un reactor electroquímico a escala de laboratorio con electrodos de hierro y aluminio, que permita evaluar con que combinación de electrodos se logra una mejor recuperación.
- Evaluar mediante la realización de un diseño de experimentos, los diferentes valores de voltaje, tipo de electrodos, distancia entre electrodos y pH, con el fin de disminuir la concentración del contaminante y carga orgánica, para así poder encontrar las mejores condiciones de operación.
- Evaluar las cinéticas de remoción de aceites y grasas, DQO y COT, con el fin de encontrar las constantes cinéticas y de esta forma, el tiempo final de tratamiento.
- Evaluar el costo-beneficio del proceso de electrocoagulación, como alternativa para empresas con procesos de desengrase de autopartes.

2. MARCO TEÓRICO

2.1. ELECTROQUÍMICA.

La electroquímica es el estudio del intercambio entre química y la energía eléctrica. Las reacciones químicas producen efectos eléctricos y a su vez los fenómenos químicos son ocasionados por la acción de corrientes o voltajes. (Zumdahl S, 2000).

Las tecnologías electroquímicas más utilizadas en el tratamiento de aguas residuales son: electrodeposición, electroflotación (EF), electrooxidación y electrocoagulación (EC).

2.2. ELECTRODEPOSICIÓN.

Esta técnica electroquímica puede ser utilizada para la galvanoplastia y para realizar recubrimientos de metales costosos sobre metales no costosos, con el objetivo de suministrar diferentes propiedades a la superficie y evitar sobrecostos. Además, es utilizada en la recuperación de metales en industrias mineras, como por ejemplo la recuperación de cobre de las aguas residuales de las minas de cobre. Su mecanismo es muy sencillo y es básicamente una deposición catódica del metal. (Stoker, 2007)

2.3. ELECTROFLOTACIÓN.

El sistema de electroflotación se realiza en un tanque por el que pasa la corriente a tratar. En el fondo del tanque, se localizan los electrodos de modo que el cátodo queda por encima del ánodo. A través de estos

electrodos, circula una corriente eléctrica que provoca la electrólisis del agua con la consiguiente formación de pequeñas burbujas de oxígeno (en el ánodo) y de hidrógeno (en el cátodo). Dichas burbujas arrastrarán en su trayectoria ascendente hacia la superficie, las pequeñas partículas que se encuentren en suspensión en el efluente a tratar. Para favorecer la eliminación de los contaminantes se utilizan floculantes antes de tratar el agua en el sistema de electroflotación. (Chen, 2000)

2.4. ELECTROOXIDACIÓN.

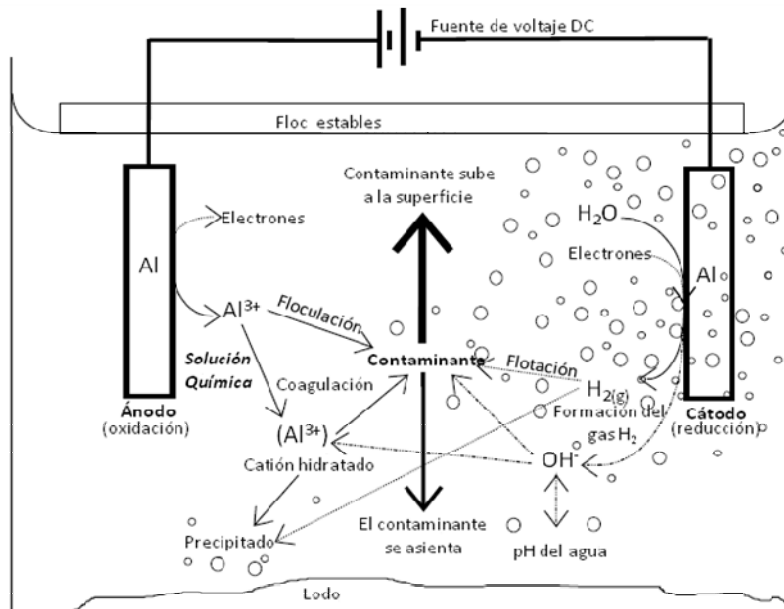
La electrooxidación consiste en la oxidación de contaminantes, por medio de radicales hidroxilos, provocando un rompimiento de enlaces químicos de la materia orgánica disuelta. Estos métodos son tecnologías promisorias para el tratamiento de aguas residuales, basado en la electrogeneración de radicales hidroxilos ($\cdot\text{OH}$). Los cuales son especies fuertemente oxidantes, debido a su alto potencial estándar ($E^\circ=2.8$). Estas especies son capaces de reaccionar de forma no selectiva con los contaminantes orgánicos, con el fin de producir compuestos menos tóxicos, como ácidos carboxílicos e incluso la mineralización total, es decir, la conversión a CO_2 , agua e iones inorgánicos. La más empleada son la oxidación anódica, electro-Fenton y la foto-electrofenton (Chen, 2004; Brillas et al, 2008). Estos procesos se llevan a cabo en celdas electrolíticas, que utilizan electrodos insolubles, generando los radicales libres, hidroxilos. Este proceso puede ser complementado con la adición de peróxido de hidrógeno y catalizadores, los cuales incrementan el número de radicales hidroxilos. (Chen, 2004)

2.5. ELECTROCOAGULACIÓN.

Consiste en la generación de coagulantes in situ disolviendo eléctricamente los iones del material utilizado como electrodo.

Los iones de metal son generados en el ánodo, y del cátodo es liberado hidrógeno gaseoso, el cual ayuda a la flotación de las partículas a la superficie del agua, este proceso también puede ser llamado electrofloculación. La electrocoagulación, utiliza corriente continua para desprender el catión activo del ánodo de sacrificio, el que reacciona con los iones Hidroxilos que se forman en el cátodo, desestabilizando los contaminantes suspendidos, emulsionados o disueltos en medio acuoso. Finalmente, los materiales coloidales se aglomeran para ser eliminados por flotación o por decantación. (Chen, 2000).

Figura 1. Esquema de una celda electroquímica.



Como se puede observar en la figura 1, (Mollah et al, 2004), en la electrocoagulación ocurren reacciones de oxidación, estas reacciones son (Rejeshwar, 1997):



En donde:

O , es la especie oxidada

R , es la especie reducida

ne^{-} , el número de electrones transferidos por mol

En una celda simple de electrocoagulación donde solo hay un ánodo y un cátodo los cuales hechos de un metal M , se presentan en general las siguientes reacciones electroquímicas (Mollah et al, 2004)

En el ánodo se presenta la siguiente oxidación



En el cátodo se presenta una reducción

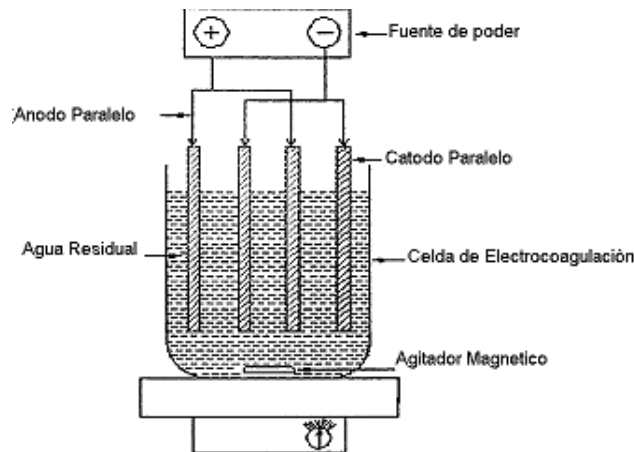


Cuando los electrodos son de aluminio la disolución del ánodo produce especies como Al^{3+} , $Al(OH)_2^{+}$, los cuales producen espontáneamente los respectivos hidróxidos o polihidróxidos; esto depende del pH de la solución iónica (Mollah et al, 2001). Los hidróxidos y polihidróxidos formados en estas reacciones electroquímicas tienen una gran afinidad con las partículas contaminantes. Y los gases formados, como el hidrógeno y el oxígeno son los que realizan la flotación del material coagulado (Mollah et al, 2004). Si los electrodos son de hierro lo que se forma es $Fe(OH)_n$ y polihidróxidos como:

$\text{Fe}(\text{H}_2\text{O})_6^{3+}$, $\text{Fe}(\text{H}_2\text{O})_5(\text{OH})^{2+}$, $\text{Fe}(\text{H}_2\text{O})_4(\text{OH})_2^+$, $\text{Fe}_2(\text{H}_2\text{O})_8(\text{OH})_2^{4+}$, $\text{Fe}_2(\text{H}_2\text{O})_6(\text{OH})_4^{4+}$ (Mollah et al, 2004).

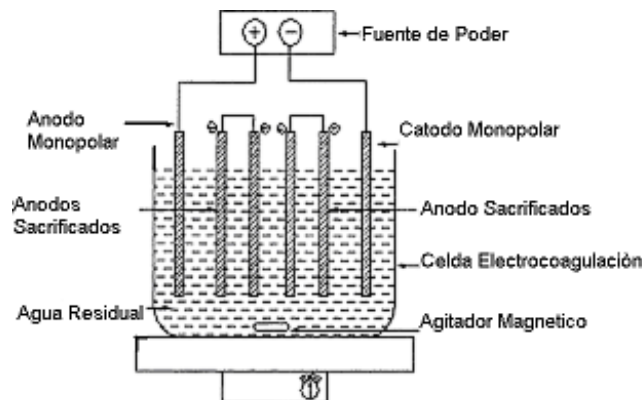
Los electrodos pueden tener un arreglo mono-polar o bi-polar, y en serie o en paralelo, según la conexión eléctrica.

Figura 2. Celda de electrocoagulación con configuración monopolar en paralelo



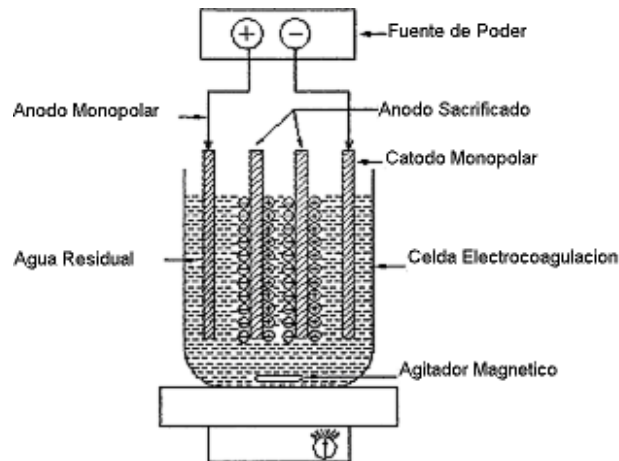
En la figura 2 se puede observar un arreglo monopolar en paralelo, este arreglo se caracteriza por que cada electrodo posee un solo tipo de carga al estar conectado directamente a la fuente (Mollah et al, 2001).

Figura 3. Celda de electrocoagulación con configuración monopolar en serie.



En la figura 3 se puede observar un arreglo monopolar en paralelo, en el cual los electrodos centrales están conectados entre sí (Mollah et al, 2001).

Figura 4. Celda de electrocoagulación con configuración bipolar en paralelo



En la figura 4 se puede observar un arreglo bipolar en paralelo, en la cual los electrodos centrales presentan cargas positivas y negativas dependiendo de la posición que ocupen, permitiendo de esta manera tener tres electrodos de sacrificio en esta configuración (Mollah et al, 2001).

Las ventajas de la electrocoagulación incluyen la alta eficiencia en la remoción de partículas y la posibilidad de automatizar completamente el proceso. (Mollah et al, 2004; Zumdahl y Zumdahl, 2000; Chen, 2004)

Los factores que afectan la electrocoagulación son (Hurley y Masterton, 1997; Rajeshwar, 1997):

- Densidad de la corriente, simbolizada con la letra i , es la corriente por área de electrodo y determina la velocidad del proceso.
- Eficiencia de la corriente, CE, es la relación entre la corriente consumida

para producir un producto objetivo y la corriente total consumida. La cual indica la especificidad del proceso y el funcionamiento de la electrocatálisis que involucra la reacción en la superficie, como la transferencia de masa.

- Presencia de NaCl, la sal es usada para incrementar la conductividad del agua a tratar, además de la contribución de los iones. Los iones de cloro reducen el efecto negativo de otros aniones como HCO_3^- , SO_4^{2-} . La adición de sal también lleva a la disminución en el consumo de energía debido al incremento en la conductividad.
- Efecto del pH, en la electrocoagulación de aguas residuales se ve reflejada en la eficiencia de la corriente, así como en la solubilidad de los hidróxidos metálicos.
- Temperatura: Aunque la electrocoagulación esté siendo estudiada hace aproximadamente cien años, el efecto de la temperatura sobre esta tecnología no ha sido muy estudiada. Según la literatura de la antigua Rusia, la eficiencia de la corriente muestra un incremento al aumentar la temperatura hasta 60°C, donde fue encontrada la máxima eficiencia de la corriente para el aluminio, como ánodo. Una temperatura mayor a 60°C genera una disminución en la eficiencia de la corriente y es debido a que la temperatura destruye la película de óxido en la superficie del electrodo. A una temperatura de aproximadamente 35°C el consumo de energía presenta un máximo para el tratamiento de aguas residuales con aceite. A mayor temperatura la conductividad mejora, y el consumo de energía disminuye, de lo anterior, se puede determinar que el intervalo idóneo para la electrocoagulación se encuentra entre 35-60°C.

Los materiales comúnmente usados son electrodos de aluminio o hierro, que pueden ser hechos de láminas o también de desechos industriales. Es necesario realizar un lavado a la superficie de los electrodos regularmente. Si se requiere una alta eficiencia en el tratamiento de aguas residuales se puede usar aluminio solo o en combinación con hierro, debido al aumento

de la coagulación del ión Al^{3+} . Dependiendo de la orientación de los electrodos, el arreglo del reactor puede ser horizontal o vertical y para mantener el sistema lo más simple posible, los electrodos son conectados normalmente de modo bipolar. El flujo del agua a través de los electrodos puede ser a través de múltiples canales o canales simples. Múltiples canales es un arreglo simple, pero el flujo en cada canal es bajo. El reactor de la electrocoagulación puede operar de forma continua o discontinua. La operación discontinua es muy importante para pequeñas cantidades, y hay que tener en cuenta su facilidad para automatizar el proceso. (Moreno-Casillas et al, 2007; Muruganathan, 2004; Daneshvar, 2004;).

Ventajas y desventajas de la electrocoagulación

Algunas ventajas y desventajas más relevantes de la electrocoagulación son:

- Los costos de operación son menores comparados con los procesos convencionales usando polímeros.
- Requiere de equipos simples y de fácil operación.
- Elimina requerimientos de almacenamiento y uso de productos químicos.
- Genera lodos más compactos y en menor cantidad, lo que involucra menor problemática de disposición de estos lodos.
- Produce aglomerados más grandes que aquellos formados en la coagulación química y contienen menos agua ligada.
- Alta efectividad en la remoción de un amplio rango de contaminantes.
- Purifica el agua y permite su recirculación.
- El paso de la corriente eléctrica favorece el movimiento de las partículas de contaminante más pequeñas, incrementando la coagulación.
- Reduce la contaminación en los cuerpos de agua.
- El agua tratada por electrocoagulación contiene menor cantidad de sólidos

disueltos que aquellas tratadas con productos químicos, situación que disminuye los costos de tratamiento de estos efluentes en el caso de ser reutilizados.

- Puede generar aguas potables, incoloras e inodoras.
- Los contaminantes son arrastrados por las burbujas a la superficie del agua tratada, donde pueden ser removidos con mayor facilidad. (Mollah et al, 2004; Zumdahl y Zumdahl, 2000; Chen, 2004).
- Es necesario reponer los electrodos de sacrificio.
- Los lodos contienen altas concentraciones de hierro y aluminio, dependiendo del material del electrodo de sacrificio utilizado.
- Puede ser un tratamiento costoso en regiones en las cuales el costo de la energía eléctrica sea alto.
- El óxido formado en el ánodo puede, en muchos casos, formar una capa que impide el paso de la corriente eléctrica, disminuyendo de esta forma la eficiencia del proceso. (Mollah et al, 2004; Zumdahl y Zumdahl, 2000; Chen, 2004).

Aplicaciones de la electrocoagulación:

La electrocoagulación es un proceso eficiente para la remoción de sólidos suspendidos, y de aceites y grasas. Su efectividad ha sido probada en tratamiento de aguas en pequeñas plantas para potabilización, operaciones marinas e incluso en procesos industriales para los cuales una planta de tratamiento de aguas residuales no es necesaria o es demasiado costosa. Este proceso es muy efectivo en la coagulación de coloides encontrados en agua natural, para eliminar su turbiedad y color. También es usada para la destrucción de algas o microorganismos, y en la remoción de hierros, silicatos, humus, oxígeno disuelto, entre otros. (Kobyta et al, 2004; Cameselle, C et al. 2005; Cocke, et al. 2004)

La electrocoagulación fue encontrada particularmente útil en el tratamiento de aguas residuales, ya sea de industrias textiles, de abastecimiento de

alimentos, petroleras, arenas de alquitrán, aguas residuales municipales, aguas residuales de fibras químicas, emulsión de agua-aceite, aguas residuales con aceite, suspensión de arcilla, nitrito y colorantes de aguas residuales. Reducción, separación y coagulación de cobre, entre otros. (Chen, 2004)

2.6. AGUAS RESIDUALES DE UN PROCESO DE DESENGRASE DE AUTOPARTES

En gran parte de Colombia y en general en el mundo entero, las aguas residuales de los procesos de desengrase de autopartes de carros, contienen los mismos componentes, como arena, polvo, sustancias a base de aceite y surfactantes. En la actualidad debido a la importancia del cuidado del medio ambiente y el consumo del agua, se han estudiado técnicas para el tratamiento de estas aguas residuales.

En el 2004, Toyozo Hamada y Yasumitsu Miyazaki, investigadores del Daicel Chemical Ind. y Daicel Membrane-System Ltda respectivamente, de Japón, propusieron el uso de una membrana de ultrafiltración de acetato de celulosa, una membrana de ultrafiltración de fibra, con la adición de floculantes y tratamiento con carbón activado. El floculante utilizado contenía bentonita, alginato ácido de sodio y una poliacrilamida catiónica. Se utilizaron tres tipos de membranas con diferente permeabilidad al agua y se realizaron pruebas con shampoo, usados en el proceso de desengrase de autopartes.

El mecanismo contaba con un sistema de floculación al agua residual para aumentar el tamaño de las partículas que se deseaban remover, para luego hacerla pasar por un sistema de ultrafiltración y luego realizarles un tratamiento con carbón activado. Se realizaron los análisis de DQO, Turbiedad, pH, mezcla de sólidos en suspensión, extracto de n-hexano y hierro inorgánico.

