

**EVALUACIÓN DEL SISTEMA DE ELECTROCOAGULACIÓN PARA
DISMINUIR LA CARGA CONTAMINANTE A ESCALA DE LABORATORIO**

**JOHAN SEBASTIAN HERNANDEZ FLOREZ
STEPHANY MEJIA ROA**

**FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA
FACULTAD DE INGENIERIAS
PROGRAMA DE INGENIERÍA QUÍMICA
BOGOTÁ D.C
2019**

**EVALUACIÓN DEL SISTEMA DE ELECTROCOAGULACIÓN PARA DISMINUIR
LA CARGA CONTAMINANTE A ESCALA DE LABORATORIO**

**JOHAN SEBASTIAN HERNANDEZ FLOREZ
STEPHANY MEJIA ROA**

Proyecto integral de grado para optar por el título de INGENIERO QUÍMICO

Director

**Myriam Gutiérrez Ruiz
Ingeniera Industrial**

**FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA
FACULTAD DE INGENIERIAS
PROGRAMA DE INGENIERÍA QUÍMICA
BOGOTA D.C.
2019**

Nota de aceptación

Presidente del jurado

Jurado 1

Jurado 2

Bogotá, D.C., Febrero de 2019

DIRECTIVAS DE LA UNIVERSIDAD

Presidente de la Universidad y Rector del Claustro

Dr. Jaime Posada Díaz

Vicerrector de Desarrollo y Recursos Humanos

Dr. Luis Jaime Posada García-Peña

Vicerrectoría Académica y de Posgrados

Dr. Ana Josefa Herrera Vargas

Decano Facultad de Ingenierías

Ing. Julio Cesar Fuentes Arismendi

Director Programa de Ingeniería Química

Ing. Leonardo de Jesús Herrera Gutiérrez

Las directivas de la universidad de américa, los jurados calificadores y el cuerpo docente no son responsables por los criterios e ideas expuestas en el presente documento. Estos corresponden únicamente a los autores.

AGRADECIMIENTOS

Al finalizar este periodo académico y después de recordar todas las experiencias vividas en este tiempo, le agradezco a Dios por cada enseñanza académica y personal que me puso, por las personas que conocí y por no desampararme en ningún momento.

Mil gracias a mis padres que con su esfuerzo hicieron posible que pueda ser profesional, a mi hermana que me guio desde antes de salir del colegio y que aun el día de hoy lo sigue haciendo.

A Johanna Murcia y verónica Barreto que con su amistad me alegraron cada día de clases, que me acompañaron a través de este tiempo, me dedicaron horas de estudio para enseñarme y aclararme dudas, de corazón pido que Dios las acompañe siempre, que ponga en sus vidas los tesoros más grandes para que crezcan espiritual y materialmente, es incierto decir si seguiremos juntos o si por el contrario nuestros caminos se separaran. Lo único de lo que estoy seguro es que dejaron en mí, recuerdos que agradeceré cada vez que mire a atrás.

A Stephany Mejía, mi compañera de grado y mejor amiga, cada semestre estuvimos en materias juntos sin planearlo, en ti encontré una persona en quien confiar y expresar lo que tenía en mente y corazón en todo momento. Gracias por motivarme y apoyarme en todo momento, pido a dios que te guie segundo tras segundo a ti y tu familia, que no te deje estar sola y que cada vez que tengas una dificultad o un motivo de tristeza, te abrigue con su manto y puedas encontrar en el la cura para tus problemas.

A la persona que este leyendo esto, que sepa que ni un título, ni un buen sueldo le va a dar la felicidad que da encontrar las personas correctas en el momento correcto, al final del viaje que es la vida, solo van a quedar los recuerdos que tenga al lado de las personas que lo acompañaron.

Sebastián Hernández

Inicialmente agradezco a Dios por darme la oportunidad de culminar esta etapa de mi vida, a la empresa Procesadora de materias primas que nos abrió sus puertas para realizar este trabajo de grado.

A todos mis compañeros y amigos que estuvieron a lo largo de este camino brindándome su apoyo y ayuda en todo momento. A Sebastián Hernández por ser un amigo incondicional en todo momento, por ser una excelente persona y por la oportunidad de compartir momentos increíbles.

Stephany Mejía

DEDICATORIAS

Quiero dedicar este trabajo de grado a mi madre Susana Roa como muestra de agradecimiento por todo su amor, apoyo y esfuerzo que ha hecho día a día para hacer de mí la persona que soy.

A mi novio David Felipe Beltrán que me acompañó durante toda esta etapa de mi vida, me apoyó en los momentos difíciles, por todo tu amor y comprensión.

Stephany Mejía

CONTENIDO

	pág
INTRODUCCIÓN	19
OBJETIVOS	20
1. MARCO REFERENCIAL	21
1.1 MARCO TEÓRICO	21
1.1.1 Materia orgánica	21
1.1.2 Procesos de oxidación avanzada (POA)	21
1.1.3 Electrocoagulación	22
1.1.4 Factores que afectan el método de electrocoagulación	29
1.1.5 Ventajas y desventajas de la electrocoagulación	25
1.1.6 Diseño de reactores	26
1.1.7 Tipos de reactores	32
1.1.8 Reactor tipo batch	29
1.1.9 Reactor tipo filtro prensa	32
1.1.10 Reactor de electrodo cilíndrico rotativo	33
1.1.11 Reactor de lecho fluidizado	34
1.1.12 Electroodos	35
1.1.13 Reacciones	35
1.1.14 Demanda química de oxígeno (DQO)	37
1.1.15 Demanda bioquímica de oxígeno (DBO)	37
1.1.16 Efluente	38
1.1.17 Trampa de grasa	39
1.2 MARCO CONCEPTUAL	39
1.2.1 Ácidos grasos	39
1.2.2 Biomesa sólido	40
1.2.3 Biomesa suave	40
1.2.4 Biomesa multipropósito	40
1.2.5 Estearina de palma RBD	40
1.2.6 Maquila	40
1.2.7 Oleína de palma RBD	40
1.3 MARCO LEGAL	41
1.3.1 Ley 1333 de 2009	41
1.3.2 Resolución 631 de 2015	41
2. DIAGNOSTICO	43
2.1 GENERALIDADES	43
2.1.1 Historia	43
2.1.2 Materias primas	43
2.1.3 Proceso de producción	45
2.1.4 Balance del ciclo de agua en el proceso	49
2.1.5 Productos	51
2.2 PROBLEMÁTICA DE LA DISPOSICIÓN DE VERTIMIENTOS NO TRATADOS	52

2.3 CARACTERIZACIÓN DEL AGUA	53
3. SELECCIÓN DE LAS VARIABLES PARA EL MÉTODO DE ELECTROCOAGULACIÓN	55
3.1 pH	58
3.2 TEMPERATURA	59
3.3 DENSIDAD DE CORRIENTE	59
3.4 TIEMPO	61
3.5 MATERIAL DEL ELECTRODO	61
4. DESARROLLO DEL SISTEMA EXPERIMENTAL	63
4.1 CONSTRUCCIÓN DE LA CELDA DE ELECTROCOAGULACIÓN	65
4.1.1 Material de la celda	65
4.1.2 Dimensiones de la celda	65
4.1.3 Material de los electrodos	66
4.1.4 Dimensiones de los electrodos	66
4.1.5 Fuente de poder	67
4.2 CONSTRUCCIÓN DEL SISTEMA DE ELECTROCOAGULACIÓN	68
4.3 PRUEBA PRELIMINAR	69
4.4 EXPERIMENTACIÓN 1	71
4.4.1 Resultados	73
4.4.2 Análisis de resultados experimentación 1	74
4.5 EXPERIMENTACIÓN 2	86
4.5.1 Resultados	88
4.5.2 Análisis de resultados experimentación 2.	88
4.6 ANÁLISIS COSTO ENERGETICO	94
5. ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DEL PROCESO DE ELECTROCOAGULACIÓN	96
5.1 DISEÑO DEL REACTOR	97
5.1.1 Dimensiones de los reactores	100
5.1.2 Dimensiones de los electrodos	103
5.2 MATERIAL DEL REACTOR	105
5.3 MATERIAL DE LOS ELECTRODOS	105
5.4 NÚMERO DE ELECTRODOS	106
5.5 BOMBAS	106
6. EVALUACIÓN FINANCIERA DE LA IMPLEMENTACIÓN DE LA PROPUESTA	109
6.1 INVERSIÓN	109
6.1.1 Costos directos	109
6.2 EGRESOS	110
6.2.1 Depreciación de los reactores	110
6.2.2 Depreciación fuente de poder	111
6.2.3 Depreciación bombas desplazamiento positivo	111
6.2.4 Costos de mantenimiento (mano de obra)	111
6.2.5 Energía	111

6.3 MULTAS	112
6.4 RELACIÓN BENEFICIO – COSTO (B/C)	113
7. CONCLUSIONES	114
8. RECOMENDACIONES	115
BIBLIOGRAFÍA	116
ANEXOS	119

LISTA DE TABLAS

	pág
Tabla 1 Clasificación de los POA	22
Tabla 2 Tipos efluentes	38
Tabla 3 Valores permitidos por la norma para la elaboración de aceites y grasas	42
Tabla 4 Materias primas utilizadas en PMP	43
Tabla 5 Caracterización de los vertimiento y comparación con respecto valores según la resolución 631 de 2015	53
Tabla 6 Investigaciones del método de electrocoagulación para tratamiento de agua	55
Tabla 7 Investigaciones del método de electrocoagulación con pH 6 a 8	58
Tabla 8 Características principales de las variables utilizadas para el método de electrocoagulación	60
Tabla 9 Características del hierro y aluminio	62
Tabla 10 Porcentaje de superación de los parámetros de PMP respecto a la industria	69
Tabla 11 Factores y niveles experimentación 1	72
Tabla 12 Configuración de ensayos experimentación 1	73
Tabla 13 Resultados experimentación con electrodos de hierro	73
Tabla 14 Resultados experimentación con electrodos de aluminio	74
Tabla 15 Análisis de varianza (ANOVA) experimentación 1	75
Tabla 16 Caracterización del agua tratada utilizando electrodos de hierro	82
Tabla 17 Caracterización del agua utilizando electrodos de aluminio	84
Tabla 18 Factores y niveles experimentación 2	87
Tabla 19 Configuración de ensayos experimentación	88
Tabla 20 Resultados experimentación con electrodos de hierro	88
Tabla 21 Análisis de varianza (ANOVA) experimentación 2	89
Tabla 22 Caracterización del agua utilizando electrodos de hierro con un voltaje de 12,6 V	91
Tabla 23 Dimensiones de los reactores de electrocoagulación	102
Tabla 24 Dimensiones de los electrodos	104
Tabla 25 Nombre de los equipos utilizados en el diagrama de flujo	107
Tabla 26 Costos directos	109
Tabla 27 Costos indirectos	110
Tabla 28 Costos de mantenimiento	111

LISTA DE FIGURAS

	pág
Figura 1 Sistema de electrocoagulación con electrodos de aluminio	23
Figura 2 Sistema de electrocoagulación con electrodos de hierro y aluminio	24
Figura 3 Reactores utilizados para electrocoagulación	27
Figura 4 Reactor tipo batch	29
Figura 5 Reactor batch con electrodos monopolares conectados en serie	30
Figura 6 Reactor con electrodos monopolares conectados en paralelo	31
Figura 7 Reactor con electrodos bipolar en paralelo	31
Figura 8 Reactor tipo filtro prensa	32
Figura 9 Reactor de electrodo cilíndrico rotativo	33
Figura 10 Reactor de lecho fluidizado	34
Figura 11 Trampa de grasa	39
Figura 12 Diagrama de flujo proceso de producción	45
Figura 13 Diagrama de bloques del proceso productivo basado en la transformación físico química de una carga de aceite (12 toneladas)	46
Figura 14 Filtro prensa usado en la planta de refinación	47
Figura 15 Tanque “ácidos grasos”	48
Figura 16 Trampas de grasa de la empresa PMP	49
Figura 17 Balance hídrico	50
Figura 18 Vertimientos PMP	54
Figura 19 Comparación de la eficiencia del electrodo de hierro y del electrodo de aluminio	62
Figura 20 Metodología del proyecto	64
Figura 21 Dimensiones de la celda para la experimentación	65
Figura 22 Dimensiones de longitud y ancho de los electrodos de hierro para el sistema experimental	66
Figura 23 Dimensiones de longitud y ancho de los electrodos de aluminio para el sistema experimental	67
Figura 24 Fuente de poder.	68
Figura 25 Arreglo monopolar en paralelo	68
Figura 26 Montaje experimental para el proceso de electrocoagulación	69
Figura 27 Proceso de electrocoagulación a 15 min	70
Figura 28 Proceso de electrocoagulación a 1 hora	71
Figura 29 Agua tratada por EC durante 1, 2, 3 y 4 horas	74
Figura 30 Plano de la empresa PMP	966
Figura 31 Reactor de electrocoagulación batch sin agitación	977
Figura 32 Sistema de flujo continuo de electrocoagulación.	988
Figura 33 Reactores arreglo en paralelo	1000
Figura 34 Dimensiones de los reactores	1022
Figura 35 Electrodos de hierro	1055
Figura 36 Diagrama de flujo del proceso (PFD)	1088
Figura 37 Flujo de caja	1122

LISTA DE GRAFICAS

	pág
Gráfica 1. Influencia en la generación de solidos suspendidos y sedimentables utilizando electrodos de hierro	78
Gráfica 2. Influencia en la generación de solidos suspendidos y sedimentables utilizando electrodos de aluminio	80
Gráfica 3. Influencia en la generación de solidos suspendidos y sedimentables variando voltaje y tiempo	90

LISTAS DE ECUACIONES

	pág
Ecuación 1 Número de electrodos	66
Ecuación 2 Número total de tratamientos	72
Ecuación 3 Porcentaje de DQO removido	82
Ecuación 4 Porcentaje de DBO5 removido	83
Ecuación 5 Porcentaje de sólidos suspendidos totales	83
Ecuación 6 Porcentaje sólidos sedimentables totales removido	83
Ecuación 7 Porcentaje de grasas y aceites removido	83
Ecuación 8 Número de tratamientos	87
Ecuación 9 Costo energético	94
Ecuación 10 Energía consumida	94
Ecuación 11 Volumen total de agua a tratar	99
Ecuación 12 Volumen de los reactores	101
Ecuación 13 Relación longitud - ancho	101
Ecuación 14 Relación altura – ancho	101
Ecuación 15 Relación nivel del agua – ancho	103
Ecuación 16 Ancho de los electrodos	103
Ecuación 17 Relación espacio bajo el borde inferior – nivel del agua	103
Ecuación 18 Relación espacio sobre el borde – nivel del agua	104
Ecuación 19 Altura de los electrodos	104
Ecuación 20 Depreciación	110
Ecuación 21 Relación beneficio costo	113

LISTA DE ANEXOS

pág

Anexo A Caracterización del agua tratada por el método de electrocoagulación con electrodos de hierro	121
Anexo B Caracterización del agua tratada por el método de electrocoagulación con electrodos de aluminio	122
Anexo C Caracterización del agua tratada por el método de electrocoagulación con electrodos de hierro y un voltaje 12, 6 V	123

GLOSARIO

AGUAS RESIDUALES: son procedentes de usos industriales, domésticos y comerciales, son llamadas también negras o cloacales. Se caracterizan por su composición física, química y biológica, las aguas residuales contienen compuestos orgánicos e inorgánicos, por ejemplo productos químicos, detergentes, pesticidas y sedimentos formados por partículas del suelo.

ÁNODO: electrodo que cuando se conecta al polo positivo de una fuente de poder pierde electrones produciendo una reacción de oxidación y aumentando su estado de oxidación. La polaridad del ánodo positiva o negativa, depende del tipo de dispositivo para un dispositivo que consume energía el ánodo es positivo y para uno que proporciona energía el ánodo es negativo.¹

CARACTERIZACIÓN: determinación cuantitativa de los parámetros fisicoquímicos por ejemplo DQO, DBO, grasas y aceites, sólidos suspendidos totales, y biológicos de los vertimientos.

CÁTODO: electrodo que cuando se conecta al polo negativo de una fuente de poder recibe los electrones perdidos del ánodo generando que el material reduzca su estado de oxidación. La polaridad del cátodo, positiva o negativa, depende del tipo de dispositivo, en un dispositivo que consume energía como una celda electrolítica el cátodo es negativo, y en un dispositivo que proporciona energía, como una pila voltaica el cátodo es positivo.²

CONDUCTIVIDAD: medida de la capacidad de una solución acuosa para transmitir la corriente eléctrica. Cuando la conductividad del agua no es elevada, es frecuente la adición de un electrolito soporte para aumentar su valor, consiguiéndose así una disminución en el voltaje de la celda y, por tanto, un ahorro energético considerable.³

DEMANDA BIOQUÍMICA DE OXÍGENO: parámetro que permite determinar la cantidad de oxígeno que los microorganismos consumen en la degradación de la materia orgánica. La Demanda bioquímica de oxígeno es el parámetro más usado para medir la calidad de aguas residuales y superficiales, para determinar la cantidad de oxígeno requerido para estabilizar biológicamente la materia orgánica del agua para diseñar unidades de tratamiento biológico, para evaluar la eficiencia de los procesos de tratamiento y para fijar las cargas orgánicas permisibles en fuentes receptoras.⁴

¹ Wikiwand. [en línea] citado el 26 octubre de 2018. Disponible en: <http://www.wikiwand.com/es/%C3%81nodo>.

² Wikiwand. [en línea] citado el 26 octubre de 2018. Disponible en: <http://www.wikiwand.com/es/C%C3%A1todo>.

³ CAMBO CHILLO Nelson Álvaro. Diseño de un electrocoagulador para aguas industriales clarificadas de la empresa plusambiente base cantón joya de los sachas, provincia de Orellana. Trabajo de grado ingeniería química. Riobamba. escuela superior politécnica de Chimborazo. Facultad de ciencias.2017.15 p.

⁴ OÑA PAZMIÑO Byron Geovanny, FALCONÍ CEDILLO David Ruperto. tratamiento avanzado de aguas residuales del proceso de lavado y tinturado de jeans en la empresa "mundocolor" mediante electrocoagulación. Trabajo de grado ingeniería industrial. . Riobamba. escuela superior politécnica de Chimborazo. Facultad de mecánica .2013.17 p.

DEMANDA QUIMICA DE OXIGENO: parámetro que permite determinar la cantidad de oxígeno requerido para oxidar la materia orgánica por medio de un agente químico oxidante fuerte, por lo general bicromato de potasio, en un medio ácido y a alta temperatura. La demanda química de oxígeno es útil como parámetro de concentración orgánica en aguas residuales industriales o municipales tóxicas a la vida biológica y se puede realizar solo en tres horas⁵.