Se encontró una alta eficiencia en la remoción de la DQO y de la turbiedad de esta agua residual, en comparación con la eficiencia en la remoción de la DQO y de la turbiedad utilizando un floculante convencional como $Al_2(SO_4)_3$ y un polímero soluble en agua. (Hamada, 2004)

2.7. ANTECEDENTES DE LA ELECTROCOAGULACIÓN

2.7.1. Algunos antecedentes de la electrocoagulación en Colombia

Tabla 1. Investigaciones de la electrocoagulación en Colombia

AUTORES	CONTAMINANTE	RESULTADOS
Moreno et al, 2002 Universidad Nacional de Colombia sede Manizales.	Grasas y Aceites.	<ul style="list-style-type: none"> • Se realizó el experimento con 8 electrodos, 4 de hierro y 4 de aluminio. (5 mm de separación). • Área superficial de los electrodos 294 cm² • Condiciones de operación: 1 de la muestra, 2,7 V, 15 min. • Disminución de DQO de 3104 a 931,2 mg/l, que corresponde al 70% de remoción. • Disminución de grasas y aceites de 1195 a 115 mg/l, que corresponde a un 90,38% • Densidad de corriente 6.26 A/m²
Mejía y Osorio, 2003 Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia	Aguas residuales de una lavandería industrial con alto contenido de	<ul style="list-style-type: none"> • Se utilizaron electrodos de Al y Fe. • La separación entre los electrodos es de 3 mm.

	colorantes (indigo).	<ul style="list-style-type: none"> • Una corriente de 0.25 A, fue suficiente para lograr floculación y decoloración apreciable en 250 ml de agua, en tiempos de 2 a 5 min. • La reducción del color alcanzo porcentajes hasta del 95-98%. • Los electrodos de aluminio obtienen mejores decoloraciones para tiempos más cortos en comparación con los electrodos de hierro.
Ruiz et al, 2007 Universidad Lasallista, Medellín, Colombia	<p>Aguas residuales de la Industria Láctea:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Grasas y aceites. • Sólidos suspendidos. • Valores de pH fuera del rango de vertimiento. 	<ul style="list-style-type: none"> • Se realizó un experimento tipo batch. • Las variables de diseño fueron: Densidad de corriente eléctrica, pH inicial del agua residual y tiempo de tratamiento, manteniendo como electrodo de sacrificio al hierro y como cátodo el aluminio. • Se observó que los mayores porcentajes de remoción de DQO se presentaron a pH inicial de 5, densidad de corriente de 43,23 y de 32,43 A/m² y un tiempo de proceso de 15 min., estas remociones fueron de 93,99 y 75,73% respectivamente.
GilPavas et al, 2008 Universidad EAFIT	Aguas residuales provenientes de un	<ul style="list-style-type: none"> • Experimento tipo Batch, de configuración monopolar,

<p>Medellín Colombia</p>	<p>teñido en un floricultivo.</p>	<p>reactor de 700 ml.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Electrodos de Hierro y aluminio, con una separación de 5 mm y un área de electrodos de 62.8 cm². • La remoción de color fue de 100% con Fe y 49,7% con Al. • Se reportó un porcentaje de remoción de DQO de 59.31% y una decoloración de 97.23% en 8 min. con electrodos de Fe. • El porcentaje de remoción de COT fue de un 41.81%.
<p>GilPavas et al, 2008 Universidad EAFIT Medellín Colombia</p>	<p>Aguas residuales de un proceso de curtición: Cr⁺³</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Se observa que las condiciones óptimas fueron: agitación de 382 rpm, Distancia entre electrodos de 5mm, voltaje de 13, • Los resultados obtenidos con las condiciones óptimas fueron: remoción de Cr del 99.76%, DQO 60%, COT 51.23%, y un aumento en la biodegradabilidad de 77.2%
<p>GilPavas et al, 2008 Universidad EAFIT Medellín Colombia</p>	<p>Aguas residuales de un proceso de resinas fenólicas: Fenol.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Las condiciones óptimas obtenidas a partir del análisis estadístico fueron una concentración inicial de fenol de 986 ppm, pH 9.3 y conductividad de 6 mS/cm • Se obtuvo una degradación de 99.95% de fenol, 88% de la

		DQO y 79.31% del COT y una relación de biodegradabilidad (DBO5/DQO) de 0.943.
--	--	---

2.7.2. Algunos antecedentes de la electrocoagulación en el Mundo

Tabla 2. Investigaciones de la Electrocoagulación en el Mundo

AUTORES	CONTAMINANTE	RESULTADOS
Yang, 2006 University of Massachusetts- Dartmouth USA	Emulsión Agua- Aceite de motor, estabilizada con un surfactante comercial	<ul style="list-style-type: none"> • Electroodos de Al-Fe • Preparación de la solución: Ci: 50gr de aceite de motor, 25 gr. de NaCl, 500 ml de sln. surfactante comercial al 5%. Aforar solución con agua de acueducto hasta un volumen final de 5L. • Voltaje inicial para una corriente de 2A: 6.8 V • Voltaje una vez estabilizada la operación para 2A: 4.6V • Flujo del proceso óptimo: 320ml/L • Eficiencia del proceso del 99%
Önder et al., 2006 Andolu University, eskisehir Turkey	Surfactantes: Alquil benceno sulfonato linear Y Laurel éter sulfato de sodio	<ul style="list-style-type: none"> • Reactor cilíndrico de diámetro 11cm y altura 13 cm, con electrodos Al-Fe, operación en Bach. • Las eficiencias de remoción de turbidez, DBO y DQO son de 60, 67 y 73% respectivamente, con

		un consumo de energía de 0.015kWh g-1. El pH no varía significativamente.
Gomes et al., 2006 Lamar University, TX USA	Arsénico Ci: 1-1000ppm	<ul style="list-style-type: none"> • En Celda de Electrocoagulación Bach de un solo ánodo y un solo cátodo. • Al-Fe permitió una remoción del 99.6%. • Fe-Fe permitió una remoción de 99.6% • Al-Al- permitió una remoción de 97.2% • pH inicial óptimo fue de 6.
Den et al, 2004 Tunghai University, Taiwan Republic of China	Suspensión de sílica: Ci: Dilución 0,4% de una solución comercial de CMP(Cheical-mechanical-planarization) que contiene un 25% de Silicato fumárico	<ul style="list-style-type: none"> • Reactor de flujo continuo. • Configuración monopolar de los electrodos (ánodo de hierro y cátodo de acero inoxidable). • La eficiencia en la remoción de la turbiedad puede ser controlada por la densidad de corriente como por el tiempo de residencia en el reactor. • Se alcanzó un 95% y un 60% de remoción de la turbiedad y del COT respectivamente.
Hansen et al, 2006 Universidad Técnica Federico Santamaría, Valparaíso, Chile	Arsénico Ci: 100mg/l	<ul style="list-style-type: none"> • Se realizaron tres diferentes tipos de electrocoagulación: reactor de sedimentación modificado, reactor de flujo turbulento y un reactor con alimentación de aire. • En los reactores de sedimentación modificado y alimentación de aire, el 98% del Arsénico fue removido usando

		una densidad de corriente de 1.2A/dm ² .
Neelavannan et al, 2007 Central Electrochemical Research Institute, Karaikudi, India.	DQO producida por el colorante Procion Blue	<ul style="list-style-type: none"> • Se realizaron 4 experimentos diferentes: Fotooxidación, electrooxidación, electro fotocatalisis. • La remoción del colorante depende de la concentración inicial del colorante, del pH y de la cantidad adicionada de TiO₂. • La remoción del colorante fue medida según el parámetro DQO. • Todos los experimentos tuvieron buenos resultados, pero fue encontrado que la combinación de los dos métodos da como resultado una efectividad del 96% en la remoción del colorante.
Gao et al, 2004 Hong Kong University Hong Kong, China.	Cr ⁶⁺ Ci:0-100 ppm	<ul style="list-style-type: none"> • Solución sintética • Reactor Bach con dos compartimientos y con 5 electrodos. • pH óptimo fue entre 5 y 8 • La remoción fue hasta 0.5ppm de Cr total para un porcentaje de 83%. • Tiempo de residencia requerido es de 1.2 h.
Sengil et al., 2006 Universidad Sakayara, Sakaraya, Turquía.	DQO, Aceites y Grasas de residuos Agroindustriales.	<ul style="list-style-type: none"> • La eficiencia de remoción de DQO y aceites y grasas, son 98 y 99%. • La densidad de corriente óptima, pH y tiempo de electrolisis para

		<p>18,3 mg/l DQO/l y 4570 mg aceite y grasa/L fueron 0.6mA/cm² y 7 y 1 minuto respectivamente.</p> <ul style="list-style-type: none"> • El consumo de energía es 0.003kWh/kg para el DQO.
<p>Ün et al., 2006 Anadolu University, Eskisehir, Turkey</p>	<p>DQO de aguas residuales de la molienda en la fabricación de aceite de Oliva.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • La eficiencia de la remoción de la DQO se encontró en un intervalo entre 62 y 86%, donde la remoción de Aceite y grasa y turbiedad fueron totales. • La electrocoagulación no es tan eficiente en este caso sin la adición de un aditivo coagulante y oxidante.
<p>Kobyta et al., 2003. Department of Environmental Engineering, Gebze, Turkey.</p>	<p>DQO y turbiedad de aguas residuales de textiles.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • El tratamiento de aguas residuales de la industria textil por electrocoagulación se encontró dependiente del pH. • En medio ácido (pH menor que 6) fue encontrado que la remoción del DQO y turbiedad fue mayor usando el aluminio son más altos que cuando se uso el hierro. • Para el mismo porcentaje de remoción, el hierro requería una densidad de corriente entre 80-100A/m², y para el aluminio 150A/m² para un tiempo de operación de 10 minutos.
<p>Can et al., 2006, Department of Environmental Engineering,</p>	<p>Color, DQO y partículas suspendidas de</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Con una densidad de corriente de 100A/m² y un tiempo de operación de 10 minutos,

Gebze, Turkey.	aguas residuales de la industria textil.	<p>aplicado con un pH de 6.9, la remoción de DQO que se obtuvo fue del 50%.</p> <ul style="list-style-type: none"> • El pH se ajustó mediante la adición de ácido y se incrementó la remoción hasta 78%.
Ge et al., 2003, Chinese Academic of Sciences, Beijing, China.	DQO, Turbiedad, Fosfatos y surfactantes, provenientes de aguas residuales de Lavaderos de ropa.	<ul style="list-style-type: none"> • El proceso resultó efectivo para la remoción de DQO, Turbiedad, Fosfatos y surfactantes en un rango de pH de 5-9. • La remoción de DQO se obtuvo por encima del 70%, y la remoción de los fosfatos y surfactantes alcanzaron un 90%. • Reactor con configuración bipolar y un tiempo de residencia de 1.5 horas.
Gher naout et al, 2007 Saad Dahlab University of Blida, Blida, Algeria	<i>Escherichia coli</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Fueron usados tres tipos de electrodos, Los electrodos de aluminio fueron encontrados como los más eficientes en la destrucción del E. Coli comparado con los de acero y acero inoxidable. • El tiempo de remoción total fue de 30 min. • La electrocoagulación ha mostrado la misma eficiencia en la remoción de algas y coloides.
Roa-Morales et al., 2007, Universidad Autónoma del Estado de México, Toluca, Estado de México, México.	DQO, DBO, sólidos totales y coliformes fecales de Fabricación de galletas.	<ul style="list-style-type: none"> • La electrocoagulación es llevada a cabo con electrodos de aluminio en un reactor en Bach. • Bajo condiciones óptimas de pH 4 y densidad de corriente 18.2

		<p>mA/m^2. Los resultados fueron remoción de DQO 90%, DBO 96%, sólidos totales 95% y 99.9%</p>
<p>Arslan-Alaton et al., 2007, Istanbul Technical University, Istanbul, Turkey.</p>	<p>DQO y color de aguas residuales de tintorerías.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Electrodos de aluminio y acero inoxidable. • La eficiencia del tratamiento aumentó considerablemente con el aumento de la densidad de corriente usando los electrodos de aluminio. • La eficiencia del tratamiento con los electrodos de acero inoxidable no tiene ninguna relación con la densidad de corriente. • Con los electrodos de acero inoxidable mostró mejores resultados, porcentaje de decoloración (99-100%) para un tiempo de 10-15 min.
<p>Yavuz, 2007, Anadolu University, Eskişehir, Turkey.</p>	<p>DQO y COT de alcohol proveniente de Destilerías. Ci: DQO 4985 mg/l COT 1507 mg/l</p>	<ul style="list-style-type: none"> • En este estudio se realizaron dos experimentos, uno por Electro-Fenton y Electrocoagulación. • Por electro-Fenton, una eficiencia en la remoción de DQO del 92.6% y para el COT una eficiencia de remoción del 88.7% con adiciones de una solución 0.3M de NaSO_4 y 60000 mg/l de H_2O_2. La densidad de corriente en este experimento fue de 60 mA/cm^2 y un consumo de 0.53 kWh/g.

		<ul style="list-style-type: none"> • En el mismo estudio fue encontrado que la electrocoagulación sin ningún aditivo no es eficiente
Heidmann et al., 2008, Hamburg University of Technology, Hamburg, Germany	Zn(II), Cu(II), Ni(II), Ag(I) and Cr(VI) Ci de todos: 50-5000mg/l	<ul style="list-style-type: none"> • Electrocoagulación utilizando electrodos de Aluminio. • Los parámetros analizados fueron: concentración inicial de los metales, número de metales presentes, carga al reactor y densidad de corriente. • La concentración inicial de Zn, Cu, Ni y Ag no afecta la eficiencia de la remoción, mientras que el Cr a mayor concentración, mayor remoción. • El incremento en la densidad de corriente acelera el proceso pero lo hace menos eficiente. • Zn, Cu y Ni, muestran comportamiento similar en el proceso. • Los porcentajes de remoción fueron de 35%, 37%, 33%, 66%, 71% para Zn, Cu, Ni, Ag y Cr respectivamente.
İrdemez et al, 2006, Atatürk University, Erzurum, Turkey	Fosfato Ci: 50-500 mg/l	<ul style="list-style-type: none"> • Se realizaron experimentos en Bach, con un tiempo constante de 25 minutos. • Los parámetros analizados fueron: concentración inicial de fosfato, pH inicial, y concentración electrolítica, y densidad de corriente. • Las condiciones óptimas encontradas fueron, 50 mg/l de fosfato, un pH de 4,5 mM de la

		<p>concentración de la solución electrolítica y una densidad de corriente de 1 mA/cm².</p> <ul style="list-style-type: none"> • La eficiencia de remoción con las condiciones óptimas estuvo en un rango de 99-100%
Escobar et al, 2006, Universidad de Chile, Santiago de Chile, Chile.	Cu, ci: 12 mg/dm ³ , Cd, ci: 4 mg/d m ³	<ul style="list-style-type: none"> • Electrocoagulación utilizando electrodos comerciales de acero. • Las condiciones óptimas de operación fueron: pH de 7, flujo de 6.3 cm³/min y una densidad de corriente de 31 y 54 A m⁻². • Se alcanzó una remoción del 100% tanto para el Cu como para el Cd.

2.8. ESCALAMIENTO DEL PROCESO.

2.8.1. Métodos de escalamiento y similitudes.

La filosofía del escalado tiene como fin asegurar que las unidades correspondientes entre el trabajo a escala de laboratorio y el trabajo a escala industrial sean lo más similares posibles. Para lograr un buen trabajo en el escalado es necesario utilizar como guía un criterio de similitudes, el cual es definido por grupos adimensionales que describen las unidades características de la geometría, cinemática, térmica y química, además, para los sistemas electrolíticos es importante tener en cuenta las similitudes eléctricas. Para sistemas complejos, tales como los reactores electroquímicos, una completa similitud en el escalado, es prácticamente imposible. Para realizar el escalado es importante analizar el criterio dominante. De la siguiente lista de criterios (Goodridge, 1995).

2.8.2. Tamaño de reactor y similitud geométrica.

La similitud entre dos reactores de diferente escala se logra mezclando las relaciones correspondientes. En sistemas heterogéneos tan complejos como los reactores electroquímicos, este procedimiento conlleva a objeciones. La similitud entre los dos reactores, en la práctica es aplicada únicamente a la forma y el área del electrodo, y tiene un bajo rango en la prioridad (Goodridge, 1995).

2.8.3. Mecánica de fluidos y similitud cinemática.

La similitud cinemática tiene que ver con el movimiento de fases entre el sistema y las fuerzas que inducen el movimiento. Para mantener la similitud en la mecánica de fluidos se debe mantener el número de Reynolds (Goodridge, 1995).

2.8.4. Distribución de la concentración y similitud química.

Para la similitud química es necesario mantener constante los tiempos de residencia o los tiempos de reacción en reactores tipo Batch o en continuo. El modo de operación del reactor es importante definirlo y debe ser el mismo en ambos casos. En el contexto de grupos adimensionales, la condición más importante que define la similitud química es la relación entre la formación de productos químicos sobre el flujo total (Goodridge, 1995).

2.8.5. Distribución de corriente y similitud eléctrica.

Los reactores electroquímicos requieren de similitud eléctrica, esta es una de las consideraciones más importantes en el escalado de reactores electroquímicos. La similitud eléctrica existe entre dos unidades cuando la diferencia del potencial y la densidad de corriente sean igual en ambas unidades (Goodridge, 1995).

2.8.6. Transferencia de calor y similitud térmica.

La similitud térmica existe cuando la temperatura de dos puntos correspondientes de cada una de los reactores, tienen la misma relación. El intercambio de calor entre el reactor y sus alrededores cambia con el escalamiento hacia arriba. En el escalamiento el aumento en el área del electrodo, es proporcional con el incremento del volumen (Goodridge, 1995).

3. DESCRIPCIÓN DEL EFLUENTE

El efluente tratado en el proyecto proviene de los baños de desengrase de autopartes de una ensambladora en Antioquia. El agua residual de dicho proceso se caracteriza por su gran concentración de grasas provenientes de hidrocarburos y surfactantes. Estas concentraciones sobrepasan los límites de vertimiento impuestos por el área metropolitana (MIN AMBIENTE; Decreto 1594,1984).

Entre las sustancias que contienen dichas aguas podemos encontrar potasa cáustica, surfactantes aniónicos, grasa Kemokote, sales de fosfatos y cloruros, polvo, arenas y residuos metálicos como Hierro, Aluminio y Zinc (limallas).

Tabla 3. Caracterización del Efluente

Parámetro	Unidades	Valor
Conductividad	(mS/cm)	15
Aluminio	(mg/l)	1,97
Hierro	(mg/l)	0,029874
Grasas	(mg/l)	800
Surfactantes	(mg/l)	368
DQO	(mg/l)	5582
DBO ₅	(mg/l)	919
COT	(mg/l)	800
pH	-	12
Salinidad	%	7.9
Viscosidad	cP	1.07
Densidad	g/cm ³	1.0195.

En la tabla 3 se observa las características del efluente. Estos parámetros fueron medidos en el laboratorio de procesos avanzados de oxidación de la universidad EAFIT.

Figura 5. Efluente



En la figura 5, podemos observar una muestra del agua tratada, dicha agua residual del proceso de desengrase de autopartes se obtuvo de una planta ensambladora del Valle del Aburrá.

4. METODOLOGÍA

Para el desarrollo del proyecto se evaluó el método de electrocoagulación como alternativa técnica y económica viable en el tratamiento de aguas residuales del proceso de desengrase, para reutilizarla.

La siguiente metodología fue seguida:

Revisión Bibliográfica: Se realizó una revisión bibliográfica antes y durante la investigación para el desarrollo del proyecto.

Obtención de las Muestras: Las muestras se tomaron de una ensambladora del Área Metropolitana del Valle del Aburrá.

Técnicas Analíticas: Se implementaron las técnicas instrumentales para la determinación de detergentes aniónicos, aceites y grasas, concentración de aluminio, hierro, y además de determinación de DQO, COT y DBO₅.

Construcción del Reactor: El equipo fue construido de acuerdo a los diferentes modelos encontrados en la revisión bibliográfica para el proceso de electrocoagulación. El modelo se seleccionó según lo consultado y de acuerdo a ensayos preliminares que permitieron los ajustes necesarios para el desarrollo de dicho proyecto.

Ensayos Preliminares: Los resultados en un proceso de electrocoagulación están directamente relacionados con un gran número de variables, por lo cual se seleccionaron, el pH y configuración de electrodos para realizar los ensayos preliminares y así poder obtener los parámetros óptimos de estas variables, y posteriormente, emplear estos factores como constantes en los ensayos finales.

Ensayos Experimentales: Los ensayos se llevaron a cabo en las instalaciones de los Laboratorios de Procesos Avanzados de Oxidación y en el laboratorio de Química Instrumental de la Universidad EAFIT. Para la programación de los ensayos, se usó un diseño de experimentos, tomando como factores, la distancia entre electrodos y voltaje, y variable de respuesta, el porcentaje de remoción de grasas, se optimiza, con ayuda de un modelo matemático, el cual permite conocer que parámetros son los óptimos según los criterios establecidos. Para dichos ensayos se empleó un diseño de experimentos multifactorial.

Estudio Cinético: Se evaluó la cinética de la reacción con el fin de hallar las constantes cinéticas y el tiempo óptimo del proceso, mediante la aplicación de los valores óptimos encontrados para cada una de las variables en la remoción de grasas, DQO, COT y surfactantes.

Análisis de Resultados: Se realizó un análisis de resultados para buscar cuales serían las condiciones óptimas de operación del reactor, determinar la influencia de cada uno de los factores e interacciones, con el fin de plantear cuales son los parámetros de operación más relevantes y más críticos en la optimización del mismo.

Análisis Económico: Para el análisis económico o análisis costo beneficio, se estimará los supuestos necesarios para el cálculo de variables necesarias para el análisis de un proyecto, tales como: flujo de efectivo por periodo, TIR tanto del proyecto como del inversionista y VPN. Con las variables calculadas se realizó el análisis, considerando las ventajas y desventajas con el fin de realizar una inversión económica de este tipo.

4.1. MATERIALES Y EQUIPOS

Los materiales y equipos empleados para la investigación se listan a continuación:

4.1.1. Reactivos

- Ácido clorhídrico grado analítico, MERCK
- Ácido sulfúrico grado analítico, MERCK.
- Metil ter-butil-éter (MTBE) , MERCK.
- n-Hexano, MERCK.
- Ácido acético 1N, MERCK.
- Ácido ascórbico, Carlo Erba.
- Hidroxilamina, Carlo Erba
- Acetato de amonio, Carlo Erba.
- Fenantrolina, Carlo Erba.