DENSIDAD DE CORRIENTE: es la medida que determina la intensidad de corriente por unidad de área. La densidad de corriente representa la cantidad de corriente eléctrica en un punto dentro de un conductor eléctrico, su representación es vectorial y tiene la dirección de la corriente.⁶

ELECTRODO: es el conductor eléctrico que permite hacer el contacto con la parte no metálica de un circuito. Los electrodos positivo y negativo se llaman ánodo y cátodo, respectivamente.

ELECTROCOAGULACIÓN: proceso no convencional de tratamiento de agua que consiste en la desestabilización de las sustancias contaminantes por medio de inducir corriente eléctrica en una celda que contiene el agua a tratar y los electrodos (ánodo y cátodo) permitiendo la reacción de oxidación.

SEBO: es la grasa sólida y dura que se extrae de los animales como ternera, buey, oveja, cordero y vaca. El sebo se utiliza como materia prima de los jabones, velas, lubricantes y comidas para aves. Los ácidos grasos de sebo se obtienen a partir de la hidrólisis de la grasa animal.

TRAMPA DE GRASA: es un dispositivo que permite retener los sólidos en suspensión y las grasas para de esta manera separarlos del agua que se produce después del proceso productivo, las trampas de grasas retienen por sedimentación los sólidos en suspensión y por flotación las grasas.

VERTIMIENTOS: es la descarga controlada de las aguas residuales de cualquier origen ya sea minero, industrial, aguas negras, agrícola al alcantarillado, a un canal, a un cuerpo de agua o al suelo. Los vertimientos se pueden clasificar según su origen, se encuentran vertimientos de aguas lluvias, vertimientos industriales y vertimientos de aguas domiciliarias.

⁵ OÑA PAZMIÑO Byron Geovanny, FALCONÍ CEDILLO David Ruperto. tratamiento avanzado de aguas residuales del proceso de lavado y tinturado de jeans en la empresa "mundocolor" mediante electrocoagulación. Trabajo de grado ingeniería industrial. . Riobamba. escuela superior politécnica de Chimborazo. Facultad de mecánica .2013.18 p.

⁶ Robles Mendoza Lindsay Karime, López Bueno Andrés Felipe. Diseño de un prototipo para el tratamiento de aguas residuales domésticas, basado en electrocoagulación. Trabajo de grado ingeniería civil. Bogotá D.C. Universidad de la Salle. Facultad de ingeniería.2017.60.p

RESUMEN

El objetivo principal de este trabajo de grado es evaluar el método de electrocoagulación para el tratamiento de aguas residuales de la empresa PMP, cuyos vertimientos se caracterizan por el contenido de alta carga orgánica. Para la realización de este objetivo se realizó el diagnóstico de los vertimientos, se encontró que estos vertimientos tenían un valor de grasas y aceites igual a 1264 mg/l, sólidos suspendidos igual a 17814 mg/l, sólidos sedimentables igual a 24007 mg/l, DQO igual a 85229 mg/l O₂, DBO5 igual a 12308 mg/l O₂. Al comparar estos resultados con los valores permitidos por la resolución 631 del 2015 se evidencio que todos los valores de los parámetros fisicoquímicos eran superiores a los valores exigidos por la resolución.

Posterior al diagnóstico se definieron las variables del método de electrocoagulación: pH, densidad de corriente, temperatura, material de los electrodos y tiempo de reacción, inmediatamente se eligió cuáles variables serían modificadas y cuales permanecerían fijas. Se realizó dos experimentaciones, para la primera experimentación fue necesario hacer una prueba preliminar donde se evaluó el método de electrocoagulación en un tiempo de 15 y 60 minutos con un voltaje de 2V, esto con el fin de identificar si para remover la carga contaminante de los vertimientos de PMP es suficiente este tiempo, el resultado de esta prueba preliminar no fue el esperado por esta razón se decide realizar la primera experimentación en un tiempo de 1, 2, 3, 4, 5 y 6 horas, con un voltaje de 2V y electrodos de hierro y aluminio, como resultado se obtuvo que el tiempo adecuado para la remoción de contaminantes de la empresa es 4 horas obteniendo una remoción mayor al 80% . Al comprar este resultado con los resultados encontrados en la bibliografía se identifica que el tiempo es demasiado alto para el método de electrocoagulación, por esta razón se realizó una segunda experimentación donde se evaluó el método utilizando electrodos de hierro, un voltaje de 2,7V, 7,7V y 12,6V y un tiempo de 5, 15 y 30 minutos, se obtuvo como resultado que para un voltaje de 12,6 V y un tiempo de 30 min se removió más del 90% para los parámetros DQO, sólidos suspendidos, sólidos sedimentables y grasas y aceites.

Para realizar las especificaciones técnicas del sistema de electrocoagulación se propuso emplear 6 reactores con una capacidad para tratar 0,36 m³, las dimensiones de cada reactor son: largo 0,56m, ancho 0,56m y alto 1,2m.

Finalmente se realizó la relación beneficio costo de la propuesta planteada, se obtuvo que esta relación es igual a 1 lo que indica que el proyecto es económicamente viable.

PALABRAS CLAVES

Carga orgánica, electrocoagulación, procesos de oxidación avanzada, tratamiento de aguas.

INTRODUCCION

La empresa procesadora de materias primas (PMP) se encuentra ubicada en el barrio rincón de Venecia, allí se elaboran margarinas, aceites y mezclas RBD, este proceso genera vertimientos con porcentajes de grasas y aceites, sólidos suspendidos, sólidos sedimentables, DQO y DBO, estos vertimientos no tienen ningún tratamiento lo que ocasiona la afectación al medio ambiente causando un efecto negativo en la fuente hídrica que se encuentra cerca, problemas de alcantarillado y malos olores⁷. Para controlar estos vertimientos y aportar positivamente al medio ambiente en Colombia está vigente la norma 3957 del 2009 y la resolución 631 del 2015, en esta norma y resolución establecen los valores máximos que estos vertimientos deben tener.

Para lograr cumplir la normatividad ambiental es necesario implementar tratamientos de agua que sean eficientes, económicos y adecuados para el tipo de vertimiento de las diferentes industrias. Actualmente se ha encontrado que la electrocoagulación es un tratamiento versátil que cuenta con varias características generando bajos costos de operación frente a otros tratamientos, mayor facilidad de disposición de sólidos y mayor facilidad de operación. El método de electrocoagulación es un tratamiento de aguas no convencional que tiene como principio la coagulación en el cual se desestabilizan los contaminantes por medio de la inducción de corriente eléctrica al sistema por medio de placas metálicas llamadas electrodos mayormente utilizados de hierro y aluminio, en el proceso de electrocoagulación intervienen tres etapas: inicialmente se forma el coagulante por oxidación electrolítica del metal del ánodo, luego se da la desestabilización de los contaminantes y emulsiones y, finalmente, se produce la formación de floculos por agregación de partículas del contaminante o adsorción de éstas en el coagulante.⁸ La electrocoagulación se ha aplicado para la remoción de diversas aguas residuales como industria de alimentos, metalúrgicas, refinerías e industria textil. En muchos casos se hace una combinación de esta técnica con flotación promovida también por electrólisis (electroflotación), cuya finalidad es aumentar la eficiencia de remoción del contaminante. Esto se realiza en un proceso en la misma celda, o en celdas consecutivas⁹.

En este trabajo de grado se realiza una evaluación a escala laboratorio del método de electrocoagulación para el tratamiento de aguas de la empresa PMP donde se evalúan el efecto de las variables como lo son tiempo de reacción y densidad de corriente sobre la reducción de contaminantes.

⁷ COLOMBIA CONGRESO DE LA REPUBLICA. Resolución 1541. (12, noviembre, 2013). Por la cual se establecen los niveles permisibles de calidad del aire o de inmisión, el procedimiento para la evaluación de actividades que generan olores ofensivos y se dictan otras disposiciones. Bogotá D.C.

⁸ RESTREPO MEJÍA Ana Patricia, ARANGO RUIZ Álvaro, GARCÉS GIRALDO Luis Fernando. La electrocoagulación: retos y oportunidades para el tratamiento de aguas. Electrocoagulación. Medellín, 2006. p. 66

⁹ RESTREPO MEJÍA Ana Patricia, ARANGO RUIZ Álvaro, GARCÉS GIRALDO Luis Fernando. La electrocoagulación: retos y oportunidades para el tratamiento de aguas. Electrocoagulación. Medellín, 2006. p. 63

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Evaluar el uso de la electrocoagulación para la disminución de la carga contaminante en las aguas residuales de la empresa PMP a escala de laboratorio.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

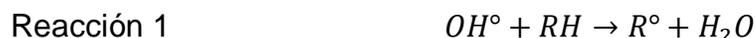
- Diagnosticar el estado actual de los vertimientos en la empresa PMP.
- Definir las variables principales del método propuesto.
- Evaluar el sistema de electrocoagulación para el tratamiento de aguas residuales.
- Establecer las especificaciones técnicas del proceso planteado.
- Analizar los costos de la implementación de la propuesta en la empresa PMP

1. MARCO REFERENCIAL

1.1 MARCO TEORICO

1.1.1 Materia orgánica. Son moléculas hechas a base de carbono y forman enlaces carbono – carbono y carbono – hidrogeno, también pueden contener azufre, nitrógeno, oxígeno, fósforo etc. Se caracterizan porque son complejas, grades y presenta diferentes propiedades fisicoquímicas. Estas moléculas son fabricadas por los seres vivos como los hidratos de carbono, grasas y proteínas. Cuando se excede la materia orgánico en el agua ya sea de origen industrial, doméstico o comercial se genera un efecto negativo este se debe al agotamiento del oxígeno disuelto esto se debe a las bacterias.

1.1.2 Procesos de oxidación avanzada (POA). Los POA son procesos químicos donde se usan oxidantes que implican la formación de radicales hidroxilo (OH^o) altamente reactivos ya que presentan un elevado potencial de oxidación (E_o = 2,8 V), característica que lo hace de gran efectividad para el proceso de oxidación de compuestos orgánicos principalmente por abstracción de hidrógeno; es decir, se generan radicales orgánicos libres (reacción 1), los cuales pueden reaccionar con oxígeno molecular para formar peroxiradicales¹⁰.



Estos procesos son tecnologías no convencionales que se caracterizan por su operación simple, por su alta eficiencia para degradar los compuestos orgánicos permitiendo disminuir los niveles de DQO y DBO y porque se utilizan procesos fisicoquímicos capaces de generar grandes cambios en la estructura de los diferentes contaminantes. Los POA se utilizan en para las aguas residuales que contienen materiales tóxicos, no- biodegradables. Estos procesos tienen como ventaja frente a los procesos físicos la no generación de residuos secundarios y como desventaja presenta un costo operacional más alto.

Los procesos de oxidación avanzada se pueden clasificar en procesos homogéneos con aporte de energía y procesos homogéneos sin aporte de energía mostrados en la siguiente tabla.

¹⁰ GARCÉS GIRALDO, Luis Fernando, MEJÍA FRANCO, Edwin Alejandro, Santamaría Arango Jorge Julián. La fotocatalisis como alternativa para el tratamiento de aguas residuales. tratamiento de aguas. Antioquia. 2004. p.84.

Tabla 1. Clasificación de los POA¹¹

Procesos homogéneos		
	Con aporte de energía	Sin aporte de energía
Energía procedente de radiación ultravioleta (UV)	Ozonización y radiación ultravioleta (O ₃ /UV).	Ozonización en medio alcalino (O ₃ /OH ^o).
	Peróxido de hidrogeno y radiación ultravioleta (H ₂ O ₂ /UV).	
	Foto-Fenton (Fe ²⁺ /H ₂ O ₂ /UV).	
	Ozono, peróxido de hidrogenación y radiación ultravioleta (O ₃ H ₂ O ₂ /UV).	Ozonización con peróxido de hidrogeno (O ₃ /H ₂ O ₂) y (O ₃ /H ₂ O ₂ / OH ^o).
Energía procedente de ultrasonidos (US)	Ozonización y ultrasonido (O ₃ /US). Peróxido de hidrogeno y ultrasonidos (H ₂ O ₂ /US).	Peróxido de hidrogeno y catalizador (H ₂ O ₂ / Fe ²⁺)
Electroquímica	Electrocoagulación Oxidación avanzada Electro-Fenton	

Fuente: Elaboración propia

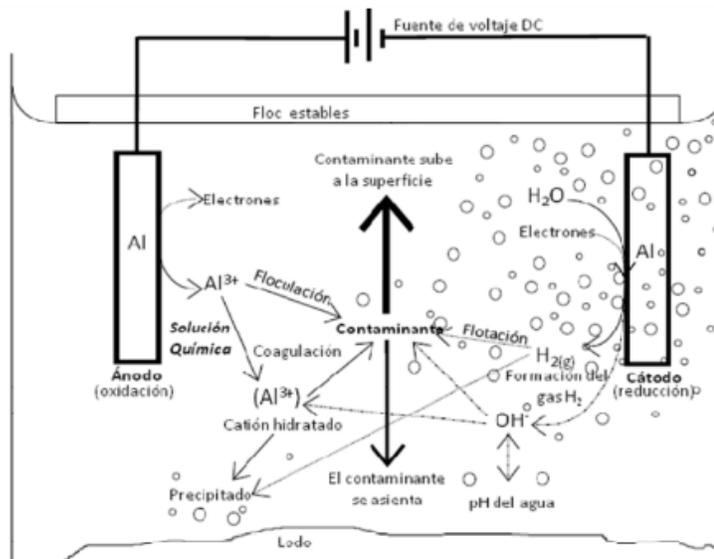
1.1.3 Electrocoagulación. La electrocoagulación es un método no convencional utilizado para el tratamiento de aguas donde se eliminan los contaminantes que se encuentran suspendidos, emulsificados o disueltos. Este método emplea el principio de la coagulación y floculación, este consiste en la desestabilización de las partículas suspendidas para formar aglomeraciones por medio de un coagulante agregado y de esta manera facilitar la suspensión o sedimentación de estas partículas coloidales, en la electrocoagulación no se utiliza el coagulante este se forma gracias a la disolución de los iones del electrodo que generalmente son de hierro o aluminio, la liberación de los iones metálicos se da en el ánodo y en el catodo se generan las burbujas que contienen hidrogeno , este hidrogeno permite que las partículas floten y sean removidas con mayor facilidad; La cantidad de estos electrodos y el material depende del contaminante a tratar, para

¹¹ OSORIO ROBLES, Francisco; TORRES ROJO, Juan Carlos y SÁNCHEZ BAS, Mercedes. Tratamientos de aguas para la eliminación de microorganismos y agentes contaminantes. Aplicación de procesos industriales a la reutilización de aguas residuales. España, 2010. p. 47

que se lleve a cabo las reacciones oxido-reducción que ocurre entre los electrodos y el medio acuoso se necesita una fuente de energía que proporciona la corriente eléctrica del proceso , esta reacción consiste en el desprendimiento de catión del ánodo o electrodo de sacrificio que reacciona con los iones hidroxilos formados en el cátodo para así desestabilizar los contaminantes en el agua.

Las reacciones más importantes que pueden sufrir las partículas de contaminantes son: hidrólisis, electrólisis, reacciones de ionización y formación de radicales libres. Estas reacciones cambian las propiedades del sistema agua-contaminantes, que conlleva a la eliminación de la carga contaminante del agua¹².

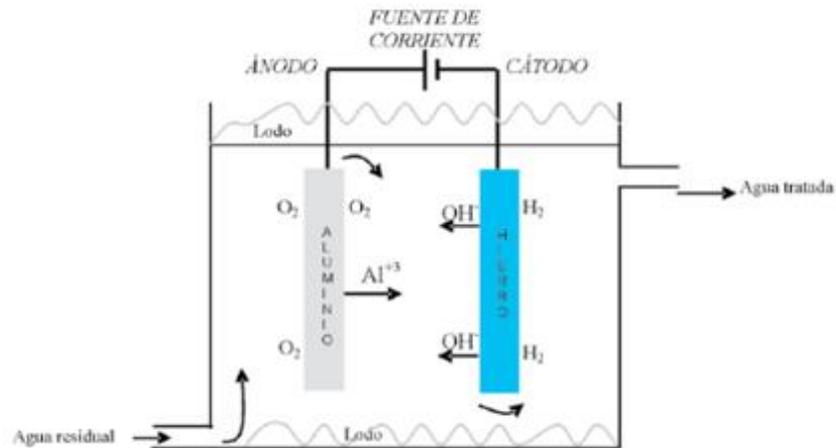
Figura 1. Sistema de electrocoagulación con electrodos de aluminio



Fuente: ARANGO GÓMEZ Sebastián, LÓPEZ GUTIÉRREZ Andrés. Tratamiento de aguas residuales del proceso de desengrase de autopartes con fines de reuso.2008. p. 21.

¹² CORDERO MEDINA, Egdymer Elena, MANRIQUE ACOSTA, Jesús Alfredo. 2009. Evaluación del efecto de la electrocoagulación en la disminución de la carga contaminante en aguas residuales. Universidad Rafael Urdaneta. Maracaibo.

Figura 2. Sistema de electrocoagulación con electrodos de hierro y aluminio



Fuente: RESTREPO MEJÍA Ana Patricia, ARANGO RUIZ Álvaro, GARCÉS GIRALDO Luis Fernando. La electrocoagulación: retos y oportunidades para el tratamiento de aguas. Electrocoagulación. Medellín, 2006. p. 62

1.1.4 Factores que afectan el método de electrocoagulación. Para llevar adecuadamente el proceso y obtener óptimos resultados, es necesario tener en cuenta las variables que se describen a continuación, estas variables afectan la eficiencia del proceso haciendo que un valor poco óptimo disminuya la remoción de contaminantes o caso contrario, un valor estudiado previamente para el tratamiento en curso aumente la eficiencia de remoción. Dichas variables pueden llegar a determinar las reacciones que ocurrirán en el sistema.

La primera variable a estudiar será la densidad de corriente, esta es la corriente en voltios por unidad de área que recibirá el electrodo, este factor afecta el método de electrocoagulación porque tiene una relación directamente proporcional con el consumo de energía y directamente proporcional a eficiencia de remoción. Si bien valores altos de densidad de corriente pueden llegar a indicar teóricamente mayor tasa de remoción de contaminante, también sugieren mayor consumo de energía, y a su vez, altas cargas energéticas pueden llegar a generar alteraciones térmicas en el medio acuoso, subiendo la temperatura del medio lo que lleva a la necesidad de hacer un estudio más profundo sobre el voltaje óptimo a utilizar para los vertimientos de la empresa PMP teniendo en cuenta factores de remoción, costos y practicidad.

El pH es el coeficiente que indica el grado de acidez o basicidad de una solución acuosa, esta variable genera diferentes efectos según el tipo de agua a tratar, o la reacción a la que se quiera llegar, cuando se quiere tratar agua alcalina el pH

tiende a disminuir gradualmente, en cambio cuando se tiene agua acida el pH tiende a incrementar, estos cambios afectan la eficiencia de la corriente del proceso, una amplia gama de especies coaguladas e hidróxidos metálicos se pueden formar a partir de los iones metálicos a determinados pH, estos compuestos formados conducen a la desestabilización, precipitación y eliminación de contaminantes disueltos tales como partículas orgánicas y metales pesados que puedan estar presentes en el agua.

Teniendo en cuenta que durante el proceso de electrocoagulación la temperatura tiende a aumentar por la generación de las reacciones de óxido-reducción y por efecto de la densidad de corriente sobre el vertimiento, lo ideal es operar a temperaturas alrededor de 60°C, a esta temperatura el proceso de liberaciones de iones metálicos e hidrogeno es el más alto. Temperaturas inferiores o superiores a esta ocasiona que se genere una capa de óxido sobre el electrodo, esta capa de óxido surge como el proceso de oxidación del electrodo frente al medio acuoso y la densidad de corriente, entre mayor sea el área que cubre dicha capa menor cantidad de floculos se obtendrán y por ende se obtendrá una disminución menor en el porcentaje de remoción. Esta temperatura es objeto de estudio para el método de electrocoagulación, varía entre cada tipo de metal a experimentar, la carga contaminante del vertimiento que se desea tratar y además incrementa los costos de tratamiento por la necesidad de calentar y mantener estable la temperatura del sistema.

La eficiencia de la remoción del sistema depende de la geometría del mismo y de la cantidad de electrodos que este posea, a menor distancia entre placas de electrodo, mayor será el área superficial de contacto entre el electrodo y el medio acuoso, generando una rápida formación de floc. Para esto, principalmente algunos autores usan electrodos de placas paralelas, mientras que otros electrodos concéntricos.

Es importante tener en cuenta la formación de una capa de óxido sobre el cátodo, y el deterioro del ánodo, lo cual lleva a pérdidas de la eficiencia del sistema de electrocoagulación, estas se pueden reducir con la adición de una o más placas paralelas que contengan electrodos de sacrificio, suministrando una corriente directa para mitigar estos efectos adversos sobre el electrodo también es válido el uso de una corriente alterna, puesto que se piensa que la activación cíclica retarda los mecanismo de ataque del electrodo que experimenta el sistema y de este modo asegurar una vida útil más larga del electrodo.

1.1.5 Ventajas y desventajas de la electrocoagulación. La electrocoagulación presenta varias ventajas y desventajas frente a otros métodos de tratamiento de agua.

Ventajas

- Generación de menor cantidad de lodos, favorece a la disposición de sólidos.
- Generación de lodos más compactos.
- Mayor facilidad de remover los contaminantes.
- Alta efectividad en la remoción de un amplio rango de contaminantes.¹³
- Los costos de operación son menores comparativamente con los de procesos convencionales usando polímeros.¹⁴
- Fácil operación. El uso de electrodos de sacrificio permite extender la vida útil de los electrodos tanto del ánodo como del cátodo en comparación con un sistema que no cuente con estos.

Desventajas

- A su vez el uso de electrodos de sacrificio implica la reposición constante de estos, por la capa de óxido que van a formar por la reacción que genera la densidad de corriente entre los ánodos y cátodos con el medio acuoso.
- Los lodos contienen altas concentraciones de hierro y aluminio, dependiendo del material del electrodo de sacrificio utilizado.¹⁵

1.1.6 Diseño de reactores. El diseño de reactores es un procedimiento que se implementa a la hora de construir un reactor, el objetivo de este es convertir los reactivos en productos de la forma más eficiente posible, cuando se va a llevar a cabo un determinado proceso que implica una reacción química debe determinarse el tipo y tamaño del reactor y las condiciones de operación más adecuadas para el fin propuesto.¹⁶

Para el diseño de reactores se encuentra que se puede clasificar inicialmente como reactor tipo batch y reactor de sistema continuo, posterior a la primera etapa de selección se puede escoger dos tipos de reactores coagulación y coagulación-flotación.

Son llamados reactores de sólo coagulación aquellos que no aprovechan la

¹³ ARANGO RUIZ Álvaro. La electrocoagulación: una alternativa para el tratamiento de aguas residuales. Revista La Sallista de Investigación. Enero-junio, 2005, vol. 2, no. 1. p. 64

¹⁴ RESTREPO MEJÍA Ana Patricia, ARANGO RUIZ Álvaro, GARCÉS GIRALDO Luis Fernando. La electrocoagulación: retos y oportunidades para el tratamiento de aguas. Electrocoagulación. Medellín, 2006. p. 64

¹⁵ Ibid., p. 7.

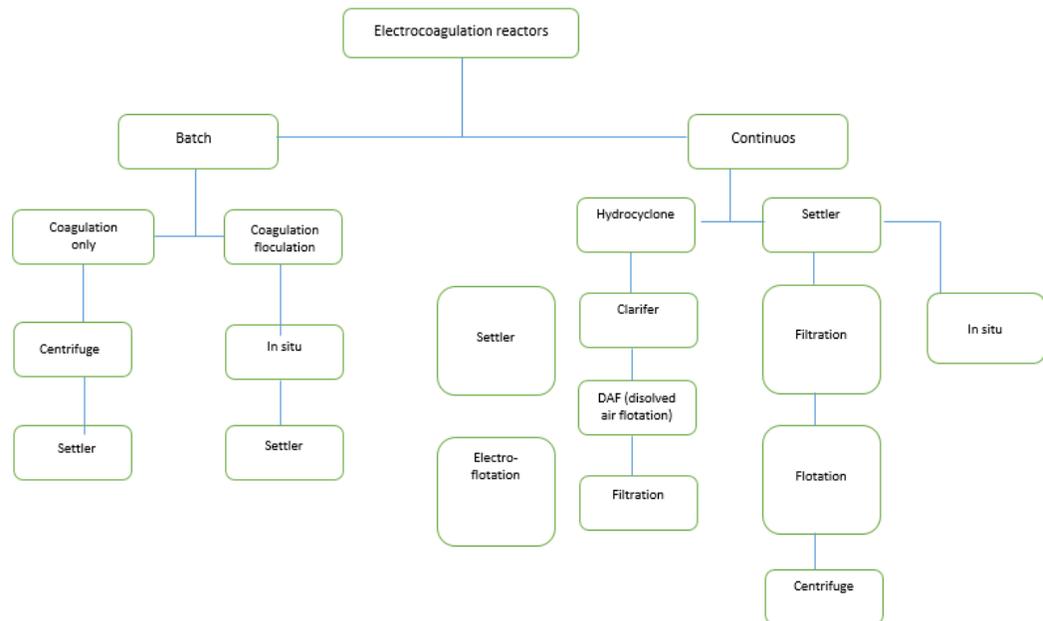
¹⁶ Introducción al diseño de reactores. [en línea] citado el 27 de octubre de 2018. Disponible en: <https://www.fing.edu.uy/iiq/maestrias/DisenioReactores/materiales/notas1.pdf>

electrocoagulación para generar burbujas que separen los agregados (floculos) del contaminante por flotación, mientras que los reactores en los que se aprovechan las burbujas generadas para realizar la flotación de los agregados del contaminante, reciben el nombre de reactores de coagulación y flotación¹⁷.

Para la selección del reactor para la electrocoagulación se debe tomar en cuenta 3 decisiones la primera y como se dijo anteriormente se escoge si el reactor será tipo batch o continuo, posterior a esta decisión se escoge el desempeño generado por las burbujas electrolíticamente y para finalizar se eligen los medios de separación, que puede ser centrifugación, filtración, clarificador.

En la siguiente figura se encuentra la clasificación del diseño de reactores para el proceso de electrocoagulación.

Figura 3. Reactores utilizados para electrocoagulación



Fuente: HOLT, Peter K, BARTON Geoffrey W. The future for electrocoagulation as a localized water treatment technology. EISevier. Chemosphere. 2005. vol. 59. p. 358.

1.1.7 Tipos de reactores. Los reactores son un equipo usado para que en su interior tenga lugar una reacción química, están diseñados para ofrecer la mejor conversión y la mejor selectividad para el tipo de reacción a usar y a la vez, reducir costes de operación, tiempo y energía. Para diseñar un reactor químico hacen falta conocimientos de termodinámica, cinética, transferencia de masa, mecánica

¹⁷ RUBIO HERREÑO David Ricardo, SIACHOQUE CABRERA Sandra Carolina. 2012. Evaluaciones de un sistema acoplado de electrocoagulación/fotocatálisis (EC/FC) para la remoción de carga orgánica contaminante en agua residual de la industria litográfica. Universidad de América. Bogotá D.C.

de fluidos y balance de masa. Por lo general se busca conocer el mejor tamaño y tipo de reactor, así como la forma de operar de este.

Existen varias formas de clasificar los reactores, los hay según el modo de operación, estos pueden ser continuos o por lotes, los reactores continuos son los que están trabajando sin parar, ofreciendo la salida de producto constante a través del tiempo. El reactor por lotes, trabaja a través de cargas, esto quiere decir que se introduce cierta cantidad de materia prima y después de un tiempo dado se saca el producto y se repite el proceso.

Según el tipo de flujo interno, en esta clasificación se busca tener dos tipos de reactores, ideales, los cuales no describen los efectos físicos complejos o perturbaciones que puedan llegar a afectar el sistema. Por el contrario, los reactores no ideales consideran los patrones de flujo que tengan cabida en el reactor, la posible existencia de zonas muertas en el reactor en las cuales la materia no fluya, para estos reactores suelen describirse obligatoriamente la cinética de los reactores junto con las características del fluido, si es micro o macro fluido y si su mezclado es tardío o inmediato.

La última clasificación que se les da es según las fases que albergan, si la materia a tratar es de una única fase (líquida o gas) o si tiene múltiples fases (gas-sólidos, gas-líquido, líquido-sólido, gas-líquido-sólido).

Dentro de los reactores más usados en la industria son:

Reactor batch, trabaja por lotes, es el más práctico, tiene como ventaja bajo costo de instrumentación, permite hacer paradas de emergencia y luego volver a operar sin dificultad, además de esto permite hacer cambios en producción, teniendo lotes de diferentes productos uno tras del otro. Por otro lado, su costo de operación es alto, ya que implica paradas entre lote y lote, requiere personal que este pendiente de su correcto funcionamiento, del cargue y descargue del mismo. Es muy usado para pequeñas producciones o plantas piloto, industrias donde elaboren varios productos.

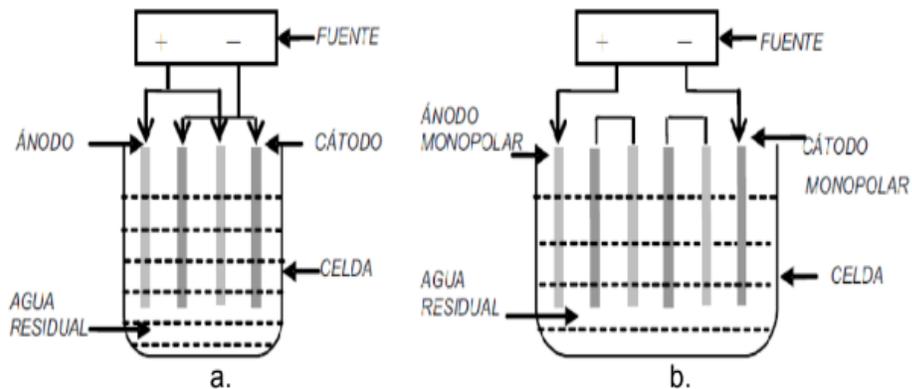
Reactor continuo de tanque agitado (CSTR), este tipo de reactor se caracteriza principalmente porque sus propiedades no cambian durante el tiempo, este reactor es de modelo ideal, supone que en cualquier punto del reactor las concentraciones son iguales a las de corriente de salida, la velocidad de reacción en cualquier punto del tanque es la misma. Para este tipo de reactor se asume que el mezclado es perfecto, se sabe que en la práctica no es así, pero sin embargo tiene tan alta eficiencia que llega a aproximarse a las condiciones ideales.

Reactores en flujo tapón o pistón (PFR), se caracteriza esencialmente en que las propiedades en un determinado punto del reactor son constantes en el tiempo. La conversión de la reacción que se lleve a cabo en estos reactores dependerá en función de un punto dado en el reactor a través de la dirección del flujo de la materia.

Reactor catalítico, suelen ser de lecho fluidizado o empacado, la elección del tipo de lecho depende de la reacción de interés y el mecanismo cinético de esta misma reacción. Los reactores de lecho fluidizado tienen flujo complejo lo que hace que solo se pueda estimar de manera aproximada a la realidad los mecanismos de transferencia de masa, presenta mejor control de temperatura, en caso de ser necesaria la reactivación del catalizador este puede ser bombeado y transportado por su condición fluidizada, es adecuado para partículas de tamaño pequeño, y para reacciones rápidas que necesiten áreas de contacto de gran tamaño. Los de lecho empacado, para reactivar el catalizador, necesitan de gases que se recirculen en el sistema a fin de aumentar la eficiencia de reactivación, tiene la desventaja de presentar zonas calientes y frías en el interior del catalizador además necesita de catalizadores de gran tamaño ya que de lo contrario se pueden formar tapones y/o caídas de presión. Para el proceso de electrocoagulación se pueden utilizar dos tipos de reactores, reactor tipo batch y reactores de sistema continuo, la elección del reactor depende de la cantidad de agua que se desea tratar y el tipo de contaminante que se desea remover.

1.1.8 Reactor tipo batch. Este reactor consiste en una celda que contiene 2 o varios electrodos estos se unen a una fuente de poder y son sumergidos al agua que se desea tratar, la característica principal de este reactor es que el caudal del agua a tratar debe ser constante es decir su operación es con un volumen determinado, otra de sus características sobresalientes es su bajo costo de operación y su facilidad de operación. Hay que tener en cuenta que en este tipo de reactor las condiciones del proceso varía a medida que transcurre el tiempo y que el área superficial de los electrodos debe ser grande ya que se presenta una relación directamente proporcional con el aumento de la disolución de los iones y de esta manera tener una mejor disolución del contaminante. La condición de operación de este reactor es la temperatura de 60°C.

.Figura 4. Reactor tipo batch



Fuente: ARANGO RUÍZ, Álvaro. La electrocoagulación: una alternativa para el tratamiento de aguas residuales. Revista La Sallista de Investigación. Enero-junio, 2005, vol. 2, no. 1. p. 51

Ventajas:

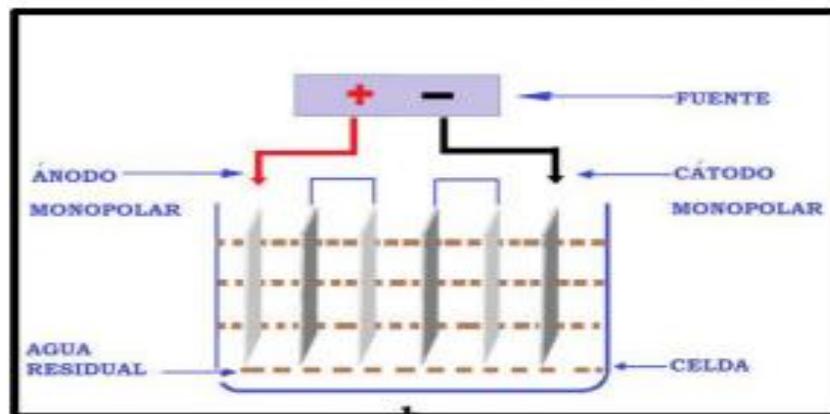
- Fácil operación
- Bajo costo frente a otros reactores
- Permite una alta conversión

Desventajas:

- Las condiciones del reactor batch cambian con el tiempo
- En el reactor batch se emplean volúmenes bajos

Por otro lado la variable de diseño de este reactor radica en la configuración de los electrodos. En los electrodos monopolares en serie se observa que cada par de electrodos de sacrificio; está conectado internamente uno con el otro, y no tiene interconexiones con los electrodos externo¹⁸. En disposición en serie de electrodos, se requiere una diferencia de potencial más alto y se requiere para una corriente dada porque las células conectadas en serie tienen una mayor resistencia.¹⁹ Los electrodos monopolares conectados en paralelo la corriente eléctrica se reparte entre todos los electrodos en relación a la resistencia de las células individuales.

Figura 5. Reactor batch con electrodos monopolares conectados en serie

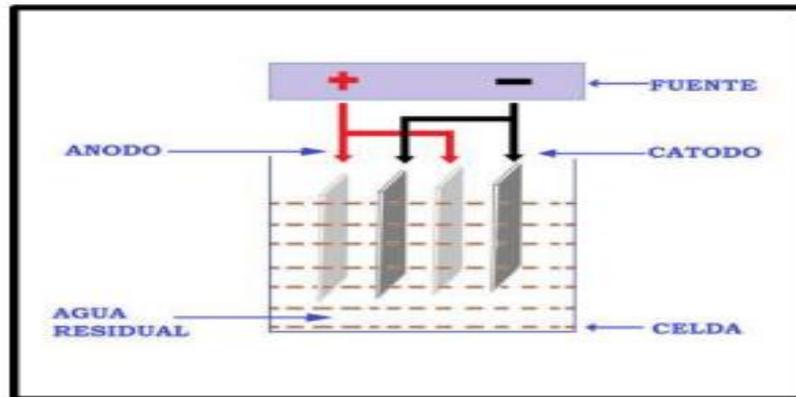


Fuente: MOLLAH M. Yousuf A, SCHENNACH Robert, PARGA José R. y COCKE David L. Electrocoagulation (EC) science and applications Journal of Hazardous Materials .2000. p. 33.

¹⁸ MOLLAH M. Yousuf A, SCHENNACH Robert, PARGA José R. y COCKE David L. Electrocoagulation (EC) science and applications Journal of Hazardous Materials .2000. p. 33

¹⁹ Ibid., p.33.

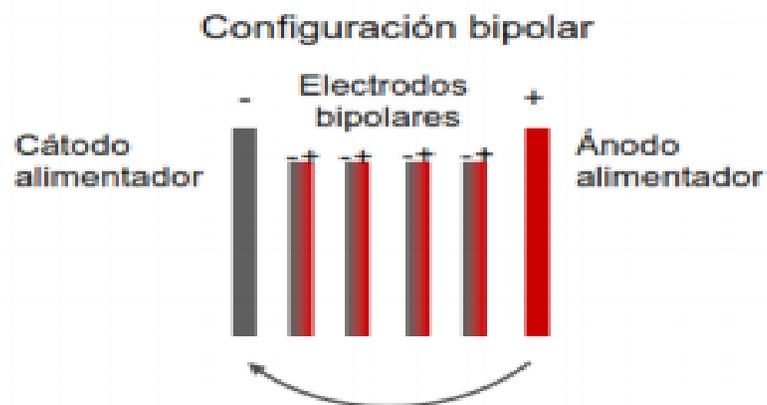
Figura 6. Reactor con electrodos monopolares conectados en paralelo



Fuente: MOLLAH M. Yousuf A, SCHENNACH Robert, PARGA José R. y COCKE David L. Electrocoagulation (EC) science and applications Journal of Hazardous Materials .2000. p. 32

Otra variable de diseño del reactor batch es el 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.²⁰ El reactor batch con arreglo bipolar en paralelo tiene como condición de operación menor intensidad y mayor voltaje.