4.1.2. Equipos:

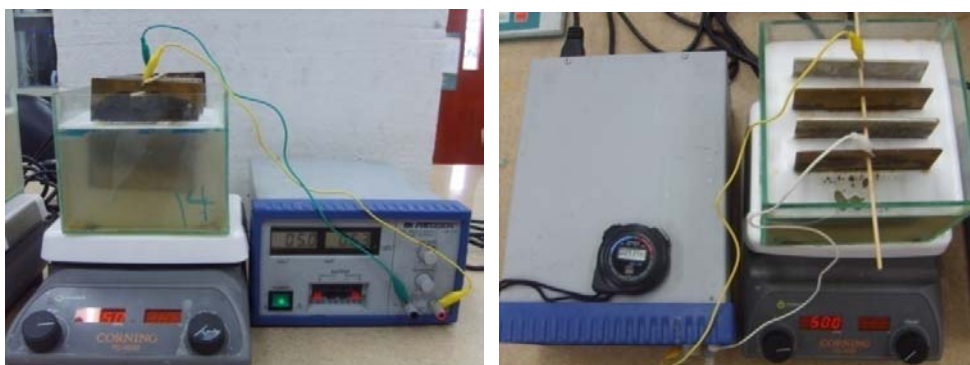
- Aparato de extracción Soxhlet, Pyrex.
- Bomba de vacío, BÜCHI.
- Embudo Buchner.
- Funda de calentamiento eléctrico ó rotavaporador, BÜCHI.
- Papel filtro, Schleicher &Schuell.
- Discos de muselina
- NANOCOLOR® Macherey-Nagel GMBH & CoKG
- Espátula.
- Cronómetros, Casio.
- Micropipeta de 1 y 5 ml, Boeco.
- Beakers de 100, 500, 1000 y 2000 ml. Schott Duran.
- Tubos de digestión.
- Balones volumétricos de 50 y 100 ml, Schott Duran.

- Frascos de vidrio para almacenamiento de muestras de 3 litros.
- pH-metro , METROHM.
- Conductímetro Handylab LF1, Schott.
- Termoreactor Spectroquant TR 420, Merck.
- Balanza Adventurer TM OHAUS con precisión de 0.01 g.
- Fuente de corriente 1671A BK Precision, Protek.
- Espectrofotómetro, Spectronics Genesys 2PC.
- Agitadores magnéticos, Corning.
- Celda para electrocoagulación.
- Electrodo de hierro y aluminio.

4.2. ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DE LA CELDA DE ELECTROCOAGULACIÓN

Los ensayos se llevaron a cabo en una celda de configuración monopolar, empleando tanto electrodos de hierro como de aluminio, debido a que es el arreglo más común para realizar un estudio inicial de las variables del proceso.

Figura 6. Montaje de Electrocoagulación



En la figura 6, se observa el montaje realizado para el proceso de electrocoagulación, donde la solución es agitada por un agitador magnético, los electrodos están sostenidos por medio de un material no conductor, conectados a la fuente de poder. El equipo fue modificado durante la realización del proyecto, de acuerdo con la información reportada en la literatura y los resultados obtenidos en los ensayos preliminares.

Las especificaciones técnicas del equipo son:

- Recipiente en vidrio con capacidad de 2,7 Litros para los diseños de experimentos y la evaluación cinética. La celda fue construida en vidrio, con el fin de evitar que la grasa se adhiriera a las paredes del recipiente.
- Electrodo de hierro de dimensiones 10 cm*10 cm y con un área efectiva de reacción 65 cm² por electrodo, tanto para los experimentos programados, como para el estudio cinético.
- Electrodo de aluminio de dimensiones 10cm *10 cm y con un área efectiva de reacción 65 cm² por electrodo, tanto para los experimentos programados, como para el estudio cinético.
- Agitador Magnético Corning.
- Fuente de Corriente Directa 1671A BK Precision, Protek.

4.3. MÉTODOS ANALÍTICOS

4.3.1. Método de Medición de Grasas y Aceites

Para la medición de grasas y aceites, se empleó el método Soxhlet (APHA, 2007).

Procedimiento:

- Acidular la muestra de 1 litro hasta pH 2 con HCl, en dilución 1:1.
- Filtrar con el filtro de muselina y vació hasta que no quede residuos, esto con el fin de evitar interferencias.

- Pasar el papel filtro a un vidrio de reloj que contenga sílice diatomeas empapado con disolvente, con el fin de disminuir interferencias.
- Colocar la muestra en el dedal de extracción de papel.
- Secar en horno a 103°C durante 30 minutos.
- Pesar el matraz de extracción. A
- Extraer la grasa y aceite en un equipo soxhlet, utilizando una mezcla de 80% MTBE y 20% n-Hexano a 20 ciclos/h durante 4 horas.
- Destilar el disolvente y recuperarlo.
- Pesar el matraz de extracción con la grasa y aceite. B
- Realizar un blanco con el solvente y el mismo tratamiento.

Cálculos:

$$mg_grasa_y_aceite = \frac{(A - B) * 8000}{ml_muestra} \quad (6)$$

4.3.2. Medición de la Demanda Química de Oxígeno (DQO).

La medición del DQO es un parámetro secundario para evaluar la efectividad de la electrocoagulación como tratamiento de agua residual, fue utilizado en la caracterización de la muestra, y en las cinéticas. El procedimiento empleado para medir el DQO fue el método estándar de reflujo cerrado 5020B (APHA, 2007):

Procedimiento:

- Lavar los tubos de digestión con ácido sulfúrico al 20%.
- Realizar la dilución necesaria para que antes de someter las muestras al calor sean amarillas.
- Adicionar a cada tubo digestor:
 - 2 ml de la dilución (recomendada 1:100)
 - 2 ml de reactivo 1

0.2 ml de reactivo 2

- Agitar moderadamente ya que se genera calor.
- Calentar en un termoreactor durante dos horas a una temperatura constante de 147 °C.
- Dejar enfriar para llevar a cabo la lectura de cada tubo digestor.
- Leer el método #26 en el equipo colorimétrico NANOCOLOR® de Macherey-Nagel los valores para el DQO de cada tubo digestor.

4.3.3. Medición de la Demanda Biológica de Oxígeno (DBO₅)

El método para la medición del DBO₅ se realizó de acuerdo con el catalogo del proveedor del equipo. Esta técnica se fundamenta en la respirometría, la cual se basa en el consumo de oxígeno por parte de microorganismos que consumen sustrato orgánico, que es degradado y oxidado a CO₂. El análisis respirométrico, permite adquirir datos sobre el consumo de oxígeno, en respuesta al metabolismo de un sustrato por la respiración de microorganismos. (Calderón, 2007).

Procedimiento:

- Adicionar en cada botella respirométrica: 12 ml de muestra, 5 gotas de Cloruro de Calcio, 5 gotas de Sulfato de Magnesio, 1 gota de Cloruro férrico, 5 gotas de inoculo (agua de alcantarilla), 5 gotas de solución tampón.
- Aforar con agua burbujeada hasta 250 ml.
- Poner en nevera durante 5 días, tomar primera medida de presión después de dos horas de su refrigeración.
- Tomar medida de presión cada día a la misma hora teniendo en cuenta datos como temperatura y hora.
- Llevar los datos obtenidos al programa de Excel proporcionado por el proveedor del equipo.

4.3.4. Medición de Hierro total

El método de medición de hierro total, fue utilizado siguiendo el Standard Methods. (APHA, 2007)

Preparación soluciones:

- Solución de hidroxilamina: Disolver 10 g. de $\text{NH}_2\text{OH}\cdot\text{HCl}$ en 100 ml de agua.
- Solución buffer de acetato de amonio: Disolver 250g. de $\text{NH}_4\text{C}_2\text{H}_3\text{O}_2$ en 150 ml de agua. Adicionar 700 ml. de ácido acético glacial.
- Solución de fenantrolina: Disolver 100mg. De 1,10-fenantrolina monohidratada, $\text{C}_{12}\text{H}_8\text{N}_2\cdot\text{H}_2\text{O}$ en 100 ml. de agua con agitación y calentar hasta 80°C . Sin ebullición. Descartar la solución si se pone oscura. El calentamiento no es necesario en el caso de adicionar dos gotas de HCl concentrado en el agua.

Procedimiento.

A 50 ml. de muestra o una dilución, adicionar:

- 1 ml. de solución de hidroxilamina.
- 2 ml. de HCl concentrado.

Llevar a ebullición hasta evaporación, hasta que quede aproximadamente 20 ml. de muestra.

Enfriar y agregar:

- 10 ml. de acetato de amonio.
- 4 ml. de solución de fenantrolina.

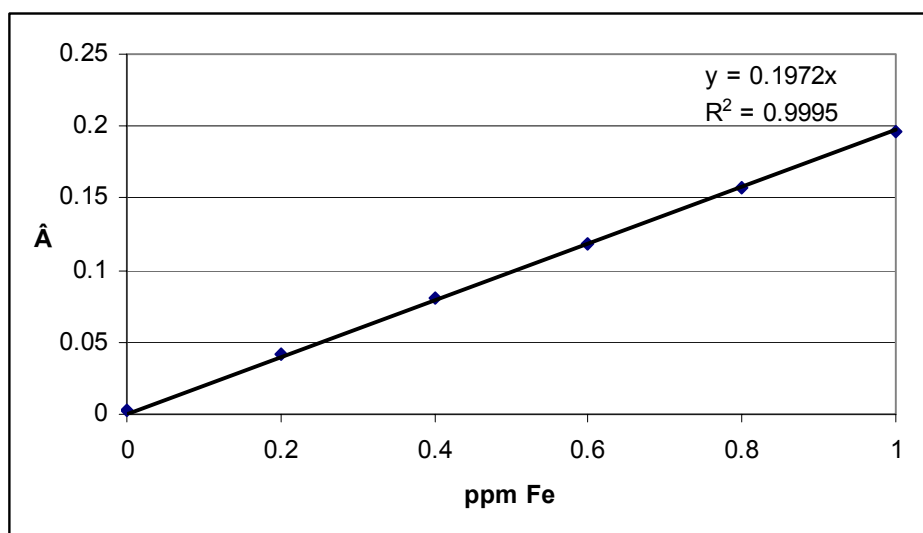
Aforar hasta 50 ml. con agua destilada.

Dejar desarrollar el color por 10 minutos.

Leer absorbancia a 510 nm.

En la figura 7, se observa la curva de calibración para la medición del hierro total en cada una de las muestras.

Figura 7. Curva de calibración del hierro.



4.3.5. Medición de Aluminio.

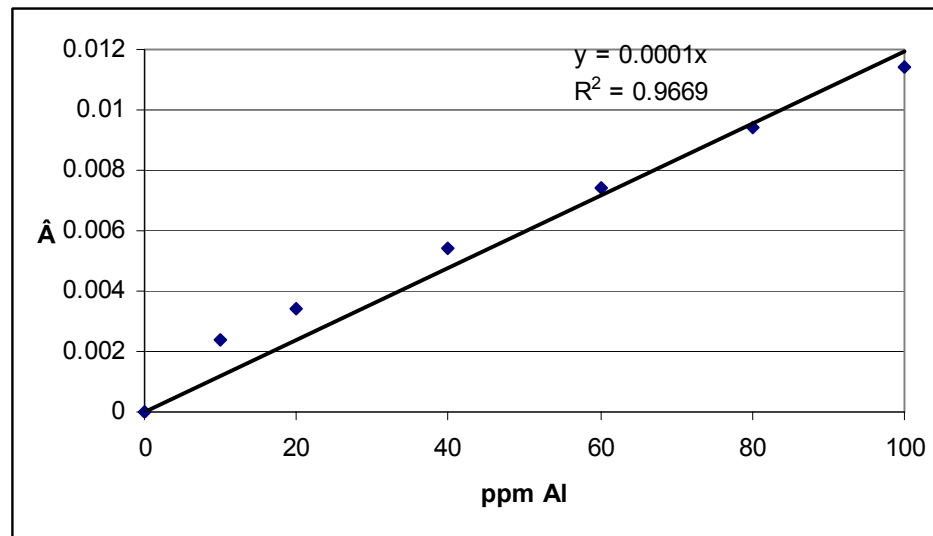
La medición del aluminio se llevó a cabo para cuantificar el desprendimiento del metal durante la electrocoagulación con electrodos de aluminio bajo condiciones óptimas de operación. (APHA, 2007)

Procedimiento:

- Llevar 25 ml de muestra en un balón volumétrico de 50 ml.
- Adicionar al balón volumétrico:
 - 1ml de Ácido Sulfúrico 0.02 N.
 - 1 ml de solución de Ácido Ascórbico.
 - 10 ml de solución tampón.
 - 5 ml de reactivo de tinción.
- Llévase hasta 50 ml con agua destilada.
- Dejar reposar durante 5 a 10 minutos para el total desarrollo del color.
- Medir la absorbancia a 535 nm.

En la figura 8, se observa la curva de calibración para la determinación de la concentración de aluminio disuelto, mediante la cual se determina la concentración de aluminio.

Figura 8. Curva de calibración del aluminio.



4.3.6. Medición de surfactantes aniónicos.

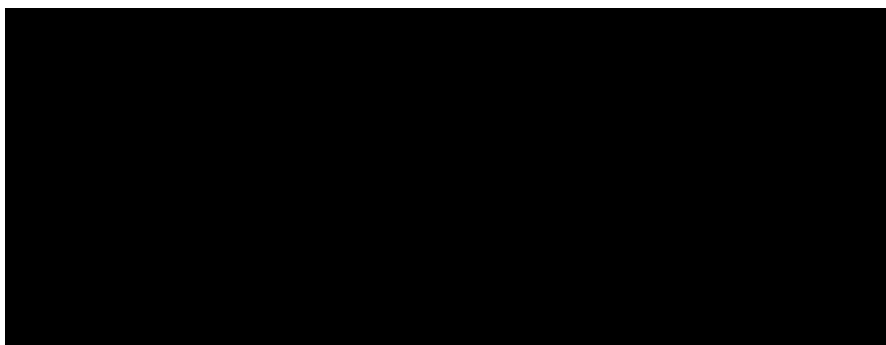
El procedimiento empleado para medir surfactantes aniónicos fue el método 132: Sustancias activas al azul de metileno del manual del equipo NANOCOLOR[®] 500 D, los detergentes aniónicos reaccionan en determinadas condiciones con azul de metileno y forman un complejo coloreado que se extrae en fase orgánica (APHA, 2007). El compuesto de referencia utilizado es metil dodecilbenceno sulfonato (MBAS: 342 g/mol).

Procedimiento:

- Adicionar en dos embudos de separación:

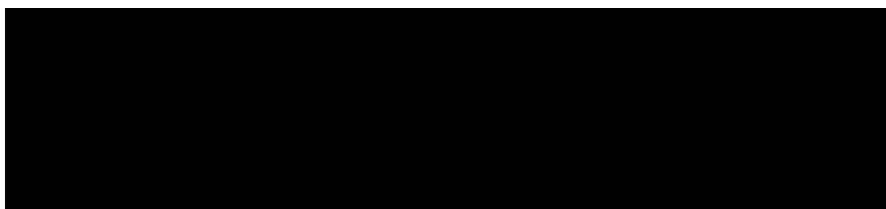
1ª Extracción

Tabla 4. 1ª Extracción de MBAS.

A large black rectangular box redacting the content of Table 4.

2ª Extracción

Tabla 5. 2ª Extracción MBAS.

A large black rectangular box redacting the content of Table 5.

Donde R1, R2 y R3 son soluciones preparadas del montaje de analítico del equipo NANOCOLOR® Macherey-Nagel.

Luego de la separación de las fases filtrar las capas orgánicas a través del filtro con lana de vidrio dentro de las cubetas, un exceso de lana produce resultados erróneos.

- Con el método 1-32 para surfactantes aniónicos del manual del equipo NANOCOLOR® Macherey-Nagel, leer los resultados en el equipo NANOCOLOR.

4.3.7. Medición de Carbono Orgánico Total (COT)

El procedimiento empleado para medir el carbono orgánico total (COT), fue el método 0-94 del manual del equipo NANOCOLOR[®] Macherey-Nagel, el cual es logrado en dos pasos:

1. Eliminación del carbono inorgánico total (CIT)
2. Descomposición del carbono orgánico (COT) y determinación del CO₂ formado como una disminución en el color de un indicador.

Para lograr un COT sin interferencias es necesario que el CIT sea menor de 100mg/l y el ión Cl⁻ menor de 1000mg/l.

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.

5.1. DISEÑO DE EXPERIMENTOS DE LOS ENSAYOS PRELIMINARES

El diseño de experimentos para los ensayos preliminares se realizó con ayuda del programa estadístico Statgraphics 5.1. Se establecieron dos variables (pH y tipo de electrodo), en la cual el pH fue analizado en tres niveles, y el tipo de electrodo en dos niveles, en ambos casos se utilizó las condiciones óptimas encontradas en la literatura. Como variable de respuesta se empleó el % de remoción de grasas y aceites. (Statgraphics Plus for Windows 5.1, 1999-2004)

Los ensayos se realizaron, por duplicado, en un reactor de dos litros, operando en forma Batch, 12 ensayos, tiempo de residencia 2 horas, agitación 450 rpm, distancia entre electrodos 2 cm y voltaje 10, estas condiciones fueron fijadas para los ensayos preliminares.

En la tabla 6, se puede observar que para la variable tipo de electrodo, no aplica (N/A) el tercer nivel, debido a que se utilizaron la combinación de electrodos Hierro-Aluminio y Aluminio-Hierro, y en ningún caso se utilizaron las combinaciones Hierro-Hierro, ni Aluminio-Aluminio. Esta variable se refiere al material del electrodo que compone el ánodo, material de sacrificio, siendo el cátodo el otro material utilizado, por ejemplo: en el caso del nivel uno, el hierro es el electrodo de sacrificio, por lo tanto, el cátodo sería el Aluminio. Para el análisis estadístico de la variable E: Tipo de electrodo fueron asignados los números uno (hierro) y dos (aluminio) con el fin de simplificar el análisis

Tabla 6. Variables del diseño de experimentos. Ensayos preliminares

Variable	Nivel 1	Nivel 2	Nivel 3
pH	4	8	12
Tipo electrodo	Fe	Al	N/A

Para estos experimentos se realizó una configuración bipolar en paralelo, usando cuatro electrodos de manera intercalada, dependiendo del tipo de material para el ánodo, de este modo se utilizaron dos diferentes combinaciones, Fe-Al-Fe-Al y Al-Fe-Al-Fe, siendo el primero el ánodo y el último el cátodo. Los experimentos fueron analizados con la ayuda del programa estadístico Statgraphics 5.1. mediante el uso de herramientas, como el análisis de varianza (ANOVA), diagrama de Pareto y gráfica de superficie de respuesta y la correlación de estos, con el objetivo de evaluar el comportamiento de las variables y encontrar las condiciones óptimas para la remoción de los contaminantes. (Statgraphics Plus for Windows 5.1, 1999-2004)

Tabla 7. Ensayos preliminares del diseño de experimentos.

No Ensayo	pH	Ánodo	%RG	%RG del duplicado
1	12,03	Fe	98,87	98,87
2	12,18	Al	79,81	80,21
3	7,95	Fe	74,22	75,17
4	7,94	Al	47,48	46,91
5	3,69	Fe	17,18	18,99
6	4,03	Al	10,38	8,13

En la tabla 7, se puede encontrar los porcentajes de remoción de grasas (% RG) obtenidos en los ensayos preliminares del diseño de experimentos,

donde se puede observar la combinación entre el pH, tipo de electrodo usado como ánodo y los resultados que se obtienen, en porcentaje de remoción de grasas. Se nota que los porcentajes de remoción más altos, fueron obtenidos a un pH de 12, usando hierro como ánodo de sacrificio.

5.2. ANÁLISIS DE LOS ENSAYOS PRELIMINARES DEL DISEÑO DE EXPERIMENTOS.

5.2.1. Análisis de Varianza

La tabla de análisis de varianza (tabla 8), conocida como ANOVA, por su nombre en ingles (Analisys of Variance) permite realizar un análisis de cada uno de las variables, además, de la interacción entre estas. El análisis de varianza, en una dirección, compara varios grupos correspondientes a una variable categórica o factor; el análisis de varianza en dos direcciones, utiliza dos factores. Dividiendo la variabilidad en el % de remoción de grasas en cada uno de las variables que intervienen en el proceso. Los valores P, menores a 0,05 permiten determinar la significancia estadística de cada uno de los factores. (Berk, 2001).

Tabla 8. Tabla ANOVA para la remoción de grasas. Ensayos preliminares.

Factor	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Media de cuadrado	Relación F	Valor P
A: pH	11238.8	1	11238.8	600.72	0.0000
B: Tipo de electrodo	987.36	1	987.36	52.78	0.0003
AA	219.555	1	219.555	11.74	0.014
AB	528.906	1	528.906	2.83	0.1437
Bloques	0.001875	1	0.001875	0	0.9923
Error total	112.255	6	187.088		

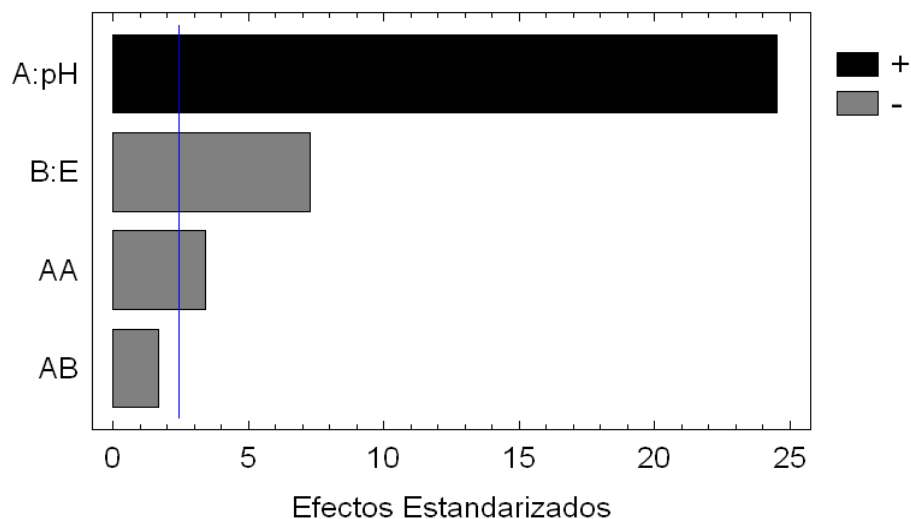
$$R^2 = 99.1099\%$$

En la tabla 8, se puede observar que tres de los 4 factores resultan ser estadísticamente significativos para el % de remoción de grasas, el pH, el tipo de electrodos y la interacción pH-pH, siendo el pH la variable estadísticamente más significativa. Se obtuvo un valor de $R^2 = 99.1099\%$, lo cual indica que el modelo explica un 99,1099 la variabilidad en el % de remoción de grasas, lo que asegura que el modelo se ajusta satisfactoriamente.

5.2.2. Diagrama de Pareto.

El Diagrama de Pareto, figura 9, permite ordenar factores por significancia en el proceso de remoción de grasas mediante electrocoagulación. En la figura 9, las líneas horizontales que sobrepasan la línea vertical son los factores que afectan la variable de respuesta, en este caso, el porcentaje de remoción de grasas.

Figura 9. Diagrama de Pareto.

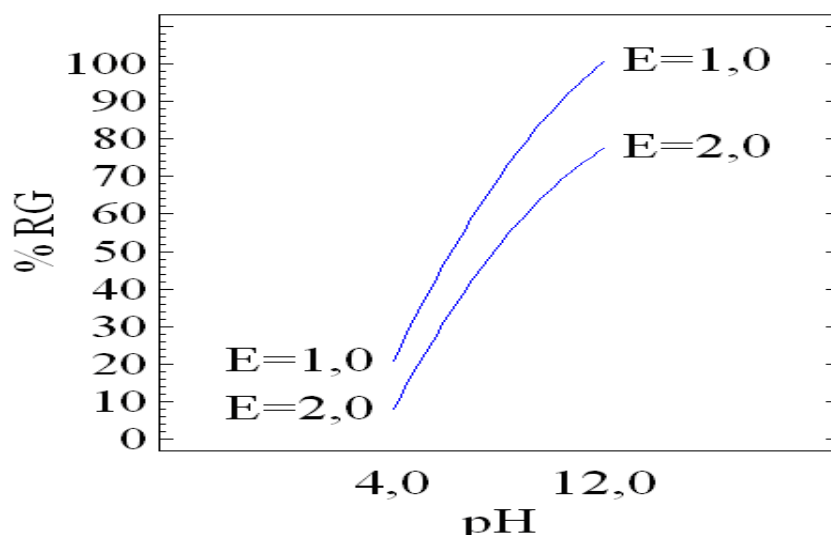


En la figura 9, se puede observar que los factores pH, tipo de electrodo, pH-pH afectan significativamente el proceso, en este caso el único factor que no afecta significativamente el proceso es la interacción pH-tipo de electrodo. De la figura 9, se infiere que el factor A (pH) es el de mayor significancia y que afecta el proceso de manera directamente proporcional, es decir, un aumento en la variable A (pH) produce un aumento significativo en la variable de respuesta. Y los factores acompañados de signos negativos informan, que al disminuir este factor el proceso de remoción de grasas se ve favorecido.

5.2.3. Efecto de la interacción entre las variables.

En la figura 10, se muestra la interacción entre las variables, en las cual se puede observar el comportamiento que tiene el proceso a los diferentes pH's analizados, con los dos tipos de electrodos utilizados como ánodos de sacrificio. Se observa que el comportamiento del pH es muy similar, a medida que el pH aumenta el % de remoción aumenta directamente proporcional, sin embargo, se aprecia que con el ánodo de hierro, el porcentaje de remoción es mayor que con el de aluminio.

Figura 10. Efecto de la interacción pH-tipo de electrodo en el proceso de remoción de Grasas.

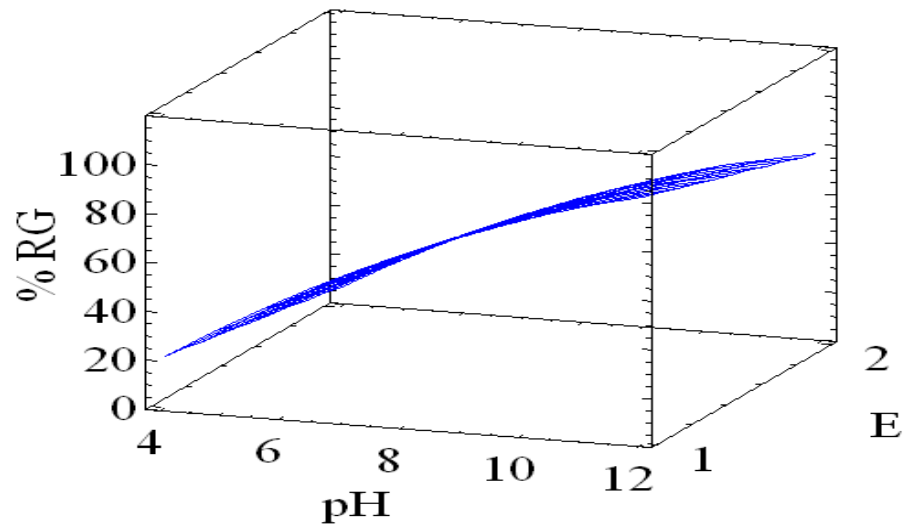


El programa estadístico Statgraphics 5.1., proporciona las condiciones óptimas del diseño de experimentos preliminar. Mediante el análisis mencionado anteriormente, las variables consideradas óptimas para los ensayos preliminares son: pH 12 y ánodo de hierro, por lo cual serán variables fijas en los ensayos del diseño de experimentos final. (Statgraphics Plus for Windows 5.1, 1999-2004)

5.2.4. Gráfica de superficie de respuesta estimada.

La gráfica de superficie de respuesta, figura 11, es utilizada en el estudio de la relación entre una o más respuestas y un conjunto de factores o variables independientes y donde el objetivo es optimizar las respuestas. (Montgomery, 2005). La gráfica de superficie de respuesta estima la eficiencia de remoción de grasa con respecto a las variables independientes, pH y tipo de electrodos. En la figura 11 se puede observar la superficie de respuesta para las variables analizadas en los ensayos preliminares: pH y tipo de electrodo.

Figura 11. Gráfica de superficie de respuesta estimada.

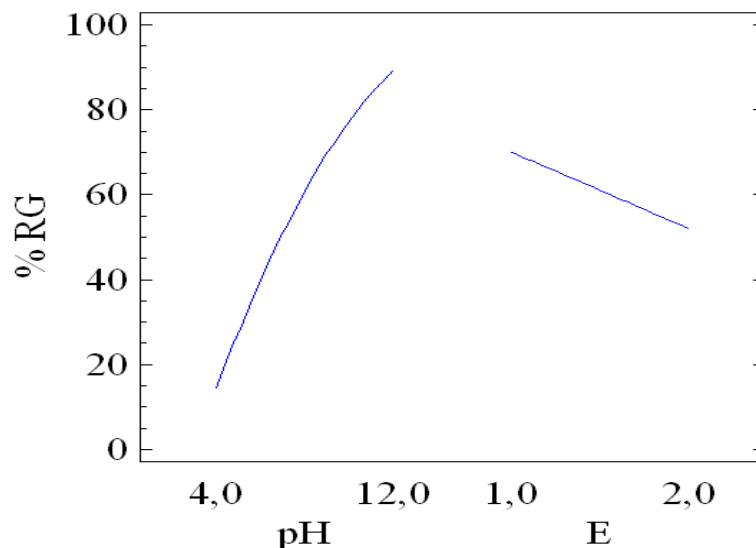


En la figura 11, se puede observar que a medida que aumenta el pH, el porcentaje de remoción de grasas aumenta, independiente del material del ánodo, sin embargo, con el ánodo 1 (Fe) se obtienen mejores resultados.

5.2.5. Gráfica de efectos principales para el % de remoción de grasas.

La gráfica de efectos principales, figura 12, para el % de remoción de grasas muestra el porcentaje de remoción alcanzado en el proceso por cada una de las variables de manera independiente.

Figura 12. Efectos principales para la remoción de grasas.



La figura 12 muestra los efectos que tienen las dos variables analizadas de forma independiente con respecto al porcentaje de remoción de grasa, en el caso del pH es directamente proporcional con respecto al porcentaje de remoción de grasas, encontrando que para un pH de 4, el porcentaje de remoción es aproximadamente de 18, y a medida que el pH incrementa, se observa un incremento en el porcentaje de remoción hasta 98 aproximadamente, encontrando en este valor de pH el punto más alto de remoción de grasas. Para el caso de la segunda variable (E: tipo de electrodo), al cambiar el material del ánodo, de hierro a aluminio, el porcentaje de remoción de grasas disminuye considerablemente del 71 % a un 50 % aproximadamente.

5.2.6. Condiciones óptimas.

Los resultados mencionados anteriormente como óptimos, pH 12 y hierro como ánodo, se obtuvieron los mejores resultados en el porcentaje de remoción de grasas, debido a que en los tratamientos electroquímicos, en este caso la electrocoagulación, un pH alcalino ayuda a la formación de

polihidróxidos que forman los coagulantes mediante los cuales son atrapadas las grasas. La dilución del ánodo genera especies de hierro como Fe(OH)_n y polihidróxidos como $\text{Fe(H}_2\text{O)}_6^{3+}$, $\text{Fe(H}_2\text{O)}_5(\text{OH})^{2+}$, $\text{Fe(H}_2\text{O)}_4(\text{OH})_2^+$, $\text{Fe}_2(\text{H}_2\text{O)}_8(\text{OH})_2^{4+}$, $\text{Fe}_2(\text{H}_2\text{O)}_6(\text{OH})_4^{4+}$, lo cual se comprueba con el aumento del pH en los experimentos debido a que los hidróxidos aumentan la alcalinidad del agua tratada. (Mollah et al, 2004)

5.3. DISEÑO DE EXPERIMENTOS DE LOS ENSAYOS FINALES.

Una vez obtenidos las condiciones óptimas de pH y tipo de electrodos en los ensayos preliminares, se pasó a realizar un diseño de experimentos que permita analizar las condiciones óptimas de voltaje y separación entre electrodos. El diseño de experimento se realizó con la ayuda del programa estadístico Statgraphic 5.1, usando un diseño multivariable, con dos variables (voltaje y separación entre electrodos), y cada uno de las variables fue analizada en tres niveles, como se explica en la tabla 9, mostrada a continuación (Statgraphics Plus for Windows 5.1, 1999-2004).

Tabla 9. Variables del diseño de experimentos. Ensayos finales.

Variable	Nivel 1	Nivel 2	Nivel 3
Voltaje (v)	5	10	15
Separación de electrodos (cm)	1	2	3

Los ensayos finales se realizaron bajo las mismas condiciones que los ensayos preliminares, en un reactor de dos litros, operando en forma Batch, agitación 450 rpm, y con las condiciones de pH y tipo de electrodo encontradas en los ensayos experimentales preliminares, pH 12 y electrodo de sacrificio hierro y cátodo aluminio, con una configuración de electrodos bipolar en paralelo y tiempo de residencia de tres horas. Los ensayos

fueron realizados por duplicado, para un total de 18 experimentos, en la tabla 10 se resumen los resultados obtenidos.

Tabla 10. Ensayos finales del diseño de experimentos.

No. Experimento	Separación entre electrodos (cm)	Voltaje	%RG	% RG del duplicado
1	1	5	80,51	81,88
2	1	10	98,13	98,13
3	1	15	97,52	96,31
4	2	5	94,41	96,39
5	2	10	98,13	98,41
6	2	15	98,13	97,82
7	3	5	93,40	96,64
8	3	10	97,86	95,59
9	3	15	94,34	98,13

En la tabla 10 se puede observar que con las condiciones analizadas, para todos los casos el porcentaje de remoción de grasas supera el 80%. El mayor porcentaje de remoción de grasas obtenido fue 98,41%, valor máximo alcanzado en el proceso, es importante anotar que el límite inferior de detección en la cuantificación de grasas es 9,1 mg/L, por lo cual no es posible conocer la cantidad exacta cuando se obtiene esta concentración de grasas, pues es posible que la concentración sea menor y el método no la logra determinar. Este porcentaje de remoción de grasas es obtenido con las condiciones de 2 cm y 15 voltios y otros valores muy aproximados se obtienen también con los experimentos 2 y 5, por lo cual, es importante el análisis estadístico con la ayuda del programa Statgraphics 5.1, con el fin de obtener las condiciones óptimas del proceso. (Statgraphics Plus for Windows 5.1, 1999-2004)

5.4. ANÁLISIS DEL DISEÑO DE EXPERIMENTOS.

5.4.1. Análisis de Varianza.

En la tabla ANOVA, tabla 11, ofrece una confiabilidad del 95%, en esta se observa los factores significativos, las cuales son todos aquellos que tienen un valor P por debajo de 0.05.

Tabla 11. Tabla ANOVA para la remoción de grasas.

Factor	Suma de cuadrados	Grados de Libertad	Media de Cuadrado	Relación F	Valor P
A: Distancia	45,964	1	45,964	5,46	0,0395
B: Voltaje	126,798	1	126,798	15,05	0,0026
AA	40,4106	1	40,4106	4,8	0,014
BB	61,3652	1	61,3652	7,28	0,0047
AB	105,166	1	105,166	12,48	0,0509
Bloques	2,60851	1	2,60851	0,31	0,0207
Error Total	92,6643	11	92,6643	8,424	0,589
R ² = 80,4909%					

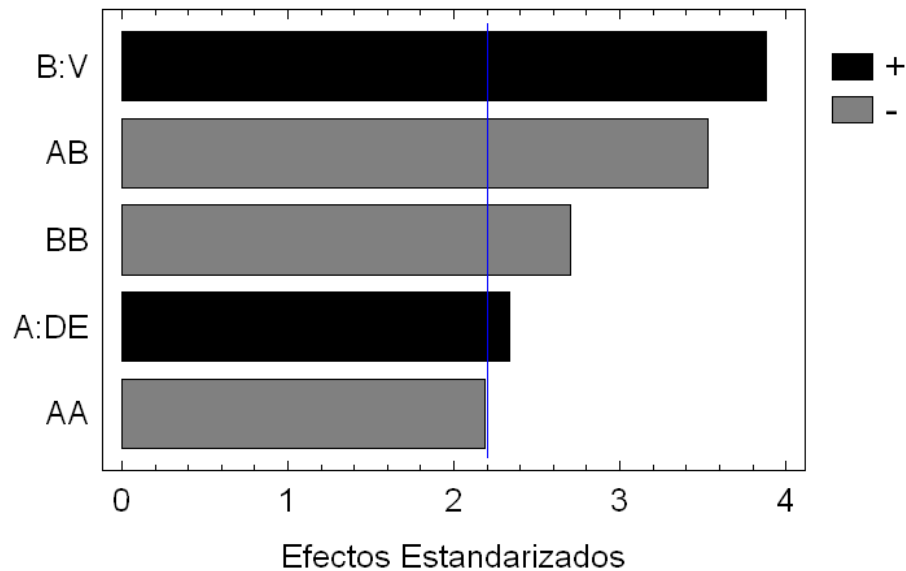
En la tabla 11 se puede observar que los factores A (distancia entre electrodos), B (voltaje) y sus interacciones AA y BB presentan un valor por debajo de 0.05, lo cual nos informa que son variables significativas para el proceso. Se obtuvo un valor de R²= 80.4909 %, lo que indica que el modelo explica un 80.4909 la variabilidad en el % de remoción de grasas.

La interacción de las variables AB (Distancia de electrodos-voltaje) se encuentra muy próxima a este valor, lo que indica, que también se puede tomar como una variable significativa, según el valor encontrado en la tabla ANOVA, (0,0509).

5.4.2. Diagrama de Pareto.

El diagrama de Pareto, figura 13, representa la importancia de las variables a analizar de los ensayos finales del diseño de experimentos, Distancia entre los electrodos y Voltaje.

Figura 13. Diagrama de Pareto. Ensayos finales del diseño de experimentos.

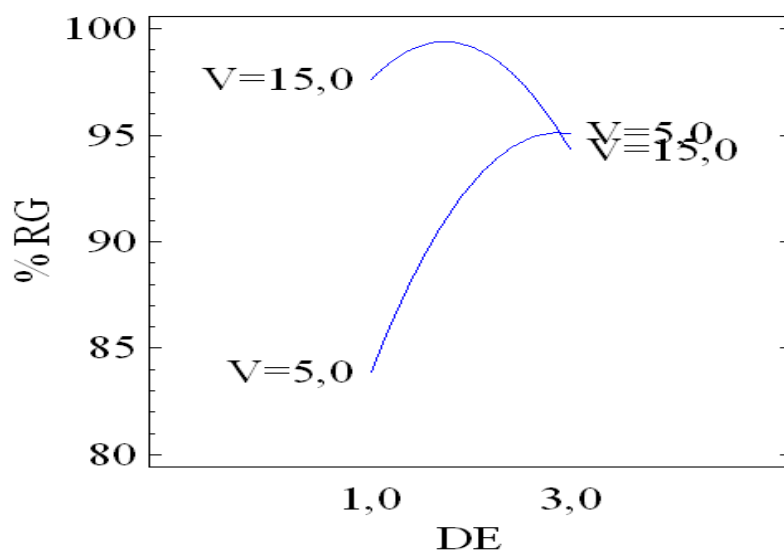


El diagrama de Pareto, figura 13, nos muestra que todos los factores, son significativos para el estudio, y que los factores distancia entre electrodos y voltaje son directamente proporcionales al % de remoción de grasas, es decir, que el % de remoción de grasas se ve favorecido con un incremento en alguna de estas variables. Por otro lado, las interacciones, son inversamente proporcionales con respecto a la variable de respuesta.

5.4.3. Efecto de interacción entre las variables.

En la figura 14, se puede apreciar el comportamiento que tiene la interacción distancia entre electrodos y voltaje.

Figura 14. Efecto de la interacción Distancia entre electrodos-Voltaje en el proceso de remoción de Grasas.

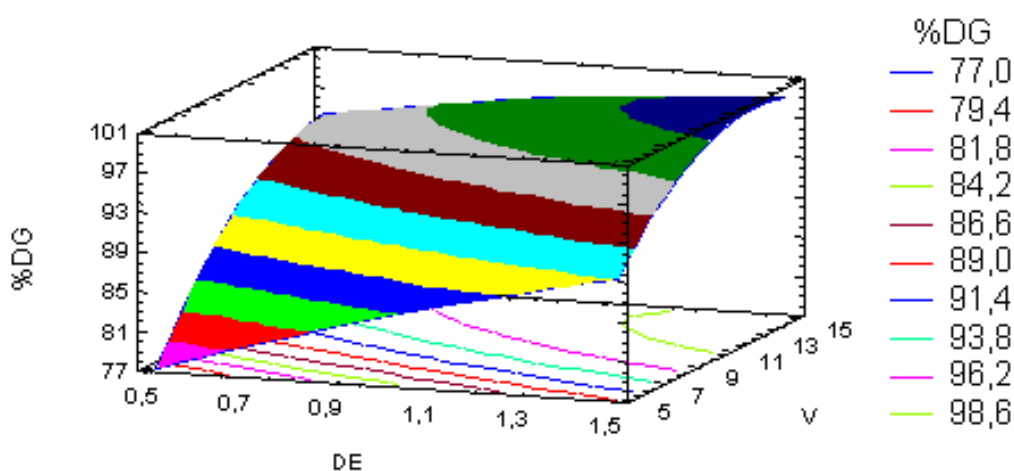


En la figura 14, se puede observar que en el voltaje 15, se alcanza una remoción máxima de aproximadamente 99%, con una distancia entre electrodos cercana a los 1,6 cm, es importante analizar que para distancias mayores a 1,6 cm el porcentaje de remoción de grasas comienza a decrecer, bajando hasta un porcentaje de remoción del 94%, para una distancia entre electrodos de 3 cm. Con voltaje 5, se aprecia un incremento en la eficiencia de remoción, el cual es directamente proporcional con aumento de la distancia entre electrodos, alcanzando un porcentaje máximo de remoción de 95% en una distancia entre electrodos de 3 cm.

5.4.4. Gráfica de superficie de respuesta estimada.

La figura 15, gráfica de superficie de respuesta, estima la eficiencia de remoción de grasa con respecto a las variables independientes, distancia entre electrodos y voltaje.

Figura 15. Gráfica de superficie de respuesta estimada.