Figura 7. Reactor con electrodos bipolar en paralelo



Fuente: Fuente: MOLLAH M. Yousuf A, SCHENNACH Robert, PARGA José R. y COCKE David L. Electrocoagulation (EC) science and applications Journal of Hazardous Materials .2000. p. 32

²⁰ MOLLAH M. Yousuf A, SCHENNACH Robert, PARGA José R. y COCKE David L. Electrocoagulation (EC) science and applications Journal of Hazardous Materials .2000. p. 32

Ventajas:

- Sencillez de su disposición, ya que sólo es necesaria la conexión de dos electrodos (electrodos alimentadores), y por tanto el espacio entre los electrodos puede ser más pequeño.²¹

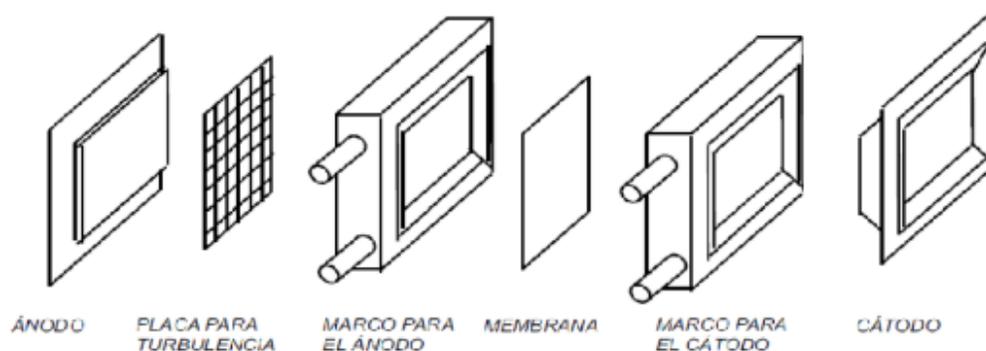
Desventajas

- El arreglo bipolar produce pérdidas de corriente.

1.1.9 Reactor tipo filtro prensa. Está formado por una unidad de cobertura en forma de caja con un ánodo, un cátodo y una membrana como se muestra en la figura 5. Este sistema hace que su operación y mantenimiento sea relativamente simple.²²

Este reactor constituido por un par de marcos. Uno de ellos soporta el ánodo y el otro el cátodo en forma de placas, de manera que su acople forma una cámara. El agua a ser tratada entra por la parte lateral a la cámara y es inducida a flujo turbulento para incrementar la eficiencia del proceso.²³ Las condiciones de operación del reactor filtro prensa son temperatura ambiente y altas presiones.

Figura 8. Reactor tipo filtro prensa



Fuente: ARANGO RUÍZ, Álvaro. La electrocoagulación: una alternativa para el tratamiento de aguas residuales. En: Revista La Sallista de Investigación. Enero-junio, 2005, vol. 2, no. 1. p. 52

Ventajas:

- Mantenimiento Sencillo

²¹ AGUILAR ASCON Edwar Alejandro. Evaluación de la eficiencia de una celda de electrocoagulación a escala laboratorio para el tratamiento de agua. Trabajo de grado el grado ciencias ambientales con mención en control de la contaminación y ordenamiento ambiental. Lima. Universidad Nacional Mayor De San Marcos. Facultad de ingeniería geológica, minera, metalúrgica y geográfica.2015.27.p

²² RESTREPO MEJÍA Ana Patricia, ARANGO RUIZ Álvaro, GARCÉS GIRALDO Luis Fernando. La electrocoagulación: retos y oportunidades para el tratamiento de aguas. Electrocoagulación. Medellín, 2006. p. 69

²³ CHEN, Guohua. Electrochemical technologies in wastewater treatment. In: Separation and Purification Technology. Vol. 38, No. 1.2004. p. 11–41

- Operación sencilla

Desventajas

- Costo de diseño y operación alto
- Funcionamiento discontinuo lo que puede ocasionar variaciones del caudal.

1.1.10 Reactor de electrodo cilíndrico rotativo. Se emplea para la remoción de metales. En este reactor el cátodo gira en el centro de la celda y el ánodo se encuentra fijo. Esta disposición permite aumentar la transferencia de masa en los electrodos y remover partículas de metal del cátodo²⁴. Las condiciones de operación del reactor de electrodo cilíndrico rotativo baja velocidad y temperatura ambiente.

Figura 9. Reactor de electrodo cilíndrico rotativo



Fuente: ARANGO RUÍZ, Álvaro. La electrocoagulación: una alternativa para el tratamiento de aguas residuales. Revista La Sallista de Investigación. Enero-junio, 2005, vol. 2, no. 1, p. 70

Ventajas

- Aumenta la transferencia de masa de los electrodos.²⁵
- Distribución de corriente y potencial uniforme.

Desventajas

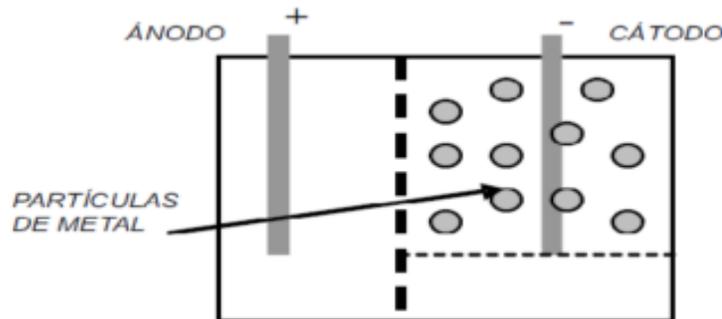
- Solo se emplea para remoción de metales.
- Este reactor se utiliza para cuando la concentración del contaminante es baja.

²⁴ ARANGO RUÍZ, Álvaro. La electrocoagulación: una alternativa para el tratamiento de aguas residuales. En: Revista La Sallista de Investigación. Enero-junio, 2005, vol. 2, no. 1. p. 52

²⁵ AGUILAR ASCON Edwar Alejandro. Evaluación de la eficiencia de una celda de electrocoagulación a escala laboratorio para el tratamiento de agua. Trabajo de grado el grado ciencias ambientales con mención en control de la contaminación y ordenamiento ambiental. Lima. Universidad Nacional Mayor De San Marcos. Facultad de ingeniería geológica, minera, metalúrgica y geográfica.2015.30.p

1.1.11 Reactor de lecho fluidizado. También empleado para la remoción de metales. Este permite aumentar el área específica superficial mejorando la eficiencia del proceso. Los materiales usados en el ánodo deben ser dimensionalmente estables por ejemplo como el acero que se utiliza en los reactores para la recuperación de metales. Los electrodos más modernos son fabricados de titanio con una pequeña capa de óxidos de metales nobles. Sin embargo, el material más comúnmente utilizado es el aluminio. El cátodo puede ser de metal, grafito, fibras de carbón, acero o titanio.²⁶ Para las variables de diseño de este reactor hay que tener en cuenta la velocidad mínima de fluidización y el coeficiente de arrastre. La condición de operación es una temperatura entre 25-30 C.

Figura 10. Reactor de lecho fluidizado



Fuente: ARANGO RUÍZ, Álvaro. La electrocoagulación: una alternativa para el tratamiento de aguas residuales. Revista Lasallista de Investigación. Enero-junio, 2005, vol. 2, no. 1, p. 70

Ventajas

- Aumenta el área específica superficial mejorando la eficiencia del proceso.
- En este reactor no existen gradientes de temperatura.
- La operación puede llegar a ser continua, semi - continua o tipo batch. Lo que hace que el reactor sea una alternativa versátil.²⁷

Desventajas

- Se utiliza solo para la remoción de metales.

²⁶ AGUILAR ASCON Edwar Alejandro. Evaluación de la eficiencia de una celda de electrocoagulación a escala laboratorio para el tratamiento de agua. Trabajo de grado el grado ciencias ambientales con mención en control de la contaminación y ordenamiento ambiental. Lima. Universidad Nacional Mayor De San Marcos. Facultad de ingeniería geológica, minera, metalúrgica y geográfica.2015.30.p

²⁷ Ibid.

1.1.12 Electroodos. Los electroodos son utilizados para la producción de iones (ánodo) e hidrogeno (cátodo) los cuales van a formar los floccs y sedimentos al capturar los contaminantes disueltos en el agua, además de conducir electricidad por lo general son metálicos, por esta razón los electroodos son metales, los más usados por economía y eficiencia son los de hierro y aluminio.

En la su superficie ocurre las reacciones de óxido-reducción (transferencia de electrones entre dos especies). Los electroodos que pierden electrones e incrementan su estado de oxidación gracias a que se produce una reacción de oxidación son los ánodos, los electroodos que reciben electrones reduciendo su estado de oxidación gracias a que sufren una reacción de reducción son los cátodos.

Existen electroodos que son bipolares estos pueden funcionar como ánodos o como cátodos dependiendo del voltaje que se utilice para el proceso.

En el proceso de electrocoagulación los electroodos que más se utilizan por sus características son el hierro (Fe) y el aluminio (Al).

1.1.13 Reacciones²⁸. Las reacciones que se generan en la celda electrolítica dependen del pH, concentración del contaminante, conductividad y del metal que se utilice como ánodo y como cátodo. En un proceso electroquímico se producen simultáneamente 6 reacciones entre los electroodos y la solución electrolítica.

Oxidación: el ánodo cede electrones para oxidar las impurezas presentes en la solución.

Reducción: el cátodo recibe electrones para reducir las impurezas.

Electroforesis: Los iones con carga positiva se mueven del ánodo al cátodo; mientras que los iones con carga negativa se mueven desde el cátodo al ánodo.

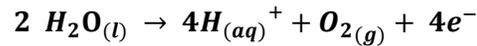
Ataque electroquímico: Si el ánodo está hecho de un metal barato, el ánodo se somete a una ionización de modo de oxidación para liberar cationes.

Electrolisis: El agua se gasifica, se descompone en hidrogeno y oxígeno.

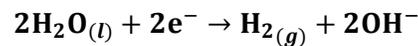
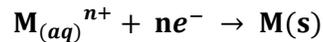
Polarización: Las moléculas y las impurezas del agua se polarizan en respuesta a la aplicación del campo eléctrico, de forma que los iones con carga negativa se acumulan en el ánodo y los de carga positiva en el cátodo.

²⁸ OÑA PAZMIÑO Byron Geovanny, FALCONÍ CEDILLO David Ruperto. tratamiento avanzado de aguas residuales del proceso de lavado y tinturado de jeans en la empresa "mundocolor" mediante electrocoagulación. Trabajo de grado ingeniería industrial. . Riobamba. escuela superior politécnica de Chimborazo. Facultad de mecánica .2013.26. p.

Para un metal (M) como ánodo se tiene el siguiente mecanismo



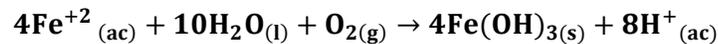
Para un metal (M) como cátodo se tiene el siguiente mecanismo



Para los electrodos de hierro los mecanismos son los siguientes²⁹:

Mecanismo 1: Formación del hidróxido férrico

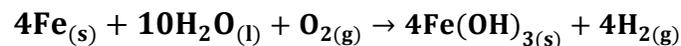
En el ánodo se presentan las siguientes reacciones de oxidación



En el cátodo ocurre la reacción

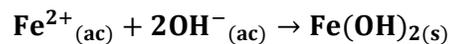
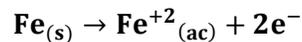


Reacción global



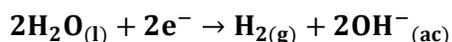
Mecanismo 2: Formación del hidróxido ferroso

Reacciones en el ánodo

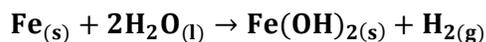


²⁹ AGUILAR ASCON Edwar Alejandro. Evaluación de la eficiencia de una celda de electrocoagulación a escala laboratorio para el tratamiento de agua. Tesis para optar el Grado Académico de Magíster en Ciencias Ambientales con Mención en Control de la Contaminación y Ordenamiento Ambiental. Lima. Universidad Nacional Mayor de San Marcos. Facultad de ingeniería geológica, minera, metalúrgica y geográfica. 2015. 21 p.7

Reacciones en el cátodo

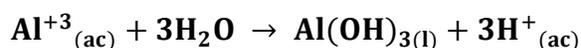


Reacción global

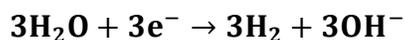


Para los electrodos de aluminio los son los siguientes

En el ánodo ocurren las siguientes reacciones



En el cátodo ocurre la siguiente reacción



1.1.14 Demanda química de oxígeno (DQO). Es un parámetro que permite determinar la cantidad de oxígeno requerido para oxidar la materia orgánica existente en los vertimientos de las diferentes industrias. Se expresa en miligramos de oxígeno diatómico por litro (mg/l O₂).

Para determinar la demanda química de oxígeno se utiliza un agente oxidante en un medio ácido y a este se le adiciona una cantidad determinada de la muestra. Generalmente la DQO es mayor que la DBO ya que son más los compuestos que se pueden oxidar por vía química. Este proceso dura entre 2 y 3 horas.³⁰

1.1.15 Demanda bioquímica de oxígeno (DBO). Es un parámetro que permite determinar la cantidad de oxígeno que los microorganismos consumen en la degradación de la materia orgánica. Se expresa en miligramos de oxígeno diatómico por litro (mgO₂/l). Para determinar la Demanda bioquímica de oxígeno se diluye agua destilada con una concentración saturada de oxígeno, inicialmente se mide la concentración inicial de oxígeno que se encuentra disuelto, después se incubaba a una temperatura de 20° C para finalmente medir nuevamente la concentración de oxígeno disuelto. La disminución de la concentración de oxígeno disuelto es debido a la utilización de oxígeno hecha por los microorganismo en la

³⁰ MEDINA CEVALLOS Juan Felipe, PERALTA CALDERON Marco Orlando. Validación de un prototipo de electrocoagulación para el tratamiento de aguas residuales de alta carga orgánica presentes en la industria. Trabajo de grado ingeniería ambiental. Cuenca. Universidad Politécnica Salesiana sede Cuenca. Facultad de ingeniería. 2015.41.p

incubación para metabolizar la materia orgánica del volumen de la muestra diluida.
31

Como el proceso de descomposición tarda varios meses en completarse y su velocidad varía con la temperatura, en la práctica se mide la D.B.O. correspondiente a un lapso de 5 días y a una temperatura de 20 °C.³²

1.1.16 Efluente. Es el agua con desechos sólidos, líquidos o gaseosos que resultan de procesos producción en las industrias o de otras actividades. (Ver tabla 2) Los efluentes domiciliarios son los que aglutinan diversas actividades comerciales e industriales, además de las viviendas, como así también edificios públicos, tales como escuelas, hospitales, etc., la composición de los efluentes domiciliarios es muy variable y en general está constituida por: aguas domiciliarias, aguas comerciales (restaurantes, garajes, supermercados), aguas industriales (siempre que no sean tóxicas o necesiten tratamiento previo al volcado), aguas de infiltración, alrededor del 85 al 90 % del agua provista como consumo domiciliario, llega a las redes de desagües cloacales.³³ Para realizar el muestreo para los análisis de efluentes hay que tener en cuenta el lugar de muestreo, duración de muestreo, tipo de muestra, volumen de las muestras y preservación de la muestra.

Tabla 2. *Tipos efluentes*

Tipo de vertimiento	Procedencia
Aguas residuales sanitarias	Proceden de los aseos y los vestuarios de la actividad.
Aguas residuales industriales	Son aquellas generadas por empresas que realizan actividades industriales.
Aguas residuales generadas en actividades de hostelería	Establecimientos de hostelería que disponen de cocina, en las que se ha que tener en cuenta los vertidos de grasas y aceites a la red de alcantarillado

Fuente: Elaboración propia

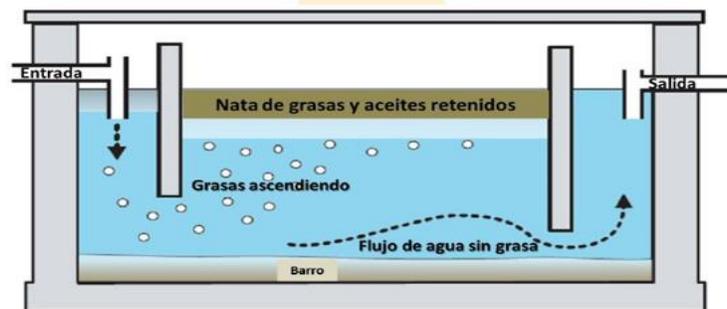
³¹ MEDINA CEVALLOS Juan Felipe, PERALTA CALDERON Marco Orlando. Validación de un prototipo de electrocoagulación para el tratamiento de aguas residuales de alta carga orgánica presentes en la industria. Trabajo de grado ingeniería ambiental. Cuenca. Universidad Politécnica Salesiana sede Cuenca. Facultad de ingeniería. 2015.40.p

³² Efluentes industriales. Desagües industriales. [en línea] citado el 27 octubre de 2018. Disponible en: https://www.fio.unicen.edu.ar/usuario/segumar/Laura/material/Efluentes_higiene.pdf

³³ Características de los líquidos residuales. en línea] citado el 27 octubre de 2018. Disponible en: https://www.frro.utn.edu.ar/repositorio/catedras/civil/ing_sanitaria/Ingenieria_Sanitaria_A4_Capitulo_08_Caracteristicas_de_Liquidos_Residuales.pdf

1.1.17 Trampa de grasa. La trampa de grasa o también llamada interceptor de grasas, es un dispositivo que se utiliza para separar las grasas o residuos sólidos después del proceso productivo. Este dispositivo retiene los sólidos en suspensión por sedimentación y las grasas por el principio de flotación. Las trampas de grasas retardan el flujo del agua procedente de los desagües, con lo que las grasas y el agua tienen tiempo para separarse. Al separarse las grasas flotan en la superficie mientras que otros sólidos más pesados se depositan en el fondo de la trampa. El resto del agua pasa libremente por el alcantarillado de la ciudad.³⁴

Figura 11. Trampa de grasa



Fuente: Trampa de grasas. Citado el 20 de marzo de 2018. Disponible e <http://www.lu24.com.ar/colocacion-trampas-de-grasa-en-comercios/>

1.2 MARCO CONCEPTUAL

A continuación se presentan los términos que se utilizan en la empresa PMP; haciendo referencia a productos y servicios ofrecidos por la empresa.