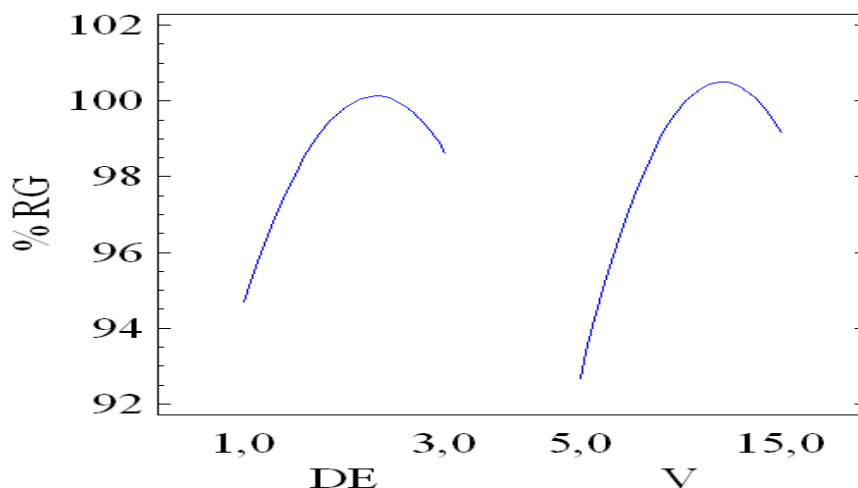


Con la ayuda del programa estadístico Statgraphics 5.1. se encontró un porcentaje máximo de remoción de grasas, de 98,13% para unas condiciones de 13,2 v, y una separación entre electrodos de 1,5 cm. Las cuales están representadas por la figura 15. (Statgraphics Plus for Windows 5.1, 1999-2004).

5.4.5. Gráfica de efectos principales para el % de remoción de grasas.

En la figura 16, se analiza cada una de las variables (distancia entre electrodos y voltaje) de manera independiente, con respecto a la eficiencia del porcentaje de remoción de grasas.

Figura 16. Efectos principales para el % de remoción de grasas.



En la figura 16, se puede apreciar que para la variable distancia entre electrodos, para el valor de 1,5 cm. se encuentra el máximo porcentaje de remoción de grasas, con un valor aproximado al 100%. También se observa en esta figura, que después de llegar al máximo porcentaje de remoción de grasas, este empieza a decaer, esto es debido a que llega un punto donde la migración de los iones al medio no es favorecida por la distancia entre electrodos, debido a que disminuye la interacción electrostática, por lo cual el movimiento de los iones producidos decrece, la disminución de estos iones reduce la capacidad de coagulación y producción de flóculos (Song, 2008).

En el caso del factor voltaje, para el valor de 13,2 voltios, se encuentra el porcentaje máximo de remoción de grasas, con un valor aproximado de 100%.

5.5. EFECTO DEL pH, TEMPERATURA , CONDUCTIVIDAD DENSIDAD DE CORRIENTE, SEPARACIÓN ENTRE ELECTRODOS Y TIPO DE ELECTRODO.

5.5.1. pH.

El pH es importante en la formación de burbujas de gas y la solubilidad de los hidróxidos metálicos, factores que influyen significativamente en la eficiencia del proceso. Los hidróxidos de hierro son más solubles que los hidróxidos de aluminio. Para el caso de estudio, se observó en la mayoría de los casos un aumento en el valor del pH, en el caso de los pH iniciales más bajos (en nuestro caso 4) se observó incrementos en el valor del pH hasta un 61,88%, y para valores de pH más altos, el incremento no fue tan significativo, siendo 3,30% el mayor incremento para el pH de 12. Este aumento es debido a que los hidróxidos y polihidróxidos de hierro y aluminio, que se forman en la reacción de la electrocoagulación son alcalinos, por lo tanto, el pH aumenta de manera más drástica para pH's bajos y de manera suavizada en los pH's altos (Bensadok, 2008; Yilmaz, 2008).

Dependiendo del pH de la solución, diferentes especies como: Fe^{3+} , $\text{Fe}(\text{OH})_2^+$, $\text{Fe}(\text{OH})_2^{2+}$ y $\text{Fe}(\text{OH})_4^-$, pueden estar presentes. Los hidróxidos y polihidróxidos de hierro pueden remover contaminantes por adsorción, co-precipitación y atracción electrostática. De esta manera podemos concluir, que los mejores resultados en el proceso de remoción de grasas obtenidos a valores de pH más altos, es debido al medio alcalino, que facilita la generación de radicales hidroxilo y a su vez la formación de aglomerados que finalmente son removidos de la solución. (Heidmann, 2008).

5.5.2. Temperatura.

Durante los experimentos la temperatura aumentó de 25°C hasta aproximadamente 40°C, debido a las reacciones que se llevan a cabo en el proceso de electrocoagulación y a la diferencia de potencial aplicada, el aumento de temperatura fue cercano a 15°C. El aumento en la temperatura genera un incremento en la conductividad de la solución, lo cual se ve reflejado en el consumo de energía, entre mayor sea la conductividad, menor será el consumo de energía (Yilmaz, 2008).

5.5.3. Conductividad.

La conductividad juega un papel fundamental en los procesos de electrocoagulación, de igual forma que la temperatura, al aumentar la conductividad disminuye el consumo de energía. Para un buen desempeño en el proceso de electrocoagulación, es necesario valores de conductividad por encima de 1000 $\mu\text{S}/\text{cm}$, por lo tanto, la presencia o adición de NaCl aumenta la cantidad de electrolitos en la solución, la cual es fuente de iones Cl^- , que reducen significativamente los efectos adversos como HCO_3^- y SO_4^- , los cuales forman una capa aislante en la superficie de los electrodos, lo que disminuye la eficiencia de corriente. Para el caso de estudio, la conductividad final de las muestras mostró un comportamiento constante. Cuando la conductividad de la solución aumenta, la resistencia de la solución para que fluya la energía disminuye, por esto el voltaje necesario para alcanzar la densidad de corriente óptima también disminuye, y por consiguiente la energía consumida es menor. La conductividad de la solución tratada es alta (15 mS/cm), lo cual facilita el proceso de remoción de grasas. Debido al leve aumento en la temperatura, la conductividad también aumenta, lo cual lo hace beneficioso para el proceso de electrocoagulación de la solución tratada. (Daneshvar, 2007; Yilmaz, 2008)

5.5.4. Densidad de corriente.

Durante los experimentos el voltaje fue una variable analizada. Se realizaron experimentos para 5, 10 y 15 voltios, obteniendo una densidad de corriente promedio en el ensayo de 1.37, 3.9 y 4.26 mA/cm² respectivamente. En los ensayos realizados, la densidad de corriente disminuía debido a la disminución de la corriente en el ensayo, ya que el área sumergida siempre fue constante; esta disminución es generada por el aumento en la conductividad, por lo tanto, la densidad de corriente obtenida es un valor promedio para cada ensayo.

La disminución de la corriente fue generada por la formación de iones Al⁺³ y Fe⁺² en el proceso, y está relacionada directamente con la resistencia que ofrece la solución a que la electricidad fluya. A mayor densidad de corriente, se genera una cantidad significativa de iones de hierro, los cuales a la vez atrapan las moléculas del contaminante y por lo tanto, aumenta la eficiencia de remoción. (Yilmaz, 2008)

5.5.5. Distancia entre electrodos.

El diseño de experimentos se realizó con tres niveles para la variable distancia de electrodos, 1, 2 y 3 cm. Con la ayuda del programa estadístico Statgraphics 5.1., se encontró el valor óptimo para la distancia de electrodos, de 1.5 cm. (Statgraphics Plus for Windows 5.1, 1999-2004). Para el proceso de electrocoagulación a medida que la distancia entre electrodos incrementa, aumenta la capacidad de coagulación del proceso, esto ocurre debido a que la interacción electrostática disminuye, por lo cual el movimiento de los iones producidos disminuye y estos iones aumentan la capacidad de coagulación y producir flóculos (Song, 2008).

5.5.6. Tipo de electrodos.

Para las condiciones utilizadas en el diseño de experimentos se encontró que usando hierro como ánodo se obtuvo porcentajes de remoción de

grasas mayores que usando aluminio como ánodo. Esto es ocasionado por la afinidad de los contaminantes con los hidróxidos y polihidróxidos de hierro que se generan en el proceso de electrocoagulación (Yilmaz, 2008)

5.6. CONDICIONES ÓPTIMAS DE OPERACIÓN.

5.6.1. Condiciones óptimas de operación.

Según lo mencionado en el numeral 5.4.4. Gráfica de superficie de respuesta estimada, se encontró que los valores óptimos para la variable distancia entre electrodos fue de 1,5 cm, y para la variable voltaje fue de 13,2 voltios. Con estas condiciones se realizó un estudio cinético, empleando un reactor de dos litros, operado de modo batch, utilizando hierro como el ánodo de sacrificio, pH 12, agitación 450 rpm, con el fin de analizar el porcentaje de remoción de grasas, remoción de DQO, remoción del COT, análisis de biodegradabilidad.

Adicionalmente, con el fin de realizar un análisis de reducción de costos, se llevó a cabo una segunda cinética, con los valores de distancia de electrodos de 2 cm. y voltaje de 5, debido a que con estos valores, según el análisis estadístico realizado, se encontró un porcentaje de remoción 94%, el cual es un porcentaje superior al estipulado por las entidades ambientales para el vertimiento de aguas residuales con trazas de grasas. (MIN AMBIENTE; Decreto 1594,1984). (Statgraphics Plus for Windows 5.1, 1999-2004). En este segundo estudio cinético se realizó el montaje para la medición de remoción de grasas y aceites, remoción de DQO, remoción de COT, remoción de surfactantes y análisis de biodegradabilidad, además del análisis de hierro y aluminio, lo cual permite identificar la cantidad de hierro y aluminio liberado por los electrodos.

Tanto el estudio cinético con las condiciones óptimas como el segundo estudio cinético, se realizaron con un tiempo de residencia de 7 horas con toma de muestra en los 30, 60, 120, 180, 240, 300, 360 y 420 minutos, para ello se dejaron constantes el área sumergida de electrodos, volumen, pH, conductividad, voltaje, distancia entre electrodos y tipo de electrodos.

5.6.2. Estudio cinético para las condiciones óptimas.

Este estudio cinético se realizó con las condiciones óptimas mencionadas en el numeral 5.6.1.

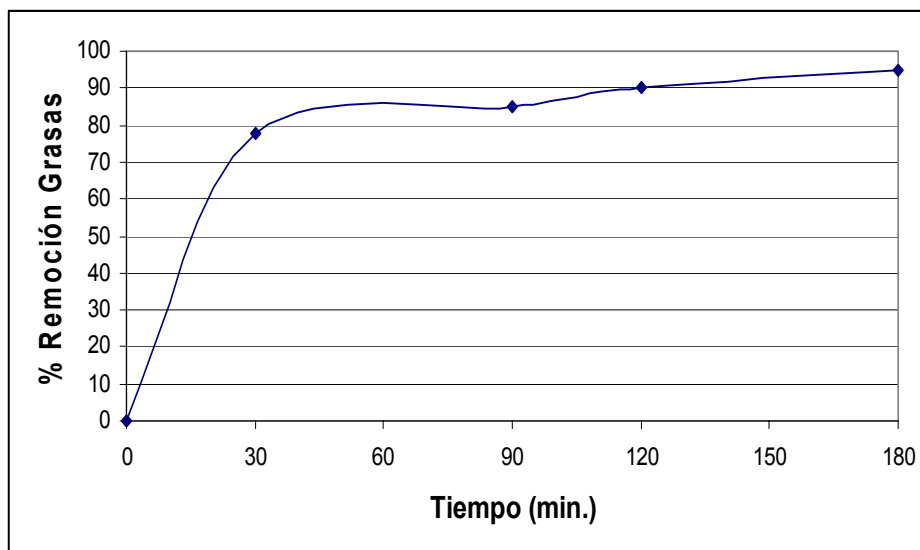
5.6.2.1. Estudio cinético para la remoción de grasas y aceites.

En la tabla 12, se presenta los valores de remoción de grasas y aceites obtenidos en el tiempo con el fin de evaluar la eficiencia en el proceso de electrocoagulación.

Tabla 12. Variación de la concentración de grasas y aceites en el tiempo

Tiempo (min)	Concentración de grasas (mg/l)	% Remoción de grasas
0	832	0.00
30	184.2	77.86
90	125.8	84.88
120	80.25	90.35
180	41.9	94.96

Figura 17. Remoción de grasas y aceites en el tiempo.



En la tabla 12 y la figura 17, se puede observar que la concentración de grasas y aceites disminuyó hasta un 94,96 % para un tiempo de 180 minutos. Es importante analizar además de las grasas y aceites, la demanda química de oxígeno, el carbono orgánico total, la demanda biológica de oxígeno y los surfactantes aniónicos, por lo cual no se puede concluir que el tratamiento da resultados óptimos para 180 minutos. Con el fin de determinar el orden de la reacción, se realizó un análisis de los valores obtenidos de grasas y aceite, evaluando los diferentes modelos de reacción, se puede observar cual de ellos presenta una mejor correlación. Para este caso, la cinética de segundo orden es la que mejor se ajusta. (Levenspiel, 1999)

$$-r_A = k_A * C_A^2 \quad (7)$$

Integrando,

$$\frac{1}{C} - \frac{1}{C_o} = kt \quad (8)$$

Donde,

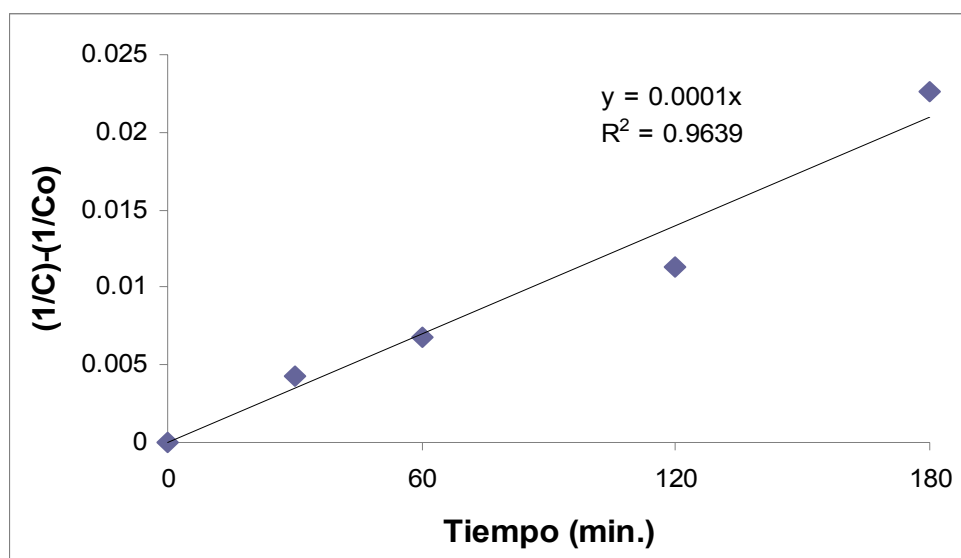
C , es concentración de la grasa de la solución en el tiempo.

C_0 , es la concentración inicial de grasa en la solución en el tiempo 0

t , es el tiempo,

k , es la constante cinética de reacción.

Figura 18. Método de integración cinética de segundo orden para la remoción de grasas y aceites.



Según lo observado en la figura 18, se obtuvo una correlación de 0.9639, por lo cual las predicciones que se realicen con esta ecuación son confiables, la figura nos muestra una constante cinética de $1 \cdot 10^{-4}$ l/mg*s. Por lo tanto, para lograr el 80% de remoción exigido por la legislación ambiental colombiana, es necesario realizar el tratamiento por 48,07 minutos. (MIN AMBIENTE; Decreto 1594,1984).

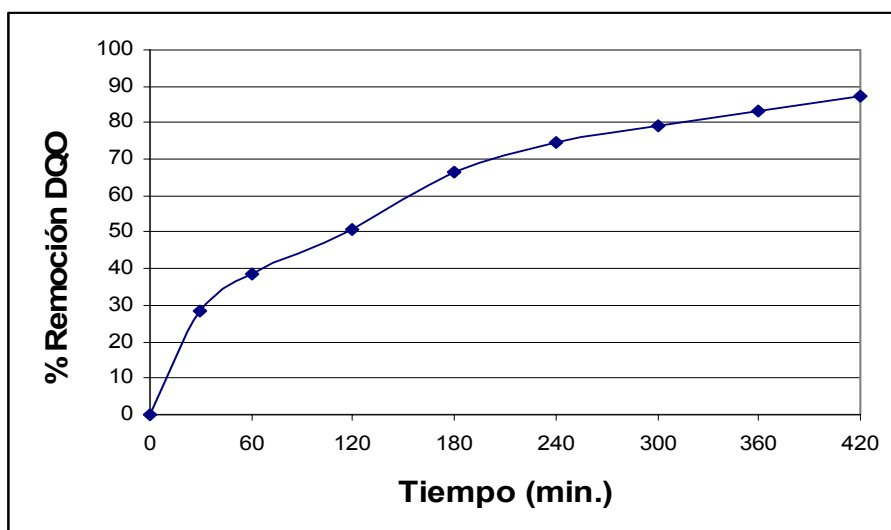
5.6.2.2. Estudio cinético para la DQO.

En la tabla 13, se presenta los valores de remoción de DQO obtenidos en el tiempo, con el fin de evaluar la eficiencia en el proceso de electrocoagulación.

Tabla 13. Variación de la DQO en el tiempo.

Tiempo (min.)	DQO (ppm)	% R DQO
0	5432	0.00
30	3882	28.53
60	3332	38.66
120	2682	50.63
180	1832	66.27
240	1382	74.56
300	1132	79.16
360	907	83.30
420	682	87.44

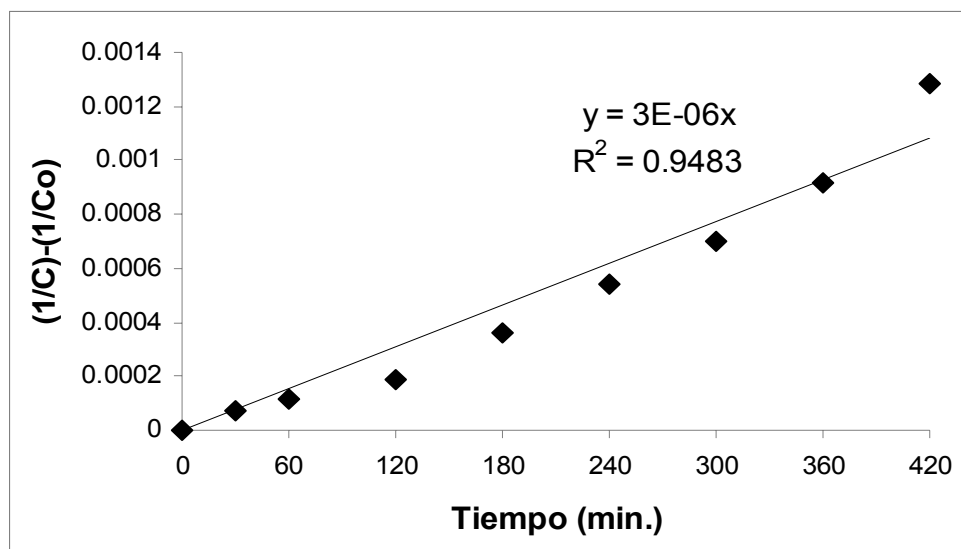
Figura 19. Remoción de la DQO en el tiempo.



En la figura 19, se puede observar que al transcurrir el proceso en el tiempo va aumentando la remoción de DQO. Se puede observar que se alcanza un porcentaje máximo de remoción del 87,44% para un tratamiento de 7 horas.

Con el fin de determinar las constantes cinéticas de la reacción se realiza un análisis de los datos de la DQO, con los diferentes modelos cinéticos, se puede observar cual de ellos presenta una mejor correlación. Para este caso, la cinética de segundo orden es la que mejor se ajusta. (Levenspiel, 1999)

Figura 20. Método de integración cinética de segundo orden para la remoción de la DQO.



De la figura 20, se puede observar que se obtiene una correlación de 0.9483, lo cual indica que la cinética que se ajusta a un modelo de segundo orden. Con una concentración inicial de 5432 ppm de DQO, se encontró una constante cinética de remoción cinética de $3 \cdot 10^{-6}$ l/mg*s. La

legislación ambiental colombiana exige la remoción del 80% de la carga orgánica vertida, para el caso de estudio se exigiría la remoción de 4265,4 ppm de DQO lo que según la cinética anterior se logra en 245 minutos (4 horas) y se debe verter el 20% que equivale a una concentración de 1086,4 ppm. (MIN AMBIENTE; Decreto 1594,1984).

5.6.2.3. Análisis de remoción del Carbono Orgánico Total (COT)

En la tabla 14, se presenta los valores de remoción de COT obtenidos en el tiempo con el fin de evaluar el proceso de electrocoagulación.

Tabla 14. Variación del COT en el tiempo.

Tiempo (min.)	COT	% Remoción COT
0	850	0.00%
240	400	52.94%
420	250	70.59%

Para obtener una remoción del 80% que corresponde al porcentaje de mineralización obtenido, es necesario realizar el tratamiento por 672 minutos (11 horas).