1.2.1 Ácidos grasos. Los ácidos grasos son componentes naturales de las grasas y los aceites. Se pueden clasificar en tres grupos, saturados, mono insaturados y poliinsaturados. Los ácidos grasos están presentes principalmente en alimentos de origen animal, como la carne (grasa), la manteca, los embutidos, la mantequilla y el queso, en el aceite de palma y en el de coco que se utilizan para freír. La mayoría de los ácidos grasos insaturados (grasas) provienen de las plantas y los pescados grasos.³⁵

Este producto se extrae del proceso de refinación de grasas y aceites. Es fabricado con un alto contenido de acidez. Se utiliza en la industria de jabonería y en la industria de los agentes emulsificantes.

³⁴ HydroPlayas EP. Trampa de grasas. . [en línea] citado el 27 octubre de 2018. Disponible en: <http://hidroplayas.gob.ec/leydetransparencia/trampasdegrasa.pdf>

³⁵ NUTRI-FACTS. Todo sobre las vitaminas y más. Ácidos grasos esenciales. [en línea] citado el 27 octubre de 2018. Disponible: en https://www.nutri-facts.org/es_ES/nutrients/essential-fatty-acids/essential-fatty-acids.html.

1.2.2 Biomesa sólido. Es un producto de PMP que se caracteriza por su 100 % de contenido graso, su consistencia, su gran estabilidad y su resistencia a altas temperaturas, lo que proporciona un excelente rendimiento son que el producto final quede impregnado de aceite, obteniendo frituras más doradas y crujientes.

1.2.3 Biomesa suave. Es una margarina suave de alta plasticidad, complementada con mejoradores óptimamente balanceados y homogeneizados, para entregar al profesional de la industria panificadora y/o pastelera un excelente producto; asegurándole un mayor incremento de volumen en batidos y cremados, para obtener un producto fresco, esponjoso, con textura suave y fina.³⁶

1.2.4 Biomesa multipropósito. Es una Mezcla de aceites vegetales, aceite de soya y oleos seleccionados y refinados, agua, sal, glucosa. Con excelentes propiedades para dar crecimiento de volumen en el cremado y batido, obteniendo así una textura fina y suave en la masa.

1.2.5 Estearina de palma RBD. La Estearina de Palma tiene una composición sólida, obtenida al fraccionar el aceite de palma después de la cristalización a una temperatura controlada y es un aceite libre de ácidos grasos. Se utiliza en la industria para realizar margarinas, grasas sólidas para panadería y en la fabricación de jabones.³⁷

1.2.6 Maquila. La maquila es una opción donde un productor cuente con productos con marca propia elaborados por un tercero. En la maquila se delega a un tercero la fabricación de los productos que el contratante no puede o desea elaborar, este producto es bajo las especificaciones y características que el contratante desee. La maquila es una opción que permite a una empresa generar productos de su propia marca elaborados por PMP. En PMP se realiza maquila de aceites y grasas para los procesos de fabricación de aceites, mezclas RBD y maquila de margarinas.

1.2.7 Oleína de palma RBD. La oleína de palma es el componente líquido del aceite de palma que se obtiene mediante el proceso de fraccionamiento en seco del aceite de palma africana, totalmente refinado y desodorizado, este tiene características ideales para ser empleada en toda clase de frituras y margarinas especializadas. La oleína de palma RBD es empleada para aceites líquidos comestibles de forma pura o en mezcla con otros aceites líquidos, en frituras industriales, diversos platos congelados y deshidratados. Adicionalmente, mezclada con otros aceites y grasas, es base para formulación de alimentos para bebés y como sustituto lácteo.³⁸

³⁶ Procesadora de materias primas S.A. PMP. [en línea] citado el 15 de enero de 2017. Disponible en: <http://www.pmpsa.com.co/margarinas/>.

³⁷ Procesadora de materias primas S.A. PMP. [en línea] citado el 15 enero de 2017. Disponible en: <http://www.pmpsa.com.co/aceites/>.

³⁸ C.I Biocosta S.A. Ficha técnica oleina de palma RBD. [en línea] citado el 27 de octubre del 2018. Disponible en: <http://cibiocosta.com/images/products/oleinadepalmaRBD.pdf>

1.3 MARCO LEGAL

1.3.1 Ley 1333 de 2009. Esta ley establece el procedimiento sancionatorio ambiental donde se muestra los pasos que el gobierno deberá seguir antes y durante el proceso, este incluye notificaciones, intervenciones de las autoridades, verificación de los hechos donde se podrán realizar cualquier tipo de diligencias por ejemplo exámenes de laboratorio, toma de muestras, caracterizaciones etc. Todo esto con el fin de determinar con certeza los hechos de la infracción.

Esta ley es una herramienta que permite tener un conocimiento claro sobre las sanciones ambientales, es una herramienta fundamental para realizar sanciones administrativas y medidas preventivas a las acciones que van en contra con el medio ambiente.

1.3.2 Resolución 631 de 2015. Por lo cual se establecen los parámetros y valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales a cuerpos de aguas superficiales y a los sistemas de alcantarillado público y se dictan otras disposiciones.

Es necesaria esta resolución para este trabajo de grado debido a que permite conocer los valores máximos que están permitidos en los vertimientos de aguas industriales.

Artículo 12

Este artículo presenta los parámetros fisicoquímicos de los vertimientos para aguas residuales no domésticas de las actividades de elaboración de bebidas y productos alimenticios, en la tabla 3 se encuentran los valores de los parámetros fisicoquímicos pH, DQO, DBO5, sólidos suspendidos totales, sólidos sedimentables y grasas y aceites, estos son los valores que se compararán con los valores después de realizar el método de electrocoagulación para los vertimientos de la empresa PMP.

Para la elaboración de aceites y grasas de origen animal y vegetal se tienen los siguientes valores (Ver tabla 3).

Tabla 3. *Valores permitidos por la norma para la elaboración de aceites y grasas*³⁹

Parámetro	Unidades	Elaboración de aceites y grasas de origen animal y vegetal.
pH.	Unidades de pH	6 a 9
DQO	mg/L O ₂	550
DBO5	mg/L O ₂	300
Solidos suspendidos totales	mg/L	300
Solidos sedimentables	mg/L	2
Grasas y aceites	mg/L	40

Fuente: Elaboración propia

1.3.3. Resolución 3657 de 2009.

La resolución 3657 de 2009 determina los valores máximos que están permitidos para los vertimientos realizados a la red de alcantarillado y el control y manejo de los vertimientos a la red de alcantarillado público.

El artículo 22 hace referencia a la obligación de tratamiento previo de los vertimientos. Cuando las aguas residuales no domésticas no reúnan las condiciones de calidad exigidas para su vertimiento a la red de alcantarillado público, deberán ser objeto de tratamiento previo mediante un sistema adecuado y permanente que garantice el cumplimiento en todo momento de los valores de referencia de la presente norma.⁴⁰

³⁹ COLOMBIA CONGRESO DE LA REPUBLICA. Resolución 631 del 2015. (18, abril, 2015). Por la cual se establecen los parámetros y los valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales a cuerpos de aguas superficiales y a los sistemas de alcantarillado público y se dictan otras disposiciones. Bogotá D.C.

⁴⁰ COLOMBIA CONGRESO DE LA REPUBLICA. Resolución 3657. (19, junio, 2009). Por la cual se establece la norma técnica, para el control y manejo de los vertimientos realizados a la red de alcantarillado público en el Distrito Capital. Bogotá D.C.

2. DIAGNOSTICO

2.1 GENERALIDADES

2.1.1 Historia. La empresa Procesadora de Materias Primas (PMP) fue fundada en marzo de 1984 en el barrio San Benito dedicada a la elaboración de sebo, en el año 2004 se empieza a construir la planta colaceites terminado su construcción en el año 2007 convirtiéndose en la sede principal allí se elaboran margarinas, aceites RBD, preparados grasos propios de la empresa y de empresas externas que necesitan elaborar sus productos cumpliendo sus propios requisitos.

Con fin de minimizar con el impacto ambiental y empezar a cumplir con las normas ambientales en el año 2002 empieza el funcionamiento de la planta de tratamiento de agua, PMP se caracteriza por mantener un compromiso con el medio ambiente generando una gestión integral ambiental con procesos sostenibles, disposición correcta de residuos y política ambiental que le permite aportar positivamente al medio ambiente; gracias a este compromiso en el año 2010 es reconocida en el primer puesto del PREAD y en el Premio Nacional de Ecología Planeta Azul del banco occidente en categoría PYME.

2.1.2 Materias primas.

En la tabla 4 se pueden observar las materias primas que se utilizan para el proceso de productivo.

Tabla 4. *Materias primas utilizadas en PMP*

Materia prima	Descripción	Características
Aceite crudo de palmiste	Este aceite es obtenido de la almendra de palmiste por medio de extracción mecánica.	Contiene ácidos grasos ⁴¹ : Ácido laurico = 0,1% Ácido mirístico = 1% Acido palmítico = 38% Acido esteárico = 5% Ácido palmitoleico = 4,9% Ácido oleico = 36% Ácido gonodoico = 0,05% Ácido linoleico = 14,75 % Acido gamma linoleico = 0,2% Se utiliza como materia prima para la fabricación de cosméticos, productos de limpieza, jabones y en la industria oleo química.

⁴¹ Fundación española del aceite de palma sostenible. Composición y características. [en línea] citado el 27 de octubre de 2018. Disponible en: <https://aceitedepalmasostenible.es/aceite-palma-composicion-caracteristicas/>

Tabla 4. (Continuación)

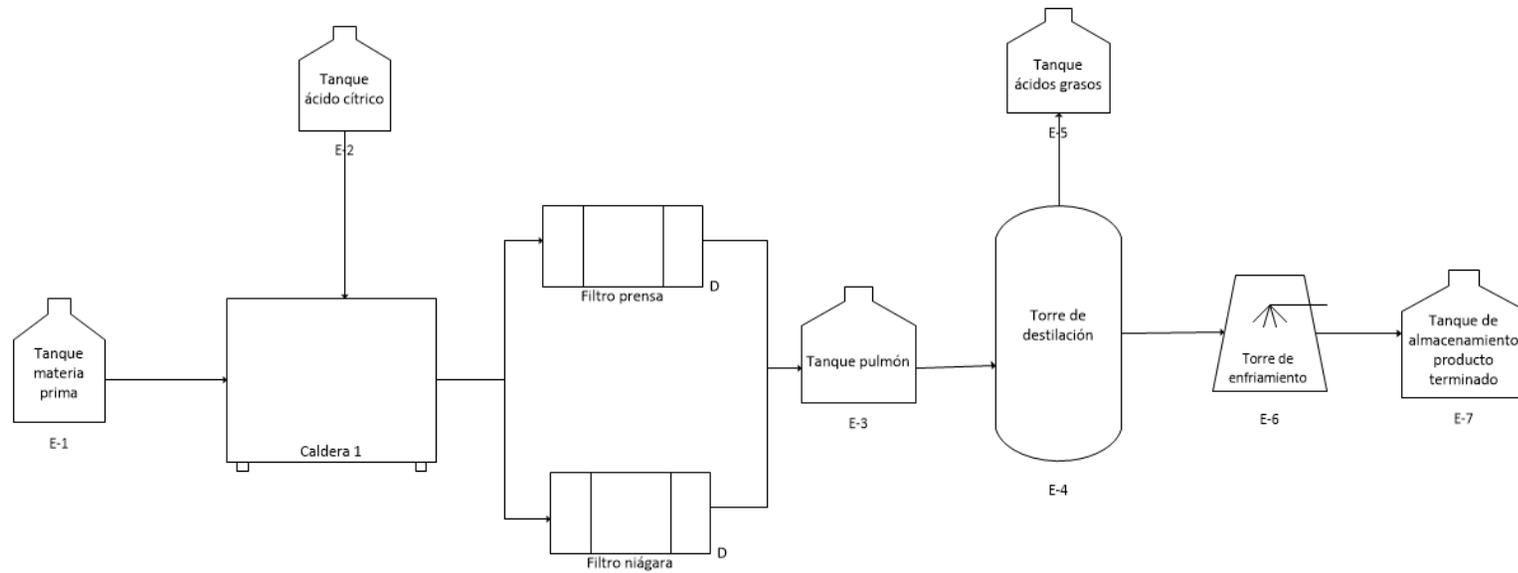
Materia prima	Descripción	Características
Aceite crudo de Palma	Este aceite es obtenido de la palma por medio de extracción mecánica.	<p>Contiene ácidos grasos:</p> <p>Ácido laurico = 48% Ácido mirístico = 14,2% Ácido caprílico = 4% Ácido esteárico = 2% Ácido palmitoleico = 4,3% Ácido oleico = 14,5% Ácido caproico = 1% Ácido linoleico = 2,6% Ácido caprílico = 3,6% Ácido palmítico = 5,8%</p> <p>Alto contenido de antioxidantes naturales. Se utiliza como materia prima para la elaboración de mezclas de aceites y margarinas para mesa y cocina, grasas de repostería.</p>
Sebo	El sebo se obtiene fundiendo las grasas del ganado. Se clasifica en comestible y no comestible	<p>Contiene ácidos grasos:⁴²</p> <p>Ácido mirístico = 3,2% Ácido palmítico = 25% Ácido palmitoleico = 3,2% Ácido esteárico = 21,1% Ácido oleico = 38,3% Ácido linoleico = 2,2% Ácido linolénico = 6,0%</p> <p>Después del procesamiento del sebo, este se emplea para fabricar jabones y como alimento de animales.</p>

Fuente: Elaboración propia

⁴² Fedna. Fundación Española para el Desarrollo de la Nutrición Animal. en línea] citado el 27 de octubre de 2018. Disponible en: http://www.fundacionfedna.org/ingredientes_para_piensos/grasas-de-origen-animal-actualizado-nov-2015

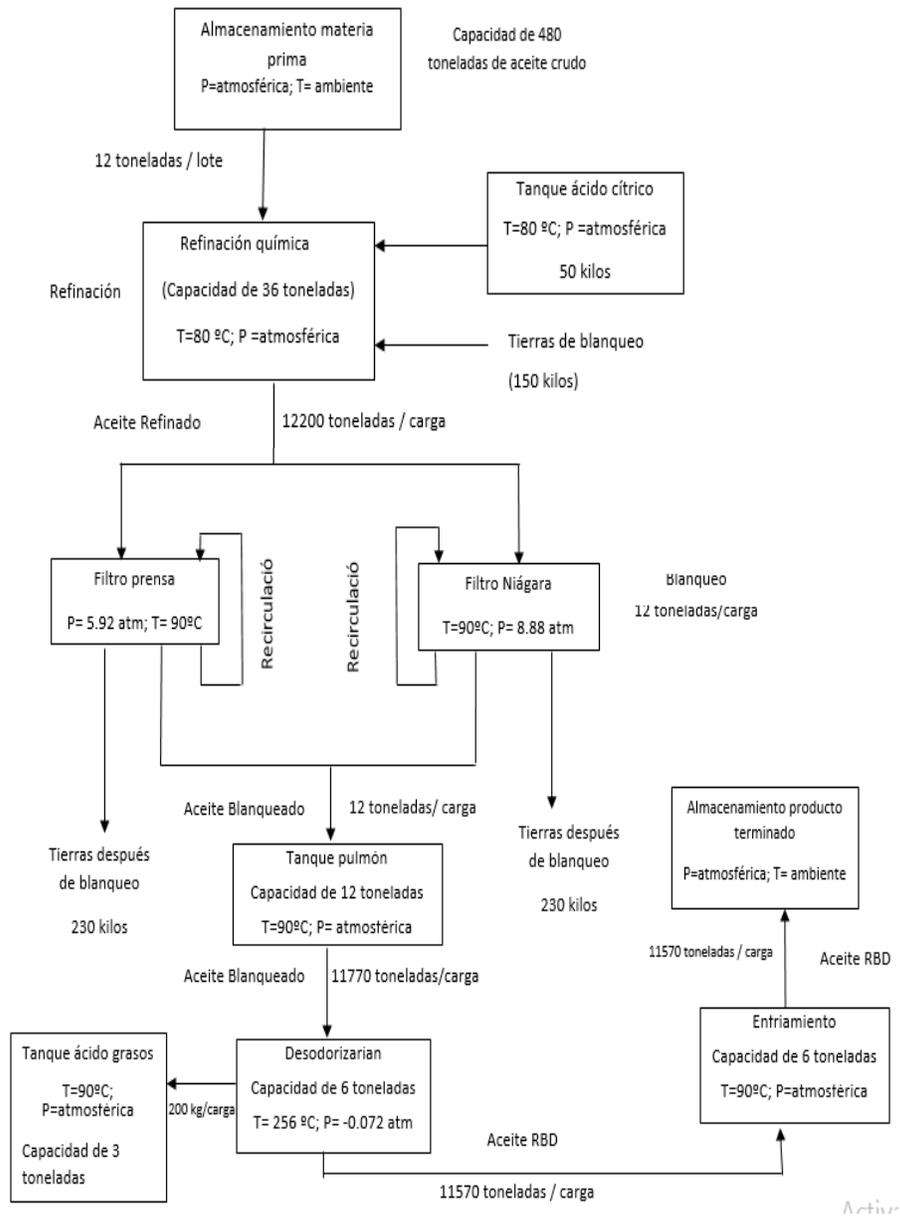
2.1.3 Proceso de producción.

Figura 12. Diagrama de flujo proceso de producción



Fuente: Elaboración propia

Figura 13. Diagrama de bloques del proceso productivo basado en la transformación físico química de una carga de aceite (12 toneladas)



Fuente: Elaboración propia

La planta opera 24 horas, 6 días a la semana, el proceso consiste en la refinación, blanqueado y desodorización de 16 toneladas por día de aceite crudo de origen animal o vegetal, inicialmente los aceites crudos se procesan por lotes, estos aceites son bombeados a los tanques de almacenamiento llamados tanque “neutra 1”, los tanques “neutra 1” son un conjunto de tres tanques de forma cónica con capacidad de 12 toneladas cada uno, en estos tanques se hace una sedimentación por diferencia de densidades lo que genera que las impurezas queden en la parte inferior del tanque , el agua queda la parte intermedia y el aceite en la parte superior. Este proceso ocurre durante un tiempo de 3 a 6 horas dependiendo de la necesidad de producción e impurezas que se encuentra en el aceite en el momento del descargue. Por cada 12 toneladas se obtiene una merma de 50 a 200 kilos.

En la siguiente etapa denominada blanqueo se adicionan 25 kg de ácido cítrico (0,35 – 0,5 p/p de aceite) y 100 kg de tierras de blanqueo, el ácido cítrico aglomera y quema impurezas, este es especialmente usado con el aceite de origen animal debido a la quema y aglomeración de toda proteína que esté presente en el aceite, las tierras de blanqueo adsorben las impurezas aglomeradas por el ácido cítrico, y descomponen los hidroperóxidos. Posteriormente el aceite se hace pasar por un filtro prensa (ver figura 14) o por un filtro Niágara dependiendo de la disponibilidad de su uso donde se sitúa para retornar aproximadamente por una hora, tiempo en el cual todas las tierras e impurezas del aceite van a quedar atrapadas dentro del filtro, el aceite ya refinado y blanqueado es bombeado a un tanque que sirve de almacenamiento llamado “tanque pulmón” para la posterior etapa. Los filtros retienen entre 100 a 300 kilos de tierra húmeda, que es la tierra de blanqueo con los aglomerantes generados en el aceite por el ácido cítrico y un poco de aceite residual.