5.6.2.4. Análisis de remoción surfactantes.

Tabla 15. Variación de la concentración de surfactantes en el tiempo.

Tiempo (min.)	Surfactantes (mg/l)	% de Remoción
0	402	0
180	299	25,62

En la tabla 15, se puede observar el porcentaje de remoción obtenido en el tratamiento para tres horas, este porcentaje fue de 25,62 %. La saponificación es el proceso de conversión de las grasas y aceites a surfactantes o jabones, este proceso se da por medio de la hidrólisis básica y la adición de calor, adicionando, hidróxido de sodio acuoso y cloruro de sodio, generando que el surfactante o jabón se precipita (McMurry, 2006).

En el proceso de electrocoagulación aplicado a las muestras de aguas residuales, puede ocurrir el proceso de saponificación mencionado anteriormente, debido a la adición de hidróxido de potasio y cloruro de sodio, necesarios en el proceso de desengrase de la planta ensambladora de autopartes, generando una sustancia activa al azul de metileno (MBAS: patrón de medición de los surfactantes), produciendo una interferencia positiva que compensaría el porcentaje de surfactante ya removido, motivo por lo cual, posiblemente el porcentaje de remoción de surfactantes da relativamente bajo.

5.6.2.5. Análisis de Biodegradabilidad de la muestra.

La biodegradabilidad es la capacidad que tiene la solución para ser descompuesta por algunos microorganismos del ambiente (principalmente bacterias aerobias), hasta sus elementos constituyentes más simples, en un período de tiempo relativamente corto (Crites y Tchobanoglous, 2000).

Tabla 16. Datos de biodegradabilidad

Tiempo (min.)	DQO	DBO₅	DBO₅/DQO
0	5432	925	0.1703
180	1832	997	0.5442

En la tabla 16 se puede observar que las muestras para un tiempo de tratamiento de 180 minutos, pasaron de tener una biodegradabilidad de 0,1703, punto en el cual la muestra es no biodegradable, a 0,5442, punto en el cual la muestra es biodegradable, lo cual indica un incremento del 219% en la biodegradabilidad de la solución. Esto significa que el proceso de electrocoagulación realizado en la solución logra un alto porcentaje de recuperación. (Crites y Tchobanoglous, 2000).

5.6.2.6. Análisis de potencia.

Con el objetivo de determinar la potencia necesaria para remover el 80% de los contaminantes principales (DQO y grasas y aceites), es necesario realizar el tratamiento por 245 minutos, por lo tanto es el tiempo utilizado para calcular el consumo de energía del proceso. (Serway, 2005)

$$P = V * I \tag{9}$$

Donde,

P, potencia, en kw.

V, voltaje, en voltios.

I, corriente, en Amperaje.

$$P = 13.2v * 2.58A = 34.06kw$$

La potencia obtenida para el estudio cinético para las condiciones óptimas es de 34.06 kw, que representa un consumo de energía en el tiempo de 245 minutos, de 139.06 kwh.

5.6.3. Estudio cinético alternativo.

Este estudio cinético se realizó con las condiciones necesarias para alcanzar un porcentaje de remoción de grasas y aceites que cumpla con las condiciones mínimas legales, que según lo estipulado en el Decreto

1594 de 1984 del Uso del Agua y Residuos líquidos, es del 80% (MIN AMBIENTE; Decreto 1594,1984). Estas condiciones fueron determinadas en el diseño de experimentos, y corresponden a pH= 12, conductividad= 15 mS/cm, separación entre electrodos= 2 cm, ánodo= hierro, cátodo= aluminio, v= 5, tiempo de residencia= 7 horas (420min), operando en forma batch en un reactor de dos litros.

De esta manera se esta incurriendo en una reducción de gastos de electricidad y en consumo de electrodos que puede ser significativa a escala industrial, debido a la disminución en el voltaje para este estudio cinético, que pasó de 13.2 a 5 voltios .

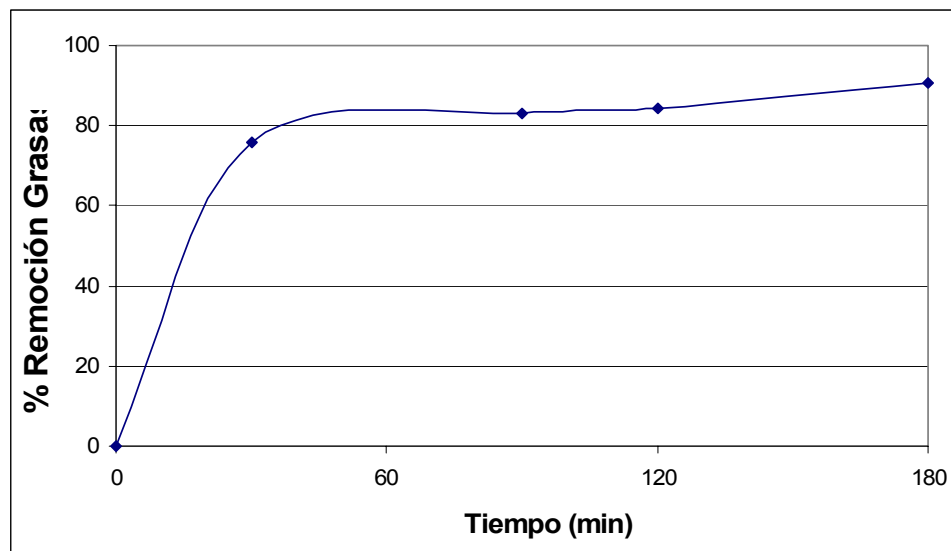
5.6.3.1. Estudio cinético para la remoción de grasas y aceites.

En la tabla 17, se presenta los valores de remoción de grasas y aceites obtenidos en el tiempo con el fin de evaluar el proceso de electrocoagulación.

Tabla 17. Variación de la concentración de grasas y aceites en el tiempo.

Tiempo (min)	Concentración de grasas (mg/l)	% Remoción de grasas
0	723,1	0
30	173,8	75,96
90	121,8	83,16
120	114,0	84,23
180	68,2	90,57

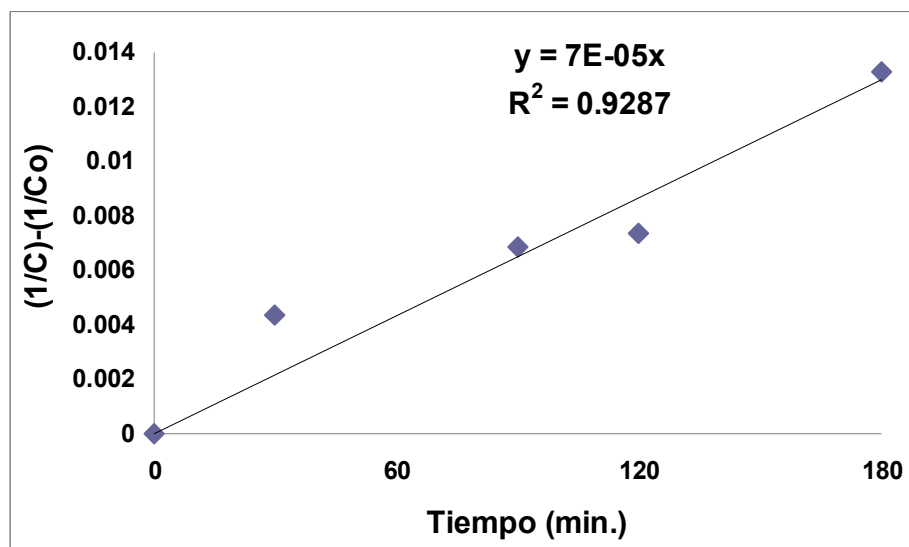
Figura 23. Remoción de grasas y aceites en el tiempo.



En la tabla 17 y la figura 23, se puede observar que la concentración de grasas y aceites disminuyó hasta un 90,57% para un tiempo de 180 minutos. Es importante analizar, además de las grasas y aceites, la demanda química de oxígeno, el carbono orgánico total, la demanda biológica de oxígeno y los surfactantes aniónicos, por lo cual no se puede concluir que el tratamiento da resultados óptimos para 180 minutos.

Para determinar las constantes cinéticas de la reacción a la cual se ajusta el modelo, se realiza un análisis de los datos de la remoción de grasas y aceites, analizando los modelos cinéticos de orden, uno, dos y tres. Para este caso, la cinética de segundo orden es la que mejor se ajusta. (Levenspiel, 1999)

Figura 24. Método de integración cinética de segundo para la remoción de grasas y aceites.



Según lo observado en la figura 24, se obtuvo una buena correlación, por lo cual las predicciones realizadas con esta ecuación son confiables, la figura nos muestra una constante de $7 \cdot 10^{-5}$ l/mg*s, con lo cual para lograr el 80% de remoción exigido por la legislación ambiental colombiana, es necesario realizar el tratamiento por 79,038 minutos. (MIN AMBIENTE; Decreto 1594,1984).

5.6.3.2. Estudio cinético para la remoción de la DQO.

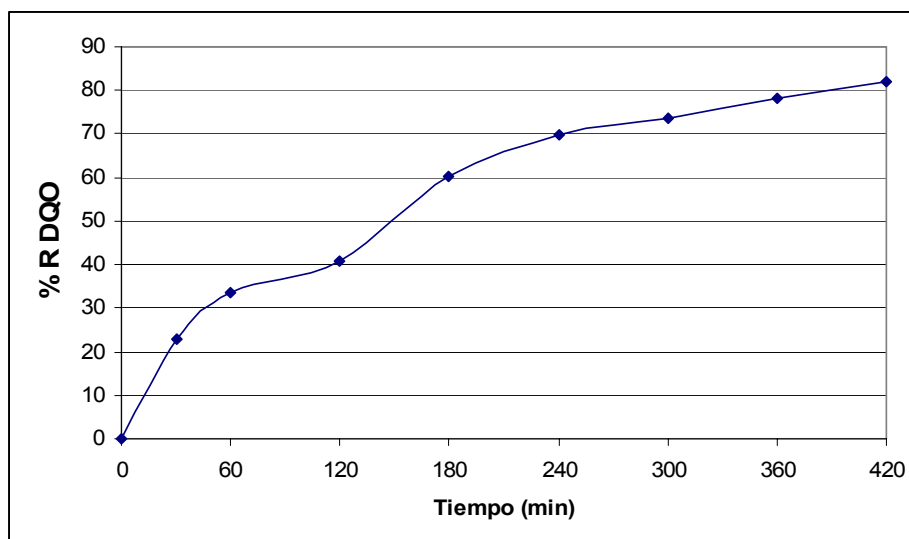
En la tabla 18, se presenta los valores de remoción de la DQO obtenidos en el tiempo con el fin de evaluar el proceso de electrocoagulación.

Tabla 18. Variación de la DQO en el tiempo.

Tiempo (min.)	DQO (ppm)	% R DQO
0	4150	0,00
30	3200	22,89
60	2750	33,73
120	2450	40,96
180	1650	60,24
240	1250	69,88
320	1100	73,49
360	900	78,31
420	750	81,93

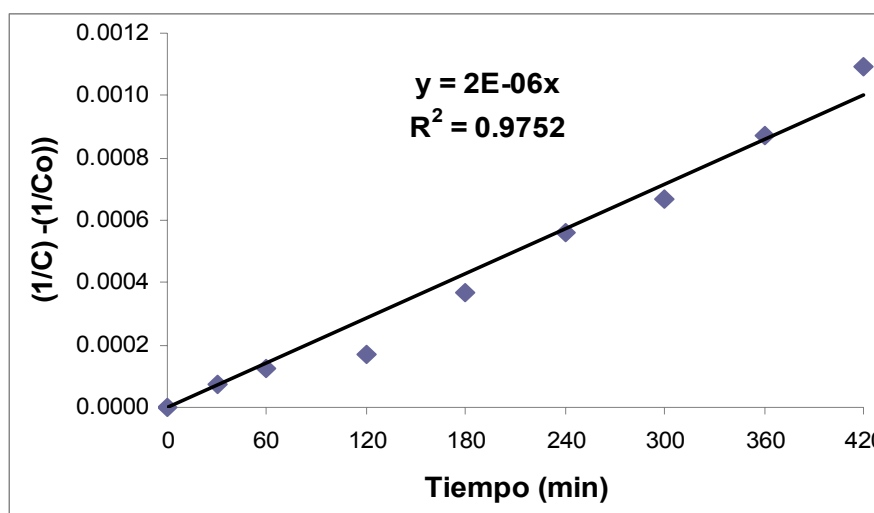
En la figura 25, se puede observar que a las 7 horas de transcurrido el proceso de electrocoagulación se alcanza una remoción de la DQO del 81,93 %, lo cual supera el 80% de remoción exigido por la legislación ambiental colombiana. (MIN AMBIENTE; Decreto 1594,1984).

Figura 25. Remoción de la DQO en el tiempo.



Para determinar las constantes cinéticas de la reacción, se realizó un análisis de los datos de la remoción de DQO, evaluando los modelos cinéticos de orden cero, uno, dos y tres. En la figura 26 se puede observar el método de integración de segundo orden para la remoción de la DQO para las condiciones establecidas. Para este caso, la cinética de segundo orden es la que mejor se ajusta. (Levenspiel, 1999)

Figura 26. Método de integración cinética de segundo orden para la remoción de DQO.



De la figura 26 se puede observar que se obtiene una correlación de 0.9752, lo cual indica que el modelo que se ajusta a una cinética de segundo orden. Con una concentración inicial de 4150 ppm de DQO, se encontró una constante cinética de remoción de $2 \cdot 10^{-6}$ l/mg*s. La legislación ambiental colombiana exige la remoción del 80% de la carga orgánica vertida, para la muestra se exigiría la remoción de 3320 ppm de DQO lo que según el estudio cinético se logra en 388 min, y se debe verter el 20% que equivale a una concentración de 830 ppm. (MIN AMBIENTE; Decreto 1594,1984).

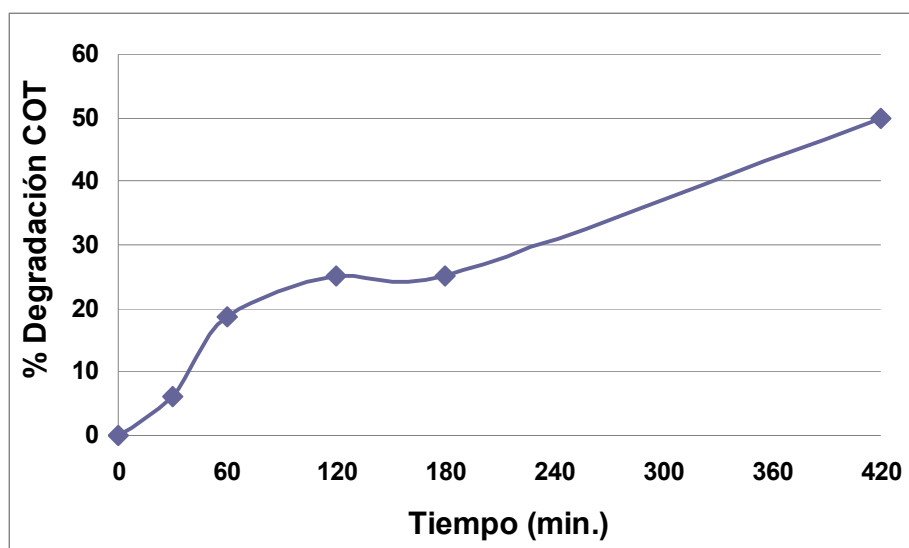
5.6.3.3. Análisis de la remoción del Carbono Orgánico Total (COT)

En la tabla 19 se presenta los valores de remoción de COT obtenidos en el tiempo con el fin de evaluar el proceso de electrocoagulación.

Tabla 19. Variación del COT en el tiempo.

Tiempo (min.)	COT	% Remoción COT
0	800	0,00
30	750	6,25
60	650	18,75
120	600	25,00
180	600	25,00
420	400	50,00

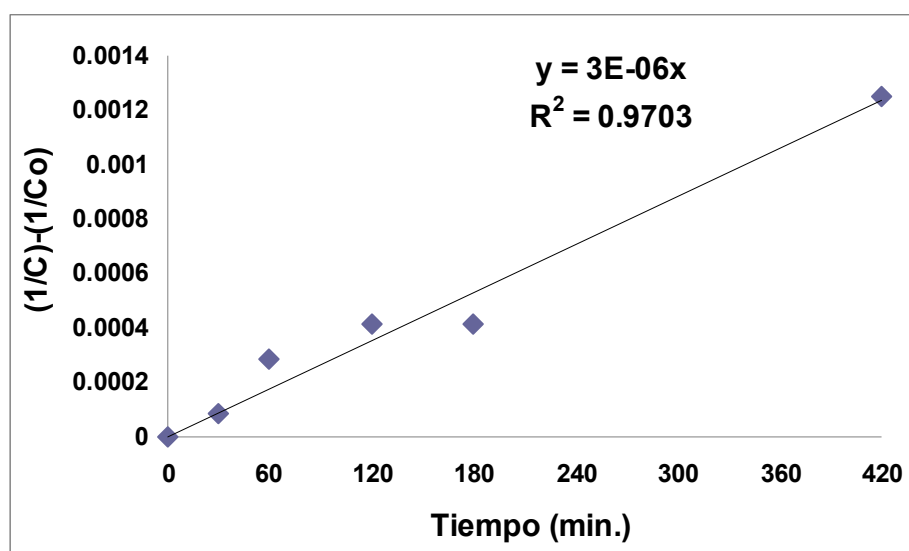
Figura 27. Remoción del COT en el tiempo.



En la figura 27, se puede observar que a las 7 horas de transcurrido el proceso de electrocoagulación se alcanza una remoción de la DQO del

50%. Para determinar las constantes cinéticas de la reacción a la cual se ajusta el modelo, se realiza un análisis de los datos de la remoción de COT, analizando los modelos cinéticos de orden cero, uno, dos y tres. Para este caso, la cinética de segundo orden es la que mejor se ajusta. (Levenspiel, 1999)

Figura 28. Método de integración cinética de segundo orden para la remoción de COT.



De la figura 28, se puede observar que la línea de tendencia obtiene una correlación de 0.970, lo cual indica que el modelo se ajusta al modelo cinético de segundo orden. Para una concentración inicial de 800 ppm de COT, se encontró una constante cinética de remoción de $3 \cdot 10^{-6}$ l/mg*min. Para obtener una remoción del 80% que corresponde al porcentaje de mineralización obtenido, es necesario realizar el tratamiento por 834 minutos (13,9 horas).

5.6.3.4. Análisis de Remoción de surfactantes.

Tabla 20. Variación de la concentración de surfactantes en el tiempo.

Tiempo (min.)	Surfactantes (mg/l)	% de Remoción
0	368	0
180	293	20,38

En la tabla 20 se puede observar el porcentaje de remoción obtenido en el tratamiento para tres horas (180 min.), este porcentaje fue de 20,38%.

En el proceso de electrocoagulación aplicado a las muestras de aguas residuales, puede ocurrir el proceso de saponificación, debido a la adición de hidróxido de potasio y cloruro de sodio, necesarios en el proceso de desengrase de la planta ensambladora de autopartes, generando una sustancia activa al azul de metileno (MBAS: patrón de medición de los surfactantes), produciendo una interferencia positiva que compensaría el porcentaje de surfactante ya removido, motivo por el cual el porcentaje de remoción de surfactantes obtenido es relativamente bajo.

5.6.3.5. Análisis de Biodegradabilidad de la muestra.

La biodegradabilidad es la capacidad que tiene la muestra para ser descompuesta por algunos microorganismos del ambiente (principalmente bacterias aerobias), hasta sus elementos constituyentes más simples, en un período de tiempo relativamente corto. La fracción de biodegradabilidad es un indicador de si la o las sustancias a degradar son fácilmente biodegradables o no, además es útil en la selección del tipo de tratamiento a utilizar para un agua residual en particular. Los valores de la relación DBO_5/DQO en aguas residuales no tratadas oscilan entre 0.3 y 0.8. Si la relación DBO_5/DQO es mayor que 0.4 se considera que esta

agua es fácilmente tratable por métodos biológicos. Si esta relación es menor a 0.3 se considera que el residuo puede tener componentes tóxicos (Crites y Tchobanoglous, 2000).

Tabla 21. Datos de biodegradabilidad

Tiempo (min.)	DQO	DBO ₅	DBO ₅ /DQO
0	4150	919.5	0.2216
180	1650	927	0.5619

En la tabla 21 se puede observar que las muestras para un tiempo de tratamiento de 180 minutos, pasaron de tener una biodegradabilidad de 0,2216, punto en el cual la muestra no es biodegradable, a 0.5619, punto en el cual la muestra es biodegradable, lo cual indica un incremento del 153,56% en la biodegradabilidad. Esto significa que el tratamiento realizado a las muestras logra en un alto porcentaje la recuperación de las aguas residuales (Crites y Tchobanoglous, 2000).

5.6.3.6. Análisis de hierro y aluminio.

En el proceso de electrocoagulación ocurre una liberación de iones de los electrodos, en este caso ambos electrodos tienen una carga positiva y negativa, al trabajar una configuración bipolar, por lo cual se debe realizar un análisis del contenido de hierro y aluminio disueltos en las muestras por ambos electrodos.

Los electrodos de hierro forman $\text{Fe}(\text{OH})_n$ y polihidróxidos como: $\text{Fe}(\text{H}_2\text{O})_6^{3+}$, $\text{Fe}(\text{H}_2\text{O})_5(\text{OH})^{2+}$, $\text{Fe}(\text{H}_2\text{O})_4(\text{OH})_2^+$, $\text{Fe}_2(\text{H}_2\text{O})_8(\text{OH})_2^{4+}$, $\text{Fe}_2(\text{H}_2\text{O})_6(\text{OH})_4^{4+}$ y los electrodos de aluminio producen especies Al^{3+} , $\text{Al}(\text{OH})^{2+}$ (Mollah et al, 2004). La determinación se llevó a cabo según los métodos analíticos del numeral 4.3.4 y 4.3.5.

Tabla 22. Cuantificación de hierro y aluminio disueltos.

Material	Inicial (ppm)	Final (ppm)
Hierro	0,03	3,88
Aluminio.	0,97	1,76

De la tabla 18 se puede observar que la concentración de hierro y aluminio aumentó en ambos casos, debido a la generación de hidróxidos y polihidróxidos de hierro y aluminio mencionados anteriormente. Estas muestras presentan concentración mínimas, las cuales se encuentran dentro del límite permisible de las EMAR (entidad encargada del manejo y administración del recurso) encontradas en el decreto 1594 de 1984. (MIN AMBIENTE; Decreto 1594,1984).

5.6.3.7. Análisis de potencia.

Con el objetivo de determinar la potencia necesaria para remover el 80% de los contaminantes principales (DQO y grasas y aceites), es necesario realizar el tratamiento por 388 minutos, por lo tanto es el tiempo utilizado para calcular el consumo de energía del proceso.

De la ecuación 9.

$$P = 5v * 0.565A = 2.825kw$$

La potencia obtenida para el estudio cinético para las condiciones alternas es de 2.825 kw, que representa un consumo de energía en el tiempo de 388 minutos, de 18.28 kwh.

Se realizó el estudio cinético alternativo con el fin de efectuar un análisis del comportamiento del proceso, con las condiciones que

generen un ahorro en el costo del proceso, en este caso se analiza el consumo de energía, representado por la potencia. Para el estudio cinético con las condiciones óptimas, la potencia calculada fue de 34.06 kw, mientras que la potencia calculada para el estudio cinético alternativo fue de 2.852 kw, encontrando una disminución del 91.63% en la potencia.

6. ANÁLISIS ECONÓMICO PRELIMINAR.

El análisis económico preliminar se realizó para condiciones en las cuales se pretende reducir los costos del proceso. Un voltaje de 5, distancia entre electrodos de 2 cm, pH 12, conductividad de 15 ms/cm, usando como ánodo de sacrificio hierro, 450 rpm de agitación, usando un reactor de 12.5 m³, operado en forma batch con un tiempo de residencia de 3 horas, sin embargo, en el escalamiento hay que tener en cuenta que durante un turno laboral, solo se realiza un tratamiento debido a los tiempos de carga y descarga del reactor. Utilizando una muestra con una concentración de 800 ppm de grasas y aceites y 368 ppm de surfactantes aniónicos. Este análisis está integrado por los costos necesarios en equipos, instalaciones, planes de mantenimiento, disposición final de lodos, mano de obra directa y costo de materiales. Seguido de la determinación de los costos se realiza un análisis financiero con el fin de poder determinar el valor presente neto (VPN) del proyecto, y de esta manera conocer la rentabilidad a cinco años (Bringham and Houston, 2005; Bayramoglu et al, 2007).

6.1. ESCALAMIENTO DEL PROCESO.

Para el escalamiento se tienen en cuenta las variables del proceso, el tamaño de los equipos y de los electrodos, para un proceso de desengrase de autopartes con un caudal de 12.5 m³/día de agua residual.

Las condiciones de escalamiento son:

Tamaño de electrodo: 2.5m * 2 m. * 3 mm. de espesor.

Distancia entre electrodos: 50 cm.

Agitación: 157 r.p.m.

Dimensión del agitador: 15 cm de diámetro.

Dimensión del reactor: 12.5 m³.

Voltaje: 440V.

Los valores de voltaje y amperaje se fijan, basados en los que realmente son utilizados en la industria, entonces para esto se fijan en 440 V y 100 A.

El tamaño de los electrodos y la distancia entre ellos, fueron determinados según Goodridge, 1995, en el cual dependiendo del tamaño del reactor establecido para el proceso, se encuentra el tamaño adecuado de electrodos y la separación entre ellos

La agitación se escoge con el fin de obtener el mismo número de Reynolds obtenido en el laboratorio. El número de Reynolds está dado por la siguiente ecuación (Green y Perry, 1997):

$$Re = \frac{Da^2 N \rho}{\mu} \quad (10)$$

Re, Es el número de Reynolds

Da², es el diámetro del impulsor (m²)

N, son las revoluciones por segundo (rps)

ρ, es la densidad del fluido (Kg/m³)

μ, es la viscosidad del fluido (Pa*s).

Cálculo del Número de Reynolds.

$$Re = \frac{(0.028m)^2 * \left(75 \frac{rev}{seg}\right) * \left(1019.5 \frac{Kg}{m^3}\right)}{\left(0.00107 \frac{Kg}{m * seg}\right)} = 56024.86$$

Para las condiciones trabajadas en el laboratorio el número de Reynolds es 56024,86, se eligió un agitador que es normalmente usado en la industria, de 15 cm de diámetro y se realizó el cálculo de las revoluciones por minuto, con el fin de mantener el Reynolds constante.

$$Re = \frac{(0.15m)^2 * \left(X \frac{rev}{seg}\right) * \left(1019.5 \frac{Kg}{m^3}\right)}{\left(0.00107 \frac{Kg}{m * seg}\right)} = 56024.86 \Rightarrow X = 2.61 \frac{rev}{seg} = 157.r.p.m$$

Los valores de voltaje y amperaje están limitados por los que realmente son utilizados en la industria, entonces para esto se fijan en 440 V y 100 A.

El escalado del tamaño de los electrodos se realizó teniendo en cuenta la relación existente entre el volumen del reactor a escala de laboratorio y el área sumergida de los electrodos usados. Se utiliza un reactor operado en batch, de 12.5 m³ de capacidad (2.24 m de alto, 2.5 m de ancho y 2.5 metros profundidad) y electrodos de 2.5 m de alto, un ancho de 2 m, con un espesor de 3 mm, y área de electrodos sumergida de 4 m².

6.2. COSTOS DE OPERACIÓN

Los costos de operación son la valorización de todos los recursos empleados o gastos necesarios para la operación (Turton et al, 2003).

Tabla 23. Información para el cálculo del costo de operación.

Parámetro	Costo
Electricidad (\$/Kwh.)**	142
Mano de Obra (\$/mes) ***	516500
Costo de disposición de lodos (\$/m ³)****	39000
Materiales*****	
Electrodo Aluminio (\$/Kg)	19900
Electrodo Hierro (\$/Kg)	5100

** Tarifa EPM sector Industrial.

*** Banco de la República para 2008

**** Tarifa Enviaseo para 2008.

***** Cotización ferretería Ferroindustrial.

En la tabla 19 se puede encontrar la información pertinente para realizar el cálculo de los costos operación, en los cuales se incurre en el escalado del proyecto.

El costo de operación esta dado por la siguiente ecuación.

$$CostoOperacion = CM + CU + CL + CF \quad (11)$$

Donde

CM, es el costo del material

CU, es el costo de servicios industriales (Electricidad)

CL, es el costo de mano de obra

CF, son otros costos fijos (Disposición de lodos)

6.2.1. Costo de Materiales.

El costo del material esta dado en este caso por el consumo de los electrodos, este se calcula por (Bayramoglu et al, 2004):

$$CM = b * C_{electrodo} \quad (12)$$

Donde,

b, es el costo del material del electrodo (\$/Kg)

C_{electrodo}, es el consumo del electrodo (Kg de electrodo disuelto)

Para evaluar el consumo de los electrodos en la reacción se pesaron los electrodos antes y después del tratamiento. Este análisis se realizó para una hora y para una pareja de electrodos, debido a que los tratamientos se realizaron con una combinación de cuatro electrodos, dos de hierro, y dos de aluminio.

Tabla 24. Consumo de electrodos.

Condiciones	Aluminio (g)	Hierro (g)
Peso de los electrodos antes del tratamiento.	132,61	427,08
Peso de los electrodos después del tratamiento.	132,23	426,275
Consumo electrodos g/h.	0,38	0,805

En la tabla 20 se puede observar el consumo de los electrodos durante una hora del proceso. Por lo tanto, el costo del material de aluminio y hierro, es el siguiente:

$$CM_{\text{aluminio}} = 19.900 \frac{\$}{\text{kg}} * 0,1396 \frac{\text{kg}}{\text{mes}} = 2.780 \frac{\$}{\text{mes}}$$

Para los electrodos de 4 m² de aluminio.

$$CM_{\text{aluminio}} = 1'710.000 \frac{\$}{\text{mes}}$$

$$CM_{\text{hierro}} = 5.100 \frac{\$}{\text{kg}} * 0,2958 \frac{\text{kg}}{\text{mes}} = 1.510 \frac{\$}{\text{mes}}$$

Para los electrodos de 4 m² de hierro.

$$CM_{\text{Hierro}} = 929.230 \frac{\$}{\text{mes}}$$

Estos cálculos se realizaron para una planta con un turno de 8 horas, para realizar un tratamiento al día, cada tratamiento sería de 3 horas, utilizando una combinación de cuatro electrodos, dos de hierro y dos de aluminio, de manera intercalada, usando como ánodo de sacrificio un electrodo de hierro, y conectados con una configuración bipolar.

6.2.2. Costo de la Electricidad.

El costo de la electricidad esta dado por su costo y el consumo de energía que se requiere para llevar a cabo el proceso, este se calcula mediante la siguiente expresión: (Bayramoglu et al, 2004):

$$CU = a * C_{\text{electricidad}} \tag{13}$$

$$C_{electricidad} = \frac{V * A * 24h * 30días}{1000} \quad (14)$$

Donde,

a , es el costo de la electricidad (\$/ Kwh.)

$C_{electricidad}$, es el consumo de electricidad (Kwh.)

V , es el Voltaje (V)

A , es el Amperaje (A)

A partir de la ecuación 16.

$$C_{electricidad} = \frac{440V * 100A * 15h * 24,5días}{1000} = 16170kWh / mes$$

$$CU = 142 \frac{\$}{kWh} * 16170 \frac{kWh}{mes} = 2'296.140\$ / mes$$

6.2.3. Costo de Mano de Obra.

Es el costo del personal requerido para la operación de la planta y esta dado por la siguiente ecuación (Turton et al., 2003):

$$CL = \text{Salario mínimo} * N_{OL} \quad (15)$$

Donde,

$$N_{OL} = \frac{a}{c} \quad (16)$$

N_{OL} , es el número de operarios requeridos para realizar el proceso por turno.

a , es el número de turnos por año necesarios para el proceso

c , es el número de turnos de por operario

$$a^* = 312 \frac{\text{dias}}{\text{año}} * 1 \frac{\text{turno}}{\text{dia}} = 312 \frac{\text{turnos}}{\text{año}}$$

$$N_{OL} = \frac{312 \frac{\text{turnos}}{\text{año}}}{245 \frac{\text{turnos}}{\text{año}}} \approx 1.27 \text{operarios}$$

A partir de la ecuación 17-

$$C_{manodeobra} = 516.500 \frac{\$}{\text{mes} * \text{operario}} * 1 \text{operarios} = 516.500 \frac{\$}{\text{mes}}$$

Los cálculos se realizaron para una planta que opera 52 semanas al año, con un turno diario de 8 horas cada turno. El salario de los operarios será el salario mínimo legal vigente para el 2008, con el subsidio de transporte incluido.

6.2.4. Costos fijos. Disposición final de lodos.

El costo de la disposición final de los lodos generados durante el de electrocoagulación esta dado por el costo de su disposición final, el transporte y la cantidad de lodos generados (Bayramoglu et al, 2004):

$$CF = d * Cl \tag{17}$$

Donde,

d , es el costo de la disposición final de los lodos ($\$/m^3$)

Cl , es la cantidad de lodos generados durante el proceso (Kg/ mes)

$$Cl = 39000 \frac{\$}{kg}$$

La cantidad de lodos producido por el tratamiento usando un electrodo de hierro como ánodo, es aproximadamente el 20%, por lo tanto, la producción de lodos a escala industrial sería de 2 kg por cada tratamiento. (Bayramoglu et al, 2007)

$$CF = 2 \frac{\text{kg}}{\text{tratamiento}} * 1 \frac{\text{tratamientos}}{\text{día}} * 24,5 \frac{\text{días}}{\text{mes}} * 39000 \frac{\$}{\text{kg}} = 1'911.000 \frac{\$}{\text{mes}}$$

De la ecuación 12 se obtiene:

$$\begin{aligned} \text{CostoOperacion} &= 1'710.000 \frac{\$}{\text{mes}} + 929.230 \frac{\$}{\text{mes}} + 2'296.140 \frac{\$}{\text{mes}} + 516.500 \frac{\$}{\text{mes}} \\ &+ 1'911.000 \frac{\$}{\text{mes}} = 7'407.870 \frac{\$}{\text{mes}} \end{aligned}$$

El costo de operación sería 7'407.870 \$/mes, para una planta de operación con un reactor, realizando un tratamiento por día, seis días a la semana, para un total de 312 tratamientos/año.

6.3. COSTO DE CAPITAL

En algunas ocasiones es muy complicado tener la información de los costos de una configuración de una nueva planta, por lo cual se utiliza un factor conocido como el Factor Lang, multiplicándolo por la sumatoria del costo de los equipos representativo. El Factor Lang obtiene diferentes valores dependiendo del tipo de planta química que se pretende instalar. La ecuación del costo de capital esta dada por (Turton et al, 2003):

$$C_{TM} = F_{lang} \sum_{i=1}^n C_{pi} \quad (18)$$

Donde

CTM, es el costo de capital de la planta

C_{p,i}, es el costo de compra de los equipos representativos

n, es el numero de equipos representativos

F_{Lang}, Factor Lang.

El valor del factor Lang para una planta de procesamiento de líquidos es de 4,74.

El cálculo de depreciación de los equipos se realizó mediante el método de línea de recta, el cual supone que el activo se desgasta por igual durante cada período contable (Turton et al., 2003):

$$Depreciacion = \frac{Costo - Valordedesecho}{Añosvidautil} \quad (19)$$

Asumiendo un valor de desecho cero.

Tabla 25. Depreciación de los equipos

Equipo	Vida útil (años)*	Costo (\$)	Depreciación (\$/años)
Reactor 12.5 m ³ **	20	3'000.000	150.000
Agitador mec ***	10	2'400.000	240.000

* (Bayramoglu et al, 2007).

** Cotización PV y Fibra LTDA, para un solo reactor 1'500.000

*** V-Control, para un solo agitador

* * * * Los cálculos se hicieron tomando como referencia el año contable (30 días/mes y 360 días/año)

Cálculo del costo de capital.

$$C_{TM} = 4,74 * (250.000 + 200.000) = 2'133.000 \frac{\$}{mes}$$

6.4. COSTO TOTAL

El costo total del proyecto está dado principalmente por los costos de operación y por los de capital, como se presenta en la siguiente ecuación: (Bayramoglu et al, 2007)

$$Costototal = Costooperaciòn + Costodecapital \quad (20)$$

$$Costototal = 5'840.620 \frac{\$}{mes} + 2'133.000 \frac{\$}{mes} = 7'973.620 \frac{\$}{mes}$$

El costo total del proyecto sería 7'973.620 \$/mes, sin tener en cuenta una posible recuperación de lodos.

6.5. ANÁLISIS DE RESULTADOS ECONÓMICOS

Para realizar el análisis económico se calcula el VPN (valor presente neto) y la TIR (Tasa Interna de Retorno) del proyecto, sin embargo, este proyecto no representa ingresos para la empresa, por lo tanto, se toma el ahorro por las tasas retributivas para DBO₅ y SS lo que en este caso equivaldría a: (MIN AMBIENTE; Decreto 1594,1984).

$$TR = CM * Tm * Fr \quad (21)$$

Donde,

Tr, es la tasa retributiva de DBO₅ o SS

CM, es la carga másica (Kg/día)

Tm, es tasa por Kg de DBO o de SS

Fr, es el factor regional

Las tasas retributivas para el 2008 para DBO y SS son de 91.39\$/kg y de 39.09 \$/kg respectivamente.

Fr de Medellín es de 1.5.

Cálculo para la tasa retributiva para DBO

$$TR_{DBO} = 12500 \frac{L}{dia} * 0.000919 \frac{kg}{L} * 91.39 \frac{\$}{Kg} * 24.5 \frac{días}{mes} * 1.5 = 38.581,71 \frac{\$}{mes}$$

Cálculo para la tasa retributiva para SS

$$TR_{SS} = 12500 \frac{L}{dia} * 0.002150 \frac{kg}{L} * 39.09 \frac{\$}{Kg} * 24.5 \frac{días}{mes} * 1.5 = 25.738,32 \frac{\$}{mes}$$

En la actualidad en Colombia no se cobra otras tasas retributivas por vertimiento de aguas residuales, en este caso es necesario tener en cuenta el servicio de alcantarillado que es prestado por las empresas públicas. El valor de este servicio en el municipio de Medellín para el sector industrial es de 1198,65\$/m³.

Cálculo para la tasa retributiva para el servicio de alcantarillado

$$TR_{ALCANTARILLADO} = 12.5 \frac{m^3}{dia} * 1523,27 \frac{\$}{m^3} * 24.5 \frac{dia}{mes} = 466.501,44 \frac{\$}{mes}$$

Para calcular el VPN se tomo el interés como el IBC para el año 2008 el cual es de 21.51% vigente hasta el 30 de Septiembre. (Resolución 1011, Superintendencia financiera).

Teniendo en cuenta que el 80% del caudal del agua para el proceso de desengrase se reutiliza, se estaría incurriendo en una reducción del consumo de agua de acueducto de:

$$Ahorro_agua = 80\% * 12.5 \frac{m^3}{dia} * 1198.65 \frac{\$}{m^3} * 24.5 \frac{dia}{mes} = 293.669,25 \frac{\$}{mes}$$

El total de ingresos estaría representada por la cantidad de efectivo que se estaría ahorrando la compañía en el caso de utilizar la planta de tratamiento de aguas residuales y estaría dada por:

$$Ingresos = 38.582 \frac{\$}{mes} + 25.739 \frac{\$}{mes} + 466.502 \frac{\$}{mes} + 293.669 \frac{\$}{mes} = 824.491 \frac{\$}{mes}$$

El análisis económico se realizó para un periodo de 5 años contables.

En la tabla 26 se muestra el flujo de caja del proyecto, con el cual se cálculo el Valor Presente Neto (VPN), con los ingresos y los egresos obtenidos, dando un valor de - \$145'467.770. Debido al resultado negativo del VPN la Tasa Interna de Retorno (TIR) no es aplicable su cálculo. Esto indica que el proyecto no es viable económicamente.

Tabla 26. Tabla de Evaluación de Costos.