Figura 14. Filtro prensa usado en la planta de refinación



Fuente: Elaboración propia

La última etapa que se realiza en el tratamiento fisicoquímico que se le hace al aceite es la desodorización, la cual pretende mejorar el aspecto, sabor, color y estabilidad del aceite, en esta etapa el aceite es destilado a 260 °C y sometido a presiones de vacío de 2 bar a 6 bar por 3 horas, el vacío es generado por una corriente de vapor continuo de vital importancia durante todo el proceso ya que genera una reducción de la presión de volatilización de los componentes del aceite tales como los carotenoides y los ácidos grasos. La corriente de vapor arrastra por la parte superior del desodorizador parte de los compuestos que se volatilizan a un tanque llamado “ácidos grasos” (Ver figura 15) donde se almacenan entre 50 a 100 kilos por cada seis toneladas que pasan por el desodorizador, la otra parte que no llega a este tanque, viaja junto con la corriente de vapor hasta que llegan a la torre de enfriamiento donde el vapor pasa a estado líquido junto con los componentes volátiles, los cuales generan un agua de color café que posee un olor fuerte, estos ácidos grasos tienen una temperatura de condensación bastante baja, cuando llegan al enfriador parte de los ácidos grasos se solidifica y se comienza a acumular en las tuberías haciendo que la transferencia de calor con el tiempo sea menos eficiente. Para solucionar este problema, y la saturación del agua con los compuestos volátiles se hace un cambio del agua que recircula en el proceso de enfriamiento y arrastre de vapor una vez al año, en esta parada se limpian todas las tuberías, torres de enfriamiento y reactores que tienen lugar en la planta. Después de estas tres horas, el aceite es enviado a un economizador, donde se enfría hasta una temperatura de 80 °C y luego se bombea para ser almacenado. (Ver figura 13)

Figura 15. Tanque “ácidos grasos”



Fuente: Elaboración propia

2.1.4 Balance del ciclo de agua en el proceso. En la actualidad PMP SA emplea agua que le proporciona el sistema de acueducto de Bogotá, esta agua se utiliza para la preparación de margarinas, para la generación de vapor el cual permite calentar los aceites y los reactores y para el funcionamiento del sistema sanitario de la empresa, el agua consumida en esta última actividad es descargada en el sistema de alcantarillado de aguas residuales de Bogotá. Se sabe por información de los operarios que al día consumen 2 m^3 , estos se utilizan para la fabricación de margarinas, es parte de la composición de la misma por lo tanto no sale del proceso en ningún tipo vertimiento. La empresa cuenta con 2 torres de enfriamiento las cuales fueron fabricadas por la empresa JNC, estas torres de enfriamiento enfrían $1,8 \text{ m}^3$ de agua cada una por hora. Para un total de $3,6 \text{ m}^3/\text{h}$, este caudal es de la corriente de agua que va de las torres de enfriamiento a las piscinas.

Las piscinas son 6 trampas de grasa que tienen cada una de altura de 2 metros, de longitud de 2 metros y ancho de 4 metros, y una última trampa subterránea que mide 2,5 metros de alto, 4 metros de longitud y 6 metros de ancho, estas trampas contiene 108 m^3 de agua (Ver figura 16)

Para la producción de vapor usan una caldera piro tubular fabricada por colmaquinas, esta caldera genera $60 \text{ m}^3/\text{h}$, para operar tiene que tener un almacenamiento en promedio de 110 m^3 .

$3,6 \text{ m}^3/\text{min}$ de agua residual que se recircula en el proceso productivo va al sistema de alcantarillado.

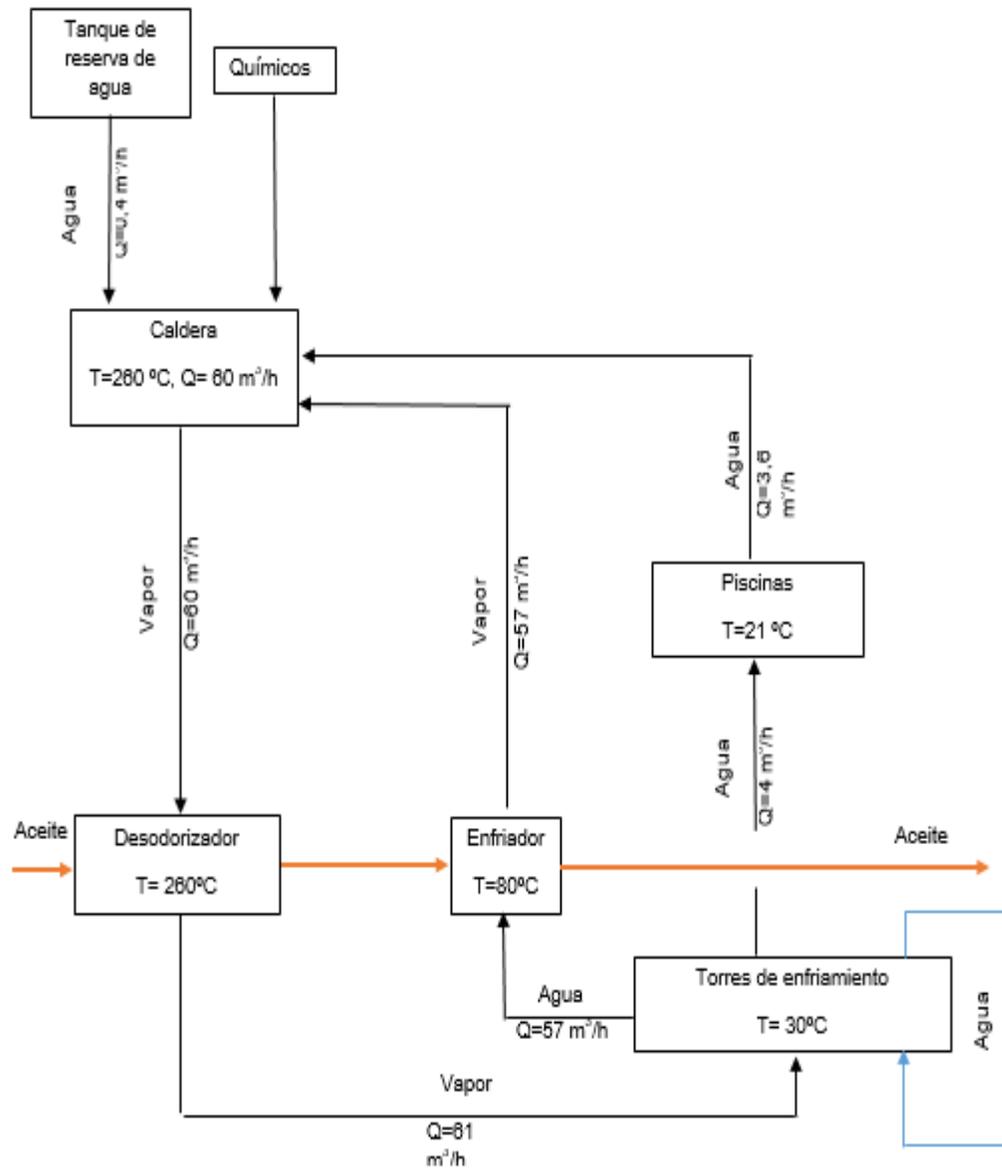
Para este trabajo de grado se plantea el tratamiento del agua después de las trampas de grasa (piscinas) puesto que la empresa no desea modificar este pre-tratamiento. La figura 17 muestra el actual balance hídrico del agua dentro del proceso de producción de los aceites refinados.

Figura 16. Trampas de grasa de la empresa PMP



Fuente: Elaboración propia

Figura 17. Balance hídrico.



Fuente: Elaboración propia

2.1.5 Productos. La empresa PMP produce margarinas de diversos tipos, variando principalmente la cantidad de estearina o palmiste en cada una de ellas, esto para conseguir diferentes punto de fusión de acuerdo a las necesidades de los clientes o el producto a fabricar, y así que los clientes obtengan la margarina ideal para cada producto panificado. Entre los tipos de margarinas se encuentra tipo suave esta es de alta plasticidad, complementada con mejoradores óptimamente balanceados y homogeneizados, para entregar al profesional de la industria panificadora y/o pastelera un excelente producto; asegurándole un mayor incremento de volumen en batidos y cremados, para obtener un producto fresco, esponjoso, con textura suave y fina ⁴³. Otro tipo de margarina es la multipropósito esta es un producto de excelentes propiedades para dar crecimiento de volumen en el cremado y batido, obteniendo así una textura fina y suave en la masa⁴⁴. La industrial es una margarina que brinda alto volumen y excelentes características en la elaboración de todo tipo de productos de panadería. Muy útil también para la preparación de salsas y aderezos en sustitución de la mantequilla⁴⁵. El aliñado es un producto con excelentes características plásticas que da un buen amasado y una miga suave al pan⁴⁶.

En la empresa también se producen aceites y mezclas RBD por ejemplo el aceite de Palma RBD origen vegetal, obtenido del fruto de la palma aceitera mediante varias operaciones de extracción y purificación, es necesario filtrar y refinar el líquido para obtener el aceite RBD, que se utiliza para la producción de diferentes tipos de grasas y margarinas especialmente para frituras, panadería⁴⁷, aceite de palmiste RBD de origen vegetal, extraído de la semilla de la palma aceitera, mediante procesos de extracción mecánica o por solventes. Para garantizar un producto RBD de excelente calidad es necesario realizar una refinación física en la cual se extraen todos los ácidos grasos no comestibles, aceite de Soja RBD⁴⁸, aceite de soja es un producto vegetal que después de un proceso de extracción y refinación adecuado puede ser manipulado en frituras, este aceite contiene los ácidos grasos Omega 3, Omega 6, vitamina E y no contiene grasas trans⁴⁹. La mezcla de aceites RBD es Producto obtenido por la combinación de grasas y aceites animales y/o vegetales de acuerdo con las necesidades de la industria. Proporciona características únicas y personalizadas, satisfaciendo los deseos de cada uno de nuestros clientes.

⁴³ Procesadora de materias primas S.A. PMP. [en línea] citado el 15 enero de 2017. Disponible en: <http://www.pmpsa.com.co/margarinas/>.

⁴⁴ *Ibíd.*

⁴⁵ Procesadora de materias primas S.A. PMP. [en línea] citado el 15 enero de 2017. Disponible en: <http://www.pmpsa.com.co/margarinas/>.

⁴⁶ *Ibíd.*

⁴⁷ Procesadora de materias primas S.A. PMP. [en línea] citado el 15 enero de 2017. Disponible en: <http://www.pmpsa.com.co/aceites/>.

⁴⁸ *Ibíd.*

⁴⁹ Procesadora de materias primas S.A. PMP. [en línea] citado el 15 enero de 2017. Disponible en: <http://www.pmpsa.com.co/aceites/>.

Las materias primas e insumos utilizados en las mezclas cumplen con los más altos estándares de calidad en la industria⁵⁰.

Como resultado de este proceso industrial se obtienen subproductos, los cuales son residuos de etapas de la refinación de los aceites, tales como los ácidos grasos, removidos en la desodorización, los cuales son vendidos a jaboneras. Otros productos elaborados en PMP pero en menor medida son la Estearina y la Oleína, son el resultado de fraccionar el aceite de palma RBD, proceso que consiste en separar el aceite de palma para obtener su fracción dura (estearina, la cual tiene un punto de fusión de 52 °C) y la fracción líquida (oleína, la cual tiene punto de fusión de 21 °C).

Otros productos de la empresa es el sebo y ácidos grasos, el sebo se obtiene a partir el mejor ganado de bovino a través de una estricta selección de proveedores. El proceso se realiza cuidadosamente garantizando la obtención de productos de la más alta calidad, con una acidez y peróxido bajos, de acuerdo con las especificaciones de la industria cosmética, lubricantes y alimentos para mascotas, entre otros.⁵¹ Los ácidos grasos se extraen del proceso de refinación de grasas y aceites. Es fabricado con un alto contenido de acidez. Se utiliza en la industria de jabonería y en la industria de los agentes emulsificantes.⁵²

2.2 PROBLEMÁTICA DE LA DISPOSICIÓN DE VERTIMIENTOS NO TRATADOS

Como en la empresa no hay un tratamiento de aguas, los vertimientos no cumplen con los requisitos máximos que exige la resolución 631 de 2015 lo que genera problemas con la secretaria distrital de ambiente ya que se prohíbe todo vertimiento de aguas residuales a las calles, calzadas y canales o sistemas de alcantarillado para aguas lluvias.⁵³ En el artículo 22 de la resolución 3657 de 2009 se menciona que es una obligación el tratamiento previo de los vertimientos, este tratamiento debe ser adecuado y debe garantizar el cumplimiento de los valores establecidos en todo momento. Las autoridades ambientales podrán imponer alguna o algunas de las siguientes sanciones de acuerdo con las características del infractor, el tipo de infracción y la gravedad de la misma.⁵⁴

1. Multas diarias hasta por cinco mil (5000) salarios mínimos mensuales legales vigentes.

⁵⁰ *Ibid.*

⁵¹ Procesadora de materias primas S.A. PMP. [en línea] citado el 15 enero de 2017. Disponible en: <http://www.pmpsa.com.co/aceites/>.

⁵² *Ibid.*

⁵³ COLOMBIA CONGRESO DE LA REPUBLICA. Resolución 3657. (19, junio, 2009). Por la cual se establece la norma técnica, para el control y manejo de los vertimientos realizados a la red de alcantarillado público en el Distrito Capital. Bogotá D.C.

⁵⁴ COLOMBIA CONGRESO DE LA REPUBLICA. Decreto 3678. (4, octubre, 2010). Por el cual se establecen los criterios para la imposición de las sanciones consagradas en el artículo 40 de la Ley 1333 del 21 de julio de 2009 y se toman otras determinaciones. Bogotá D.C.

2. Cierre temporal o definitivo del establecimiento, edificación o servicio. El cierre temporal o definitivo genera pérdidas económicas debido a que el proceso productivo se ve afectado.
3. Revocatoria o caducidad de licencia ambiental, autorización, concesión, permiso o registro.

2.3 CARACTERIZACION DEL AGUA

El día 9 de mayo del 2017 se tomó una muestra de 4500 ml de agua proveniente de las trampas de grasa; se realizó en este punto debido a que la empresa cuenta con estas trampas y no desean modificar este pre-tratamiento, las trampas de grasa permiten separar residuos sólidos y restos de grasas logrando que el sistema experimental tenga menos carga contaminante a separar. Posteriormente se llevó a un laboratorio donde se realizaron las pruebas de los parámetros fisicoquímicos: DBO5, DQO, grasas y aceites, sólidos suspendidos, sólidos sedimentables, cuyos resultados se muestran en la tabla 5.

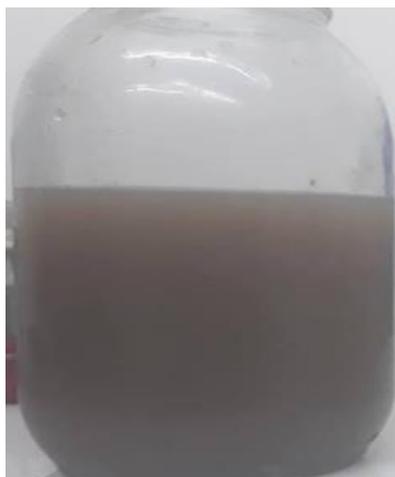
Tabla 5. Caracterización de los vertimiento y comparación con respecto valores según la resolución 631 de 2015

	Caracterización del agua	Parámetros elaboración de aceites y grasas de origen animal y vegetal según resolución 631 ⁵⁵	Unidades
Reporte de resultados			
Fecha	2017-09-26	-	-
Examen solicitado	Caracterización de aguas (fisicoquímico)	-	-
Muestreo por	Laboratorio	-	-
Tamaño muestra	4500 ml	-	-
Tipo de envase	Plástico	-	-
Temperatura	10.1 °C	-	-
Método	S.M. 22st edition 5210 B, 522D C, 522D B, 254D D y gravimetría	-	-
DBO5	12308	300	mg/l O ₂
Sólidos suspendidos totales (SST)	17814	300	mg/l
DQO	85229	550	mg/l O ₂
Grasas y aceites	1264	40	mg/l
Sólidos totales	24007	2	mg/l

Fuente: Elaboración propia

⁵⁵ COLOMBIA CONGRESO DE LA REPUBLICA. Resolución 631 del 2015. (18, abril, 2015). Por la cual se establecen los parámetros y los valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales a cuerpos de aguas superficiales y a los sistemas de alcantarillado público y se dictan otras disposiciones. Bogotá D.C.

Figura 18. Vertimientos PMP



Fuente: Elaboración propia

Los vertimientos de PMP se caracterizan por tener una temperatura de 10 °C, El pH se encuentra en un rango de 6,2 – 6,8, estos vertimientos presentan un color café oscuro, mal olor y contiendo de solidos sedimentables y suspendidos (ver figura 18), adicionalmente los parámetros fisicoquímicos se encuentran dentro de los valores mencionados a continuación DQO igual a 85229 mg/l O₂, DBO igual a 12308 mg/l O₂, sólidos suspendidos igual a 17814 mg/l, sólidos sedimentables igual a 24007 mg/l, grasas y aceites igual a 1264 mg/l.

Según el artículo 12 de la resolución 631 de 2015 mostrado anteriormente y con base en los resultados del laboratorio se evidencia que los parámetros fisicoquímicos, DQO, DBO, solidos suspendidos totales, solidos sedimentables y grasas y aceites no cumplen con la norma ya que sus valores se encuentran por encima de los parámetros permitidos, esto se debe a que la empresa solo cuenta con trampas de grasa que disminuye la cantidad de ácidos grasos y los sólidos sedimentables. No cuentan con una planta de tratamiento de aguas para hacer una correcta disposición de estos vertimientos. (Ver tabla 5)

3. SELECCIÓN DE LAS VARIABLES PARA EL MÉTODO DE ELECTROCOAGULACIÓN.

En el presente capítulo se realiza la especificación de las variables principales que influyen en el método de electrocoagulación, el correcto análisis de estas variables y sus correspondientes valores permitirán obtener resultados confiables al momento de realizar la experimentación.

En la tabla 6 se puede evidenciar un breve resumen de las investigaciones en las diferentes industrias con los valores que generaron un mayor porcentaje de remoción de DQO y grasas y aceites.