ESTRUCTURA DEL COSTO DE OPERACIÓN								
Inflación (%) ANUAL	6,00%							
Ingresos	Cantidad	Mes	Año 0 (Inversión)	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5
Ahorro por no vertimiento (alcantarillado)	12.5 m ³	\$ 466.502	\$ 0	\$ 5.598.024	\$ 5.933.905	\$ 6.289.940	\$ 6.667.336	\$ 7.067.376
Ahorro por disminución de consumo	10 m ³	\$ 293.669	\$ 0	\$ 3.524.028	\$ 3.735.470	\$ 3.959.598	\$ 4.197.174	\$ 4.449.004
Tasa retributiva DBO	2150 mg/l	\$ 25.738	\$ 0	\$ 308.856	\$ 327.387	\$ 347.031	\$ 367.852	\$ 389.924
Tasa retributiva SS	919 mg/l	\$ 38.582	\$ 0	\$ 462.984	\$ 490.763	\$ 520.209	\$ 551.421	\$ 584.507
TOTAL		\$ 824.491	\$ 0	\$ 9.893.892	\$ 10.487.526	\$ 11.116.777	\$ 11.783.784	\$ 12.490.811
Egresos		Mes	Año 0	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5
Material		\$ 2.639.230	\$ 0	\$ 31.670.760	\$ 33.571.006	\$ 35.585.266	\$ 37.720.382	\$ 39.983.605
Electricidad		\$ 2.296.140	\$ 0	\$ 27.553.680	\$ 29.206.901	\$ 30.959.315	\$ 32.816.874	\$ 34.785.886
Mano de obra		\$ 516.500	\$ 0	\$ 6.198.000	\$ 6.569.880	\$ 6.964.073	\$ 7.381.917	\$ 7.824.832
Depreciación equipos		\$ 33.333	\$ 0	\$ 400.000	\$ 400.000	\$ 400.000	\$ 400.000	\$ 400.000
Disposición de lodos		\$ 1.911.000	\$ 0	\$ 22.932.000	\$ 24.307.920	\$ 25.766.395	\$ 27.312.379	\$ 28.951.122
TOTAL		\$ 5.485.203	\$ 0	\$ 65.822.440	\$ 69.747.786	\$ 73.908.654	\$ 78.319.173	\$ 82.994.323
Capital de Trabajo		Mes	Año 0	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5
Material		\$ 0	\$ 25.442.947	\$ 0				
Equipos		\$ 0	\$ 25.596.000	\$ 0				
TOTAL		\$ 0	\$ 51.038.947	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0
FLUJO TOTAL		Mes	Año 0	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5
Ingreso		\$ 824.491	\$ 0	\$ 9.893.892	\$ 10.487.526	\$ 11.116.777	\$ 11.783.784	\$ 12.490.811
Egreso		-\$ 5.485.203	\$ 0	-\$ 65.422.440	-\$ 69.347.786	-\$ 73.508.654	-\$ 77.919.173	-\$ 82.594.323
Capital de Trabajo		\$ 0	\$ 51.038.947	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 0
Flujo		-\$ 4.660.712	-\$ 51.038.947	-\$ 55.928.548	-\$ 59.260.261	-\$ 62.791.877	-\$ 66.535.389	-\$ 70.503.512
TASA DE INVERSION=	21,58%							
VPN=	-229.061.340							
TIR=								

7. CONCLUSIONES.

Para las condiciones estudiadas en el tratamiento mediante electrocoagulación se determinaron las condiciones óptimas, las cuales fueron: voltaje 13.2, pH 12, hierro como electrodo de sacrificio, distancia entre electrodos 1,5 cm.

En los ensayos experimentales se alcanzaron los mayores porcentajes de remoción de grasas y aceites (98,13%), y de remoción de DQO (57%) para un tiempo de residencia de tres horas, de esta manera se logra las condiciones mínimas de remoción de grasas y aceites estipuladas por la Ley en el Decreto 1594 de 1984.

En el estudio cinético para las condiciones óptimas de operación, con tiempo de residencia siete horas, se obtuvieron los porcentajes de remoción, grasas y aceites 94.96%, DQO 87.44%, COT 70.59% y para surfactantes se obtuvo una remoción de 25.22% en un tiempo de 3 horas. Los resultados obtenidos cumplen satisfactoriamente las expectativas del proyecto, exceptuando el porcentaje de remoción de surfactantes, ocasionado porque el proceso se desarrolla en un medio en las condiciones para que las grasas y aceites se saponifiquen.

En el estudio cinético alternativo, con tiempo de residencia siete horas se obtuvieron los porcentajes de remoción, grasas y aceites 90.57%, DQO 81.93%, COT 50% y para surfactantes se obtuvo una remoción de 20.38% en un tiempo de 3 horas, con el estudio alternativo se puede observar que con estas condiciones se cumplen satisfactoriamente los objetivos del proyecto.

Por medio del cálculo de la potencia, se pudo observar que para las condiciones alternativas el consumo de energía disminuyó 86,84% con respecto a las condiciones del estudio cinético para las condiciones óptimas.

Actualmente la legislación ambiental colombiana no es muy estricta con los vertimientos de contaminantes, aunque este motivo, no es óbice para que un proyecto se descarte en un largo plazo. En el análisis económico se puede observar que el proyecto no es viable financieramente. Sin embargo, teniendo en cuenta los convenios ambientales internacionales, se prevé un incremento en las restricciones de los vertimientos de contaminantes, convirtiéndose de esta manera en un proyecto de un alto impacto social, ambiental; y viable financieramente.

Mediante el proceso de electrocoagulación, se logró una alta recuperación del agua residual del proceso de desengrase de autopartes, logrando una reutilización del 90% aproximadamente, lo cual genera un ahorro significativo en el consumo del agua, evitando el consumo desmedido de este recurso natural.

8. RECOMENDACIONES

Se puede observar que el proceso tiene una buena recuperación de todos los contaminantes analizados, con excepción de los surfactantes (20% de remoción), esto puede haber sido causado por la posible saponificación de las grasas en el medio alcalina, lo cual generaría una sustancia activa al azul de metileno (MBAS: patrón de medición de los surfactantes), lo cual produce una interferencia positiva que compensaría el % de surfactante ya degradado. Por lo cual se sugiere un estudio a fondo de la posible saponificación de las grasas y aceites presentes en esta muestra.

En todos los tratamientos realizados en el proyecto se utilizó una agitación de 450 r.p.m., encontrado en la literatura como óptima en los procesos de electrocoagulación de grasas, debido a que ayuda que el agua contenida en el reactor tenga una concentración de iones constante. Aunque según lo observado en los tratamientos, la agitación en algunas ocasiones generaba desprendimientos de los coágulos generados por los hidróxidos y los polihidróxidos, por lo cual se recomienda un análisis del efecto agitación, debido a que al disminuirla se podría favorecer el proceso de sedimentación de los sólidos y generar un agua más clara y libre de material particulado.

Se encontró que en los tratamientos realizados, la temperatura incrementó hasta aproximadamente 40°C, siendo este aumento beneficioso, debido a que aumenta la conductividad del proceso, por lo cual, es recomendable analizar los beneficios que tendría el aislamiento del reactor con el fin de evitar las pérdidas de calor.

En algunos artículos de la literatura se encontró, que las configuraciones bipolares en serie pueden generar un consumo de energía menor que la

configuración utilizada, para cierto tipo de contaminantes, por lo cual es recomendado realizar pruebas con diferentes configuraciones de electrodos, con el fin de disminuir el consumo de energía, lo que incurre a una disminución de costos del proceso.

BIBLIOGRAFÍA

1. APHA, AWWA, WPCF. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. 21^a Edición, 2007.
2. Arslan-Alaton, Idil, Kabdash, Isik, Hanbaba, Deniz, kuybu, Elif, "Electrocoagulation of a real reactive dye bath effluent using aluminum and stainless steel electrodes", Journal of Hazardous Materials. Vol. 150, pp. 166-173, 2007.
3. Bayramoglu M; Kobya M; Eyvaz M. "Treatment of the textile wastewater by electrocoagulation Economical evaluation". Chemical Engineering Journal. Vol 128, pp. 155-161, 2007.
4. Bayramoglu M; Kobya M; O. Can; M. Sozbir. "Operating cost analysis of electrocoagulation of textile dye wastewater". Separation and Purification Technology. Vol 37, pp. 117-125, 2004.
5. Bensadok, K, Benammar, S, Lopicque, F, Nezzal, G, "Electrocoagulation of cutting oil emulsions using aluminium plate electrodes", Journal of Hazardous Materials, Vol 152, pp. 423-430, 2008.
6. Berk, N Kenneth, CAREY, Patrick. "Análisis de Datos". Ed. Thomson Learning, 1^a Edición, pp. 311-312, 402-403, 2001.
7. Brillas, E; Garrido, J.A; Rodríguez, R.M; Arias, C.; Cabot, P.L; Centellas, F. "Wastewater by electrochemical advanced oxidation processes using a BOD anode an electrogenerated H₂O₂ with Fe(II) and UVA light as catalysis". Portugaliae Electrochimica Acta 26, pp. 15-46, 2008.

8. Bringham, Eugene F, Houston, Joel F. "Fundamentos de administracion financiera", Ed Cengage Learning Editores. 10a Edición, pp. 650-720, ISBN-10: 9706864318, 2006.
9. Brown, T; LeMay, H; Bursten B. Química la ciencia central. Séptima Edición, Editorial Pearson. 1998. ISBN: 970-170169-0.
10. Calderon-Sáenz, Felipe, Manual de Operación, "Demanda Bioquímica de Oxígeno: Técnica Respirométrica", Mayo, 2007.
11. Cameselle, C, Sanróman, M.A, Pazos, M, Ricart, M.T, "Decolourisation of Textile Indigo Dye by DC Electric Current", Engineering Geology. Vol. 77, pp. 253-261, 2005.
12. Can, O.T, Demirbas, E, Bayramoglu, M, "Treatment of the textile wastewater by combined electrocoagulation" Chemosphere. Volumen 62, pp. 181-187, 2006.
13. Chen, G. "Electrocoagulation and Electroflotation of Restaurant Wastewater". Journal of environmental engineering, Volumen 126, pp. 858-863, 2000.
14. Chen, Gouhua, "Electrochemical Technologies in wastewater treatment", Separation and Purification Technology. Vol. 38, pp. 11-41, 2004.
15. Cocke, David L, Mollah, Mohammad Y.A., Morkovsky, Paul, Gomes, Jewel A.G, Kesmez, Mehmet, Parga ,Jose. "Fundamentals, Present and Future Perspectives of Electrocoagulation", Journal of Hazardous Materials, Vol. 114, pp. 199-210, 2005.

16. Crites R. y Tchobanoglous G. Tratamiento de aguas residuales en pequeñas poblaciones. Edit. Mc Graw Hill. Colombia, 2000. ISBN: 9584100424.
17. Daneshvar, N. H, Sorkhabi, Ashassi, Kasiri, M.B.” Decolourization of Dye Solution Containing Acid Red 14 by Electrocoagulation with a Comparative Investigation of Different Electrode Connections”. Journal of Hazardous Materials. Vol 112, pp. 55-62, 2004.
18. Daneshvar, N, Khataee, A.R, Amani Ghadim, A.R, Rasoulifard, M.H, “Decolorization of C.I. Acid Yellow 23 solution by electrocoagulation process: Investigation of operational parameters and evaluation of specific electrical energy consumption (SEEC)”, Journal of Hazardous Materials. Vol 148, pp. 566-572, 2007.
19. Den, Walter, Huang, Chihpin, “Electrocoagulation for removal of silica nanoparticles from chemical–mechanical-planarization wastewater”, Colloids and surfaces, Vol. 254, pp. 81-89, 2004.
20. Elmore, F.E., “A process for separating certain constituents of subdivided ores and like substances, and apparatus therefore”, Br. Patent 13,578, 1905.
21. Escobar, Claudio, Soto-Salazar, Cesar, Toral, M. Ines, “Optimization of the electrocoagulation process for the removal of copper, lead and cadmium in natural waters and simulated wastewater”, Journal of Environmental Management, Vol. 81, pp. 384-391, 2006.
22. Farré, María José, Doménech, Xavier, Peral, José, “Combined photo-Fenton and biological treatment for Diuron and Linuron removal from water

- containing humic acid”, *Journal of Hazardous Materials*, Vol. 147, Pp 167-174, 2007.
23. Gao, Ping, Chen, Xueming, Shen, Feng, Chen, Guohua, “Removal of chromomim (VI) from wastewater by combined electrocoagulation–electroflotation without a filter”, *Separation and Purification Technology*, Vol. 43, pp. 117-123, 2004.
24. Ge, Jiantuan, Qu, Jiuhui, Lei, Pengju, Liu, Huijuan, “New bipolar electrocoagulation–electroflotation process for the treatment of laundry wastewater”, *Separation and Purification Technology*, Vol. 36. pp. 33-39, 2003.
25. Ghernaout, D., Badis, A., Kellil, A., Ghernaut, “Application of electrocoagulation in *Escherichia coli* culture and two surface waters”, *Desalination*, Vol. 219, pp. 118-125, 2007.
26. GilPavas, Edison, Oviedo A., Catalina y Restrepo T., Paula A., “Tratamiento de aguas residuales de un floricultivo por electrocoagulación”. En: En el XVIII congreso iberoamericano de electroquímica, Rionegro, Antioquia, 2008. ISBN 958-714-126-9.
27. GilPavas, Edison, White L., Carolina y Sierra, Luz María, “Electrocoagulación como alternativa para la recuperación de cromo y degradación de materia orgánica de aguas residuales de la industria de curtimbres”. En el XVIII congreso iberoamericano de electroquímica, Rionegro, Antioquia, 2008. ISBN 958-714-126-9.
28. GilPavas, Edison, BETANCOURT L., Alejandra y Angulo, Mónica, “Optimización de los parámetros de operación en un proceso de tratamiento

- de aguas por electro-oxidación”, Medellín, 2008. Ingeniero de Procesos. Universidad EAFIT. Facultad de Ingeniería. Departamento de Ingeniería de Procesos.
29. Goodridge, F; Scott, K. Electrochemical Process Engineering: A guide to the design of electrolytic plant, 1995, Editorial Plenum press, New York. ISBN: 0-306-44794-0.
30. Gomes, Jewel A.G, Daida, Praveen, Kesmez, Mehmet, Weir, Michael, Moreno, Hector, “Arsenic removal by electrocoagulation using combined Al–Fe electrode system and characterization of products”, Journal of Hazardous Materials, Vol. 139. pp. 220-231, 2006.
31. Green, D; Perry, R. Perry’s Chemical Engineers Handbook. Séptima edición, 1997. Editorial McGraw-Hill, New York. ISBN: 0070498415
32. Hamada, Toyozo, Miyazaki, Yasumitsu, “Reuse of carwash water with a cellulose acetate ultrafiltration membrane aided by flocculation and activated carbon treatments”, Desalination, Vol. 169, pp. 257-267, 2004.
33. Hansen, Henrik K., Nuñez, Patricio, Raboy, Deborah, Schippacasse, italo, Grandon, Rodrigo, “Electrocoagulation in wastewater containing arsenic: Comparing different process designs”, Electrochimica Acta, Vol. 52, pp. 3467-3470, 2006.
34. Heidmann, Ilona, Calmano, Wolfgang, “Removal of Zn(II), Cu(II), Ni(II), Ag(I) and Cr(VI) present in aqueous solutions by aluminium electrocoagulation”, Journal of Hazardous Materials, Vol 152, pp. 934-941, 2008.

35. Heidmann, Ilona, Calmano, Wolfgang, "Removal of Cr(VI) from model wastewaters by electrocoagulation with Fe electrodes", Separation and Purification Technology, Vol 61, pp. 15-21, 2008.
36. Hurley and Másterton. Chemistry Principles and Reaction. Ed. Saunders Golden Sunburst Series, 3ª Edición, pp 498-525, 1997. ISBN 97804951267
37. Irdemez, Sahset, Şevki Yildiz, Yalcin, Tosunoğlu, Vahdettin, "Optimization of phosphate removal from wastewater by electrocoagulation with aluminum plate electrodes", Separation and Purification Technology, Vol 52, pp. 394-401, 2006.
38. Koby, Mehmet, Bayramoglu, Taner Can, Orhan, Sozbir, Mustafa, "Operating Costs analysis of electrocoagulation of Textile dye Wastewater". Separation Purification Technology Vol. 37, pp. 117-125, 2004
39. Koyba, Mehmet, Taner Can, Orhan, Bayramoglu, Mahmut, "Treatment of textile wastewaters by electrocoagulation using iron and aluminum electrodes", Journal of Hazardous Materials, Vol. 100, pp. 163-178, 2003.
40. Levenspiel, Octave. Chemical Reaction Engineering. Tercera Edición. New York : John Wiley & Sons. pp. 41-48, 1999. ISBN 047125424X
41. Maceda, Antonio, "Reducción del impacto ambiental de los detergentes", Ingeniería Química, Vol. 31, pp. 282-286, 1999.
42. McMurry, Jhon E. "Fundamentals of organic chemistry", Ed. Jhon Wiley and sons Inc., Quinta Edición, pp. 1082-1084, 2006. ISBN 9681850076

43. Mejia, Claudia, Osorio, Víctor, “Decoloración de aguas residuales con alto contenido de índigo por el método de electrocoagulación”. Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia, Vol. 29, pp. 115-118, 2003.
44. Colombia. Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. Decreto 1594 de 1984, Junio 26, por Uso del Agua y Residuos Líquidos. Bogotá: El Ministerio; 1984.
45. Mollah M. Yousuf; Morkovsky P; Gomes J.A; Kesmez M; Parga J; Cocke D.L. “Fundamentals, present and future perspectives of electrocoagulation”. Journal of Hazardous Materials. Vol. 114, pp. 199-210, 2004.
46. Mollah M. Yousuf; R. Schennach; J.R. Parga; Cocke D.L. “Electrocoagulation (EC) — science and applications”. Journal of Hazardous Materials. Vol 84, pp 29-41, 2001.
47. Montgomery, D, “Design and analysis of experiments”. Fifth Edition, Wiley and sons, 2005. ISBN 0471316490.
48. Moreno-Casillas H.A; Cocke D.L; Gomes; Morkovsky P; Parga J.R; Peterson E. “ Electrocoagulation mechanism for COD removal”. Separation purification technology. Vol 56. pp. 204-211, 2007.
49. Moreno, Gonzalo, “Electrocoagulación de Aguas Residuales”, Revista colombiana de Física, Vol. 34, No 2., Universidad Nacional de Colombia sede Manizales, 2002.
50. Murugananthan M; G.B Raju; S. Prabhakar.”Separation of pollutants from tannery effluents by electro flotation”. Separation and Purification Technology. Vol 40, pp. 69-75, 2004.

51. Neelavannan, M.G, revathi, M, Ahmed Basha, C., "Photocatalytic and electrochemical combined treatment of textile wash water", Journal of Hazardous Materials. Vol. 149, pp. 371-378, 2007.
52. Önder, Ebru, Savas Koparal, Ali, Bakir Ögütveren, Ülker, "An alternative method for the removal of surfactants from water: Electrochemical coagulation", Separation and Purification Technology. Vol. 52, pp. 527-532, 2006.
53. Rajeshwar, Krishnan e IBANEZ, Jorge. "Environmental Electrochemistry: Fundamentals and Applications in Pollution Abatement". San Diego: Academic Press, 1997. ISBN 0125762607
54. Roa-Morales, Gabriela, Campos-Medina, Eduardo, Aguilera-Cotero, Juan, Bilyeu, Bryan, Barrera-Díaz, Carlos, "Aluminum electrocoagulation with peroxide applied to wastewater from pasta and cookie processing", Separation and Purification Technology, Vol.54, pp. 124-129, 2007.
55. Ruiz, Álvaro A., Garcés G., Luís Fernando. Fotocatálisis y electrocoagulación para el tratamiento de aguas residuales: investigaciones y aplicaciones, Ed. Artes y Letras Ltda, 1ª edición. pp. 165-174. 2007. ISBN 9789589800935
56. Sengil, I. Ayhan, özacar, Mahmut, "Treatment of dairy wastewaters by electrocoagulation using mild steel electrodes", Journal of Hazardous Materials. Vol. 137, pp. 1197-1205, 2006.
57. Serway, Raymond A. "Electricidad y Magnetismo" Ed. Cengage Learning, 3a Edición, pp 141-150, 2005. ISBN 9706865381

58. Song, Shuang, Yao, J., He, Z, Qiu, J, Chen, J, "Effect of operational parameters on the decolorization of C.I. Reactive Blue 19 in aqueous solution by ozone-enhanced electrocoagulation" , Journal of Hazardous Materials, Vol 152, pp. 204-210, 2008.
59. STATGRAPHICS PLUS FOR WINDOWS 5.1 [CD-ROM]. [United States]: Statistical Graphics Corp, 1999-2004. ID number 465004111.
60. Stoker, H. Stephen, "Introduction to chemical principles", Ed Prentice Hall. 8a Edición, pp. 603-607, 2007. ISBN 0139159924
61. Turton, R. and Bailie, R. C. Analysis, Synthesis and Design of Chemical Processes. Second Edition. Prentice Hall. pp. 41-127, 2003. ISBN 0130647926
62. Ün, Ü. Tezcan, Ugur, S., Kopalal, A.S., " Oğ utveren, " U. Bakır, "Electrocoagulation of olive mill wastewaters", Separation and Purification Technology, Vol. 52, pp. 136-141, 2006.
63. Usos del agua y residuos líquidos, Ministerio de Agricultura, Decreto 1594 de 26 de Junio de 1984, Republica Nacional de Colombia, 1984.
64. Yang, Chen-Lu, "Electrochemical coagulation for oily water demulsification", Separation and Purification Technology, Vol. 54, pp. 388-395, 2006.
65. Yavuz, Yusuf, "EC and EF processes for the treatment of alcohol distillery wastewater", Separation and Purification Technology, Vol. 53, pp. 135-140, 2007.

66. Yilmaz, A. Erdem, Boncukcuoğlu, Recep, Kocakerim, M. Muhtar, Kocadağistan, Erdem, “An empirical model for kinetics of boron removal from boron-containing wastewater by electrocoagulation method in a batch reactor” , Desalination, Vol. 230, pp. 288-297, 2008.

67. Zumdahl, Steven S. y Zumdahl, Susan A, “Chemistry” Ed. Houghton Mifflin Company, New York, 5a Edición, pp. 837-879, 2000. ISBN 0395985897

ANEXOS

ANEXO I. Diagrama del proceso