Tabla 6. *Investigaciones del método de electrocoagulación para tratamiento de agua.*

Autor / año	Tipo de industria	Características del agua a tratar	Electrodos utilizados	Valor de variables	Porcentaje de remoción
Andaluz Delgado Jennifer Celia. 2016	Agroquímica	DQO 37200 mg/IO ₂	Aluminio y hierro	12,6 V 5 min	98.79 % DQO
Morante Gonzalo. 2002	Alimentos (gelatina)	DQO 3104 mg/l O ₂ ; Grasas y aceites 1195 mg/l	Aluminio y hierro	2,7 V 6,26 A/m ² 15 min	70 % DQO 90 % de grasas y aceites.
Arango Ruiz Álvaro, Garcés Giraldo Luis. 2007	Alimentos (lácteos)	DQO 6306 mg/l O ₂ ; Grasas y aceites 782 mg/l	Aluminio y hierro	43,23 A/m ² 15 min	94% DQO 99 % de grasas y aceites.
Aguilar Ascon Edwar Alejandro. 2015	Pinturas	DQO 3920 mg/l O ₂	Aluminio y hierro	5 A 15 min	87 % DQO

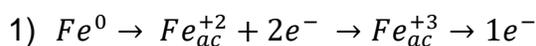
Tabla 6. (Continuación)

Autor / año	Tipo de industria	Características del agua a tratar	Electrodos utilizados	Valor de variables	Porcentaje de remoción
Arango Gómez Sebastián, López Gutiérrez Andrés. 2008	Autopartes	DQO 5582 mg/l O ₂ ; Grasas y aceites 800 mg/l	Aluminio y hierro	5,0 V	81.93% DQO
				180 min	90.57% grasas y aceites
López Escobar Guisela Pamela. 2014	Alimentos (yogurt)	DQO 1044 mg /l O ₂ ; DBO ₅ 420 mg /l O ₂	Aluminio y hierro	6,0 V	93% DQO
				60 min	82 % DBO ₅ 76 % SS
Medina Cevallos Juan Felipe, Peralta Calderón Marco Orlando. 2015	Sintética (agua potable + harina de sangre)	No registra	Aluminio	30 V	78.26 % DBO
					90.26 % DQO 81.49 % unidades de color

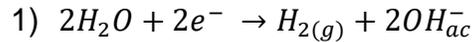
Fuente: Elaboración propia

De la tabla anterior se puede concluir que los electrodos que más se utilizan para la electrocoagulación son los de aluminio y hierro debido a la formación de iones e hidrogeno en el medio acuoso en los cuales se realizaron dichos estudios y también a su facilidad de adquisición debido a su bajo costo.

La reacción esperada para los electrodos de hierro parte de la remoción de contaminantes debido a que el agua genera una mezcla con los ácidos grasos y el aceite que arrastra durante todo el proceso industrial, este aceite durante la reacción de electrolisis con las celdas de hierro (Fe) hace que el hierro sea oxidado a Fe+2 y posteriormente a Fe+3, la reacción esperada en esta etapa es la siguiente:

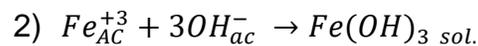


Con la electrolisis la fuerza iónica del medio acuoso aumentara, la creciente generación de cationes +3 logra neutralizar las moléculas de aceite y ácidos grasos, simultáneamente el hidrogeno se libera como lo muestra la siguiente reacción⁵⁶.



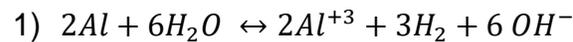
Como consecuencia, de las reacciones 1 y 2, la emulsión es desestabilizada haciendo que las partículas contaminantes comiencen a aglomerarse.

La reacción que sucede entre el Fe+3 y los OH- tienen como resultado la generación de hidróxido ferrico⁵ según la reacción:

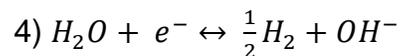
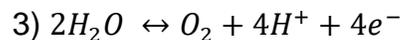
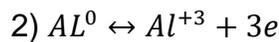


Los contaminantes ya desestabilizados flotan en el hidróxido férrico formado aglomerándose en la superficie del vertimiento.

Según bibliografía, las reacciones que se llevarían a cabo con los electrodos de aluminio corresponden a la oxidación del aluminio



El proceso electroquímico que ocurre en la superficie del ánodo y el cátodo son las siguientes:



En el ánodo las reacciones del Al (1) junto con la formación de oxígeno en la ecuación (3) compiten con las reacciones de formación y evolución del hidrogeno

⁵⁶ ARANGO RUIZ Álvaro y GARCES GIRALDO Luis Fernando. Diseño de una celda de electrocoagulación para el tratamiento de aguas residuales dela industria láctea.2007. p. 61

en la reacción (4) es de notar que la formación de H₂ se da de manera química y eléctrica ⁵⁷

Por otra parte, se evidencia que el método de electrocoagulación es eficiente para tratar los diferentes vertimientos industriales, demostrado en los distintos tipos de vertimientos tratados bajo diferentes voltajes y diferentes tiempos de reacción obteniendo porcentajes de remoción mayores a 70% para los parámetros DQO, DBO₅, sólidos suspendidos, grasas y aceites y disminución de color.

Las variables constantes para este trabajo de grado son:

3.1 pH

Esta variable es importante porque afecta la eficiencia de la corriente en el proceso de solubilidad del metal al momento de liberar iones del metal en el medio acuoso y en la formación de hidrogeno. Se ha observado en diferentes investigaciones que el pH varía durante el proceso de electrocoagulación; esta variación es dependiente del material de los electrodos y del pH inicial del agua a tratar. ⁵⁸ Para aguas residuales acidas el pH tiende a incrementar durante el proceso es decir ⁵⁹el pH tiende a ser básico esto se debe a la generación de hidrogeno molecular en el cátodo. Para las aguas residuales alcalinas el pH tiende a disminuir, pero esta disminución depende del contaminante del agua a tratar. (Ver tabla 7).

Tabla 7. *Investigaciones del método de electrocoagulación con pH de 6 a 8.*

Autor	Tipo de agua	pH	% de remoción
Pouet, M-F	No registra	7,7-8,0	75 % DQO
Aguilar Ascon Edwar Alejandro	Pintura	7,12	87 % DQO
Arango Ruiz Álvaro, Garcés Giraldo Luis Fernando	Alimentos (lácteos)	7,0	70.83% DQO
López Escobar Guisela Pamela	Alimentos (yogurt)	6,0	93% DQO; 82 % DBO ₅
Bani Salameh Walid K. M, Ahmad	Alimentos (aceituna)	6,0	47.7 % DQO
Hesham, Al-Shannag Mohammad			57.1 % SST
M.Zaied, N. Bellakhal	Farmacéutica	7,0	

⁵⁷ PRIETO GARCÍA Francisco, CALLEJAS HERNÁNDEZ Judith, REYES CRUZ Víctor Esteban, MARMOLEJO SANTILLÁN Yolanda, PRIETO MÉNDEZ Judith. Electrodisolución de electrodos de aluminio durante la electrocoagulación de un lacto suero ácido. vol.81 no.187.2014. p.58

⁵⁸ ARANGO RUIZ Álvaro. Efectos del pH y la conductividad en la electrocoagulación de aguas residuales de la industria láctea. Caldas. 2012. p. 60.

⁵⁹ PRIETO GARCÍA Francisco, CALLEJAS HERNÁNDEZ Judith, REYES CRUZ Víctor Esteban, MARMOLEJO SANTILLÁN Yolanda, PRIETO MÉNDEZ Judith. Electrodisolución de electrodos de aluminio durante la electrocoagulación de un lacto suero ácido. vol.81 no.187.2014. p.58

Fuente: Elaboración propia

Teniendo en cuenta la tabla 7, se concluye que el rango del mejor desempeño para el método de electrocoagulación se encuentra en un rango de 6 a 7 debido a que el agua en este rango es neutra.

Para la experimentación se establece que la variable independiente pH debe ser controlada en un valor de 7 por las razones mencionadas a continuación:

Según los referentes mostrados anteriormente en la tabla 7 se puede concluir que el pH óptimo para el tipo de agua con materia orgánica, altos porcentajes de DQO y grasas y aceites es de 7.

Un pH que este fuera de las variables recomendadas no se controla y puede ocasionar cambios drásticos en el proceso afectando la cantidad de iones e hidrógenos liberados en el medio acuoso.

3.2 TEMPERATURA

La temperatura a la cual se logra una mayor remoción de los contaminantes es 60°C, las temperaturas superiores e inferiores han demostrado producir una menor generación de floculos, principalmente debido a que los electrodos se van oxidando dentro del sistema de electro coagulator, estos comienzan a formar una capa de óxido la cual no permite el flujo de los iones ni del hidrogeno en el medio acuoso. En cambio, a 60°C la capa de óxido se comienza a separar del electrodo permitiendo el flujo directo de los iones al medio. En estas investigaciones se ha logrado concluir que entre menor sea la película de óxido en el electrodo más eficiente va a ser el efecto de la temperatura.⁶⁰

Para la experimentación de este proyecto se decide que la variable independiente temperatura es necesario controlarla para obtener resultados más eficientes, según la bibliografía se encuentra que el valor óptimo de esta variable es a 60°C donde se obtuvieron mayores porcentajes de remoción de los contaminantes.

Las variables que no se dejaron constantes para este trabajo de grado son:

3.3 DENSIDAD DE CORRIENTE

La densidad de corriente es el suministro de energía que se provee al sistema de electrocoagulación, de este depende la cantidad de iones aluminio que se desprenden en el medio acuoso dependiendo el tipo de electrodo que se esté usando en la experimentación. La densidad de corriente tiene una relación directamente proporcional con el consumo de energía y la eficiencia de remoción

⁶⁰ ARANGO RUIZ Álvaro. Efectos del pH y la conductividad en la electrocoagulación de aguas residuales de la industria láctea. Caldas. 2012. p. 61.

del contaminante, sin embargo, al aumentar excesivamente la densidad de corriente esta tiende a calentar el agua y de esta forma disminuir la eficiencia de la remoción.

Se realizó una prueba preliminar en la cual se tomó el valor de 2 voltios que utilizaban en los antecedentes de investigación en la empresa para observar los resultados de la experimentación propuesta para estos vertimientos, en bibliografía no se encontraron vertimientos parecidos o cercanos en cada variable a los vertimientos de PMP, por lo que surgió la necesidad de predecir experimentalmente las reacciones esperadas con un valor ya estudiado.

Basados en esta experimentación y los antecedentes se decidió dejar la densidad de corriente en dos amperios y evaluar diferentes tiempos de reacción para determinar cómo era la influencia del tiempo con respecto a la remoción, esto también nos permitiría elegir el tiempo más adecuado a este voltaje y el incremento del costo de energía consumida.

Se realizó una primera experimentación en la cual se eligió un valor de 2 voltios, esto debido a que es un valor que genera un bajo consumo de energía y que a la vez es viable para la remoción considerable de contaminantes. Adicionalmente en la empresa PMP se realizó un ensayo donde se evaluó el método de electrocoagulación utilizando 2V en un tiempo de residencia de 2 horas. Obteniendo resultados favorables en la formación de espuma y sólidos sedimentables.

Para la selección de los valores del voltaje a utilizar en la segunda experimentación se escogieron diferentes artículos en donde se realizaba un tratamiento para los vertimientos de industrias similares a PMP, el resultado de esta investigación fue un valor promedio de voltaje de 7,7V. A partir de este valor se elige un valor superior, siendo este de 12,6 voltios el cual es utilizado en una investigación para remover vertimientos con alta carga de DQO, y se escogió un valor por debajo a 7,7 voltios, siendo 2,7 voltios el valor a comparar, este valor se tomó de acuerdo a una investigación donde trataban vertimientos de una industria de grasas y aceites para automóviles. (Ver tabla 8)

Tabla 8. *Características principales de las variables utilizadas para el método de electrocoagulación.*

Autor	Voltaje (V)	Contaminante	Tiempo (minutos)	Densidad de corriente (A/cm ²)	% de remoción
Monrate, G. Gonzalo. 2002	2,7	Grasas y aceites, DQO	15	2.3 x 10 ⁻⁴	70 % DQO
Andaluz Delgado Jennifer Celia. 2016	12,6	DQO	5	No registra	98.79 % DQO

Fuente: Elaboración propia

3.4 TIEMPO

El tiempo es una variable que influye en el proceso de electrocoagulación debido a que si hay mayor tiempo de reacción mayor va a ser la cantidad de floculos que se forman y que se sedimentan, cualquier pequeño cambio que se le haga a esta variable tendrá gran influencia con respecto a la remoción de los contaminantes. Sin embargo, es muy importante tener en cuenta que a mayor concentración de contaminantes mayor va a ser el tiempo de remoción ya que se necesitará aumentar la liberación de iones e hidrogeno en el agua, y a su vez tardaran más en formar floculos y sedimentos.

Por lo mencionado anteriormente se decide que el tiempo es una variable que influye en el porcentaje de remoción, el valor de esta variable depende del tipo de contaminante a tratar, para este trabajo de grado se tomaron varios tiempos de reacción. Para observar el funcionamiento del sistema experimental se realizó una prueba preliminar de 15 minutos, este tiempo se tomó basado en la bibliografía donde es el tiempo promedio efectivo utilizado en las diversas investigaciones para remover una tasa considerable de contaminantes.

Para la primera experimentación donde se buco determinar el mejor tiempo de reacción con respecto a los antecedentes de investigación de la empresa se tomaron tiempos de reacción de 1 a 6 horas tanto para los electrodos de hierro como para los electrodos de aluminio, estos tiempos se escogieron de acuerdo a los resultados de la prueba preliminar.

Por último se desarrolló una segunda experimentación en la cual se variaron valores de densidad de corriente y tiempos de reacción, basados en bibliografía, (Ver tabla 6), donde se encuentra que para aguas que contienen grasas y aceites, vertimientos con alta carga DQO, y con electrodos de hierro o de aluminio el tiempo suficiente de tratamiento es de 15 minutos, sin embargo es importante analizar un valor mínimo y máximo, por esta razón se eligieron tiempos de reacción de 5 y 30 minutos para tener más datos al momentos de determinar los valores de las variables de este capítulo.

3.5 MATERIAL DEL ELECTRODO

El material del electrodo es de vital importancia en el proceso de electrocoagulación esto se debe a que cada metal tiene características diferentes y estas ayudan a que el proceso sea eficiente o no, los metales más utilizados en el proceso de electrocoagulación son el hierro y aluminio, sin embargo, el material de los electrodos se elige de acuerdo al tipo de sistema utilizado, por esta razón también se utilizan electrodos de cobre, acero o aleaciones de aluminio y magnesio (Ver tabla 9).

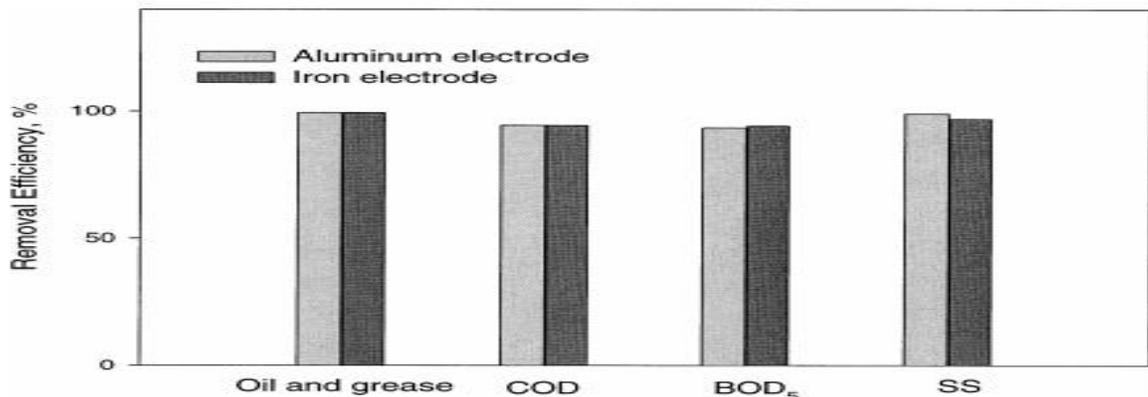
Tabla 9. Características del hierro y aluminio.

Hierro		Aluminio	
Baja resistencia a la corrosión		Alta resistencia a la corrosión	
Conductividad eléctrica	1.53×10^7 s/m	Conductividad eléctrica	3.78×10^7 s/m
Resistividad	8.90×10^{-8} Ω *m	Resistividad	2.82×10^{-8} Ω *m
Costo(COP)	2800 c/u	Costo(COP)	4500 c/u

Fuente: conductividad térmica. Citado el 30 de octubre de 2018. Disponible en: <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbasees/Tables/thrcn.html>

Para la experimentación de este trabajo de grado se comparó la eficiencia de remoción de materia con electrodos de hierro y de aluminio. Según la bibliografía se encontró que estos materiales son los más utilizados para el tratamiento de aguas con alto contenido de DQO, grasas y aceites (Ver tabla 6). En la figura 19 se puede evidenciar que se obtienen porcentajes de remoción sobre el 80% al utilizar los electrodos de hierro y aluminio para la remoción de grasas y aceites, solidos sedimentables, demanda bioquímica oxígeno y demanda química de oxígeno.

Figura 19. Comparación de la eficiencia del electrodo de hierro y del electrodo de aluminio.



Fuente: CHEN, Xueming y CHEN, Guohua. Separation of pollutants from restaurant wastewater by electrocoagulation. ELSEVIER.2002. p 68.

En este punto es importante mencionar que la determinación de la distancia de los electrodos se eligió según (David Ricardo Rubio Herreño, 2012) donde se sugiere que para obtener buenas remociones de DQO y grasas y aceites es con una distancia de 10 mm entre cada electrodos.

4. DESARROLLO DEL SISTEMA EXPERIMENTAL

Para la ejecución apropiada de la experimentación es necesario realizar la metodología donde se incluyan todas las actividades para el antes, durante y después de la experimentación (Ver en la figura 20). La metodología permite obtener resultados confiables y minimiza errores. En este trabajo se eligió realizar dos partes experimentales, la primera busca analizar la eficiencia de remoción de carga contaminante variando los materiales de los electrodos con respecto al tiempo y manteniendo el voltaje constante, la segunda experimentación busca analizar la eficiencia de remoción de carga contaminante variando el voltaje con respecto al tiempo y manteniendo el material del electrodo constante.

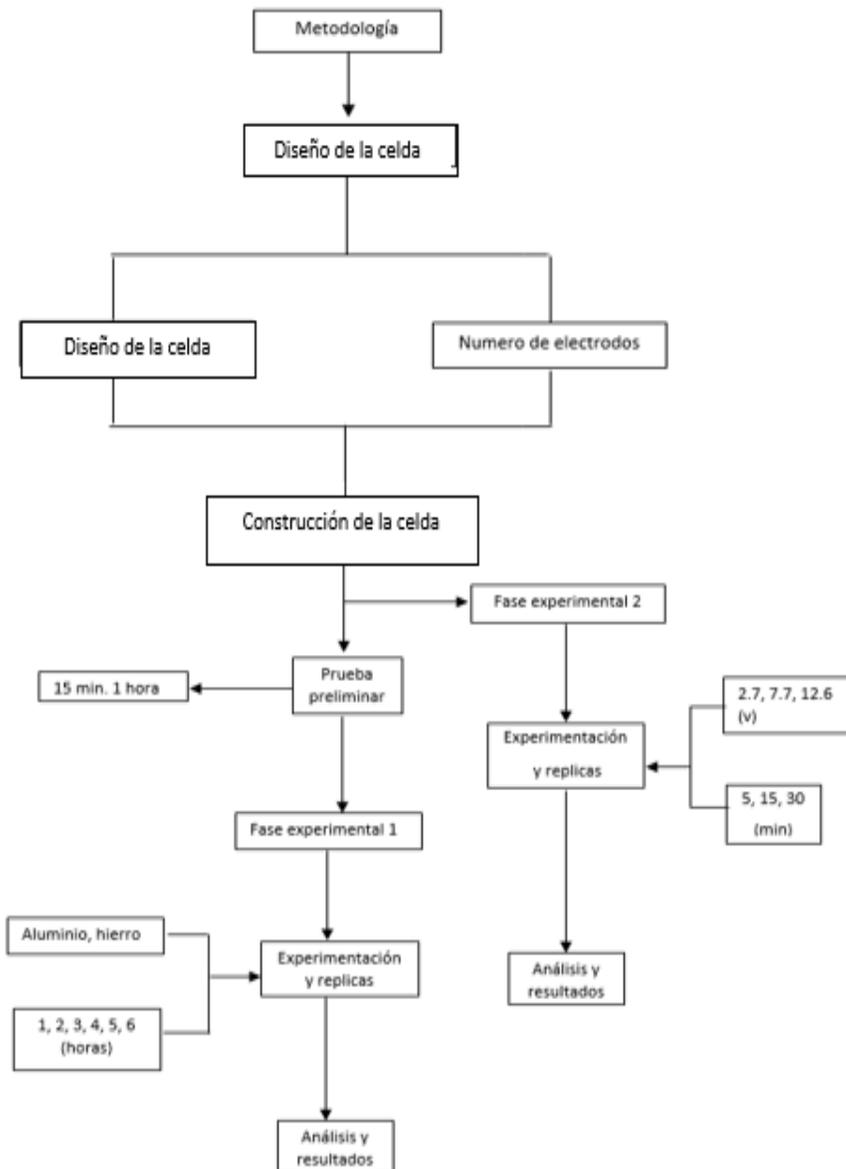
Inicialmente se realizó el diseño de la celda de electrocoagulación teniendo en cuenta las medidas reportadas en la bibliografía para una celda de 1 litro de capacidad, seguidamente se calculó el número de electrodos que son necesarios para el proceso por medio de la ecuación 1, posteriormente se insertaron los electrodos en el la celda. De forma paralela se recolecto 500 ml de agua provenientes de las trampas de grasas en un Beaker de 2000 ml y se vertió en el la celda.

Para que el método de electrocoagulación funcionara se conectaron los electrodos con la fuente de poder por medio de 4 cables en terminación de caimán. Se realizó una prueba preliminar para el tratamiento de esta agua con un voltaje de 2V puesto que en la empresa ya se había realizado un prueba con este voltaje y con un tiempo de 2 horas, sin embargo inicialmente se evaluó el método con 2V y 15 minutos debido a que este es el tiempo optimo reportado en la bibliografía. Dejando el voltaje constante se realizó una segunda prueba preliminar aumentando el tiempo a 1 hora. En seguía se apagó la fuente de poder y se desconectaron los cables, esto con el fin de retirar los electrodos para su posterior limpieza. Seguidamente se insertaron de nuevo los electrodos hierro y se conectaron nuevamente con la fuente de poder para realizar la primera experimentación donde se dejó el voltaje constante y se evaluó la influencia que tiene el material de los electrodos y el tiempo de residencia sobre la cantidad de materia que se remueve, de forma paralela se recolecto 500 ml de agua provenientes de las trampas de grasas al terminar la primera hora se apagó la fuente de poder y se retiraron los electrodos, se dejó 1 hora para que los sólidos se sedimentaran, después de esta hora se filtró el agua y por último se pesó la materia removida, este procedimiento se realizó de igual forma para la hora 2, 3, 4, 5 y 6 y para la experimentación con los electrodos de aluminio.

Finalmente se realizó la segunda experimentación para determinar la influencia que tiene el voltaje y el tiempo de residencia sobre la cantidad de materia removida, primeramente se limpiaron los electrodos con agua destilada, después de la limpieza se insertaron en la celda y se conectaron con la fuente de poder, de

forma paralela se recolecto 500 ml de agua provenientes de las trampas de grasas y se vertió en la celda, se realizó el método de electrocoagulación con un voltaje de 2,7V y 5 minutos al terminar los 5 minutos se apagó la fuente de poder y se retiraron los electrodos, se dejó 30 minutos para la sedimentación de sólidos, después de esta media hora se filtró el agua y por último se pesó la materia removida, este procedimiento se realizó de igual forma para los tiempos de residencia 15 y 30 minutos y para los voltajes de 7,7V y 12,6V.

Figura 20. Metodología del proyecto



Fuente: Elaboración propia

Después de realizar la investigación y revisión de la bibliografía, se identifican cuáles son las variables que influyen y los materiales necesarios para la construcción y ejecución del método. Posteriormente se realiza la construcción de la celda.

4.1 CONSTRUCCIÓN DE LA CELDA DE ELECTROCOAGULACIÓN⁶¹

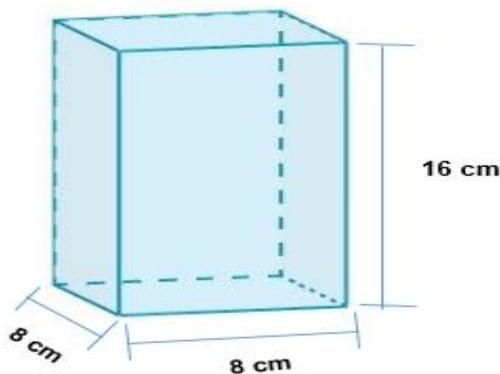
Para la construcción de la celda es importante tener en cuenta los siguientes factores:

4.1.1 Material de la celda⁶². La celda se construyó en vidrio porque este material es de bajo costo, fácil obtención y no interfiere en el proceso de electrocoagulación al ser aislante.

4.1.2 Dimensiones de la celda. Las dimensiones de la celda se seleccionaron teniendo en cuenta una capacidad de 1L, esto con el propósito de dejar un volumen libre que posteriormente se ocupará por la formación de solidos suspendidos.⁶³

Las dimensiones de la celda de electrocoagulación para este trabajo de grado se pueden observar en la figura 21.

Figura 21. Dimensiones de la celda para la experimentación.



Fuente: Elaboración propia

⁶¹ AMAYA CELIS Angie Carolina, NAVAS ESPINOSA Carla Michelle. Evaluación del proceso simultáneo de fotocátalisis heterogénea y electrocoagulación (fcec) para la eliminación de compuestos orgánicos contaminantes en agua residual de la industria litográfica. Trabajo de grado ingeniería química. Bogotá. D.C. Universidad de américa. Facultad de ingeniería. 2012. 34.p

⁶² RUBIO HERREÑO, David Ricardo y SIACHOQUE CABRERA Sandra Carolina. Evaluación de un sistema acoplado de electrocoagulación/fotocátalisis (ec/fc) para la remoción de carga orgánica contaminante en agua residual de la industria litográfica. Trabajo de grado ingeniería química. Bogotá. D.C. Universidad de américa. Facultad de ingeniería. 2012. 65.p

⁶³ RUBIO HERREÑO, David Ricardo y SIACHOQUE CABRERA Sandra Carolina. Evaluación de un sistema acoplado de electrocoagulación/fotocátalisis (ec/fc) para la remoción de carga orgánica contaminante en agua residual de la industria litográfica. Trabajo de grado ingeniería química. Bogotá. D.C. Universidad de américa. Facultad de ingeniería. 2012. 66.p

4.1.3 Material de los electrodos. Los electrodos son de aluminio y hierro con un espesor de 0,15 cm respectivamente. El número de los electrodos que se utilizó para la experimentación se determinó con la ecuación mostrada a continuación.

Ecuación 1. *Número de electrodos*⁶⁴

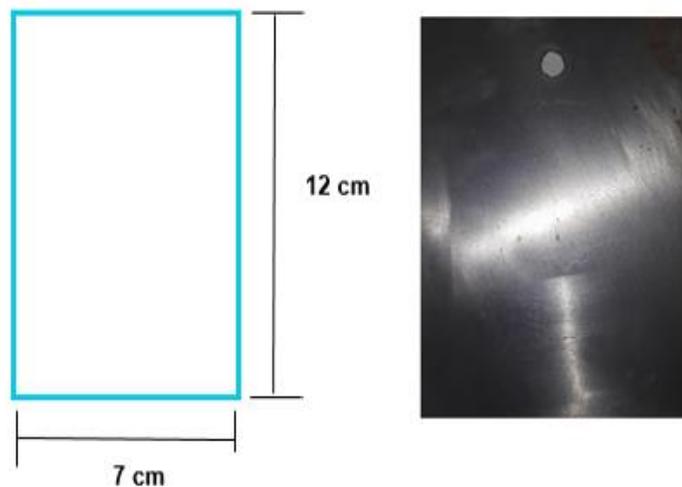
$$\text{Número de electrodos} = \frac{(\text{ancho de celda}) - 2 * (\text{distancia electrodos cara lateral})}{(\text{distancia máxima entre electrodos} + \text{espesor de la placa})}$$

$$\text{Número de electrodos} = \frac{8 \text{ cm} - 2 * (1,2 \text{ cm})}{1 \text{ cm} + 0,4 \text{ cm}} = 4$$

4.1.4 Dimensiones de los electrodos. Las dimensiones tanto para los electrodos de hierro y aluminio se seleccionaron teniendo en cuenta las dimensiones de la celda para que los electrodos se ajusten en la celda y sea fácil retirarlos para su posterior limpieza.

Las dimensiones de los electrodos de hierro y aluminio para la experimentación se pueden observar en la figura 22 y en la figura 23.

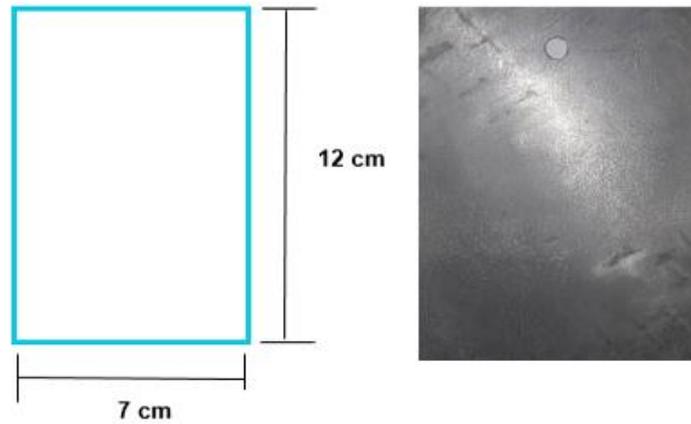
Figura 22. Dimensiones de longitud y ancho de los electrodos de hierro para el sistema experimental



Fuente: Elaboración propia

⁶⁴ ARANGO RUIZ Álvaro y GARCES GIRALDO Luis Fernando. Diseño de una celda de electrocoagulación para el tratamiento de aguas residuales de la industria láctea. 2007. p. 64

Figura 23. Dimensiones de longitud y ancho de los electrodos de aluminio para el sistema experimental



Fuente : Elaboración propia

4.1.5 Fuente de poder. Se empleó una fuente de poder marca J.R.C ELECTRONICS, la cual se puede operar con un voltaje de 0 a 38 V en corriente directa y 2 amperios, la fuente de poder proporciona la corriente necesaria para realizar el tratamiento de electrocoagulación, esta cuenta con una perilla para ajustar el voltaje proporcionando una corriente directa al sistema. (Ver figura 24)

Figura 24. Fuente de poder

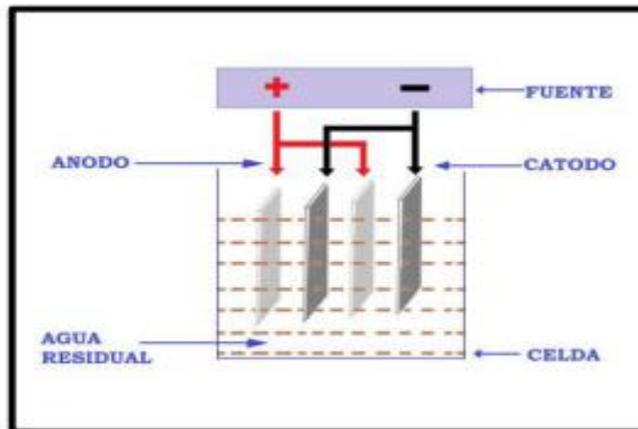


Fuente: Elaboración propia

4.2 CONSTRUCCIÓN DEL SISTEMA DE ELECTROCOAGULACIÓN

Se construyó una celda con un arreglo monopolar en paralelo, en este arreglo la corriente eléctrica se reparte entre todos los electrodos como se muestra en la figura 25

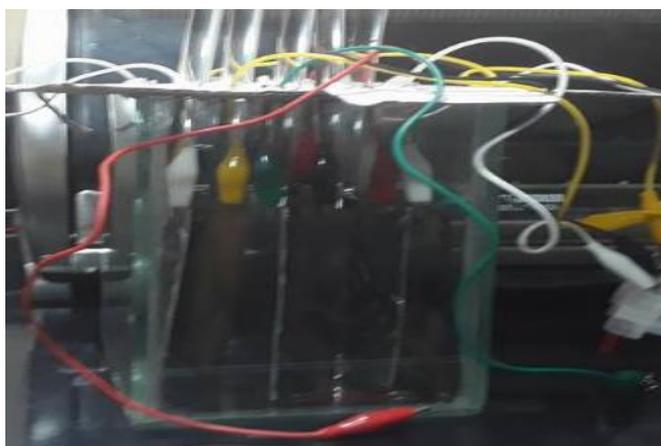
Figura 25. Arreglo monopolar en paralelo



Fuente: MOLLAH M. Yousuf A, SCHENNACH Robert, PARGA José R. y COCKE David L. Electrocoagulation (EC) science and applications Journal of Hazardous Materials .2000. p. 32

En la figura 26 se puede observar el montaje del sistema de electrocoagulación para todos los ensayos realizados en este trabajo de grado, los electrodos se conectaron con la fuente de poder por medio de cables con terminación en caimán.

Figura 26. Montaje experimental para el proceso de electrocoagulación



Fuente: Elaboración propia

4.3 PRUEBA PRELIMINAR

En la bibliografía mostrada anteriormente (Ver tabla 6) se puede concluir que el tiempo adecuado para el proceso de electrocoagulación de las distintas industrias es 15 min, por tal razón se realizó una prueba visual para observar si sucedía algún cambio de color gracias al tratamiento aplicado y de esta manera determinar si para los vertimientos de PMP es adecuado un tiempo de reacción de 15 min. Cabe resaltar que los vertimientos generados en la empresa tienen valores más altos que los encontrados en la bibliografía, estos valores se pueden observar en la tabla 10 donde se muestran la diferencia entre algunos parámetros reportados en diferentes industrias y los que genera PMP.

Tabla 10. Porcentaje de superación de los parámetros de PMP respecto a la industria

Industria	Valor reportado		Porcentaje de superación de los parámetros de PMP respecto a la industria
Alimentos (gelatina)	DQO	3104 mg/L O ₂	96.36 %
	Grasas y aceites	1195 mg/L	5.46%
Alimentos (lácteos)	DQO	6306 mg/L O ₂	92.61%
	Grasas y aceites	782 mg/L	38.14%
Alimentos (yogurt)	DQO	1044 mg /L O ₂	98.78%
	DBO ₅	420	96.59%
		mg /L O ₂	

Fuente: Elaboración propia

Inicialmente se tomó una muestra de 1 litro de agua proveniente de las trampas de grasas, se vertió en la celda que cuenta con 4 electrodos de hierro, 2 cargados positivamente y 2 cargados negativamente, los electrodos se conectaron con la fuente de poder (por medio de cables con caimanes para electrónica). Se realizó el proceso de electrocoagulación con un tiempo de residencia de 15 min, 2V y 2A.

Se realizó el mismo procedimiento para los electrodos de aluminio, Se utilizó 4 electrodos, 2 cargados positivamente y 1 cargados negativamente. Al transcurrir los 15 minutos se evidencia que hay reacción, pero el tiempo de esta no es el suficiente, se observó poca generación de espuma y no hay cambio de color. (Ver imagen 27) Lo mencionado anteriormente indica que es necesario aumentar el tiempo de reacción para que se remueva los contaminantes del agua, por esta razón se realiza el proceso con un tiempo de residencia de 1 hora, 2V y 2A.

Figura 27. Proceso de electrocoagulación a 15 min



Fuente: Elaboración propia

Al transcurrir 1 hora de proceso se evidencia formación de espuma, hay un cambio de color notable (Ver figura 28), sin embargo, el agua continua con un color oscuro lo que indica que para obtener mejores resultados es necesario realizar la experimentación con tiempo mayores a este.

Figura 28. Proceso de electrocoagulación a 1 hora



Elaboración propia

Fuente:

4.4 EXPERIMENTACIÓN 1

Diseño de experimentos

El diseño de experimentos es un método estadístico que permite identificar los efectos de una experimentación, en cada ensayo y replica se investiguen todas las combinaciones posibles de los factores y niveles permitiendo identificar qué factores tienen influencia en la variable respuesta de la experimentación.

Para la primera experimentación de este proyecto se escogió un diseño de experimentos factorial $A \times B$ ⁶⁵ donde A es el número de niveles de un factor y B es el número de niveles del otro factor. Este diseño de experimentos se utiliza cuando el número de niveles de los factores no son iguales, por esta razón no se puede utilizar un diseño factorial N^K . Para esta experimentación se tiene como factores el material del electrodo y tiempo de residencia y el número de niveles es 2 y 6 respectivamente. Los factores y los valores de los niveles de la primera experimentación se pueden observar en la tabla 11. Se escogió que los niveles para el factor 1 (material del electrodo) son hierro y aluminio debido a que en el capítulo anterior se evidencia que estos materiales son los más usados en el proceso de electrocoagulación gracias a sus propiedades oxidativas, para el factor 2 (tiempo de residencia) se eligió que los niveles son 1, 2, 3, 4, 5, 6 horas puesto que al realizar la prueba preliminar se obtuvo formación de floculos y sedimentos a partir de la primera hora, esto se debe porque la carga contaminante de la empresa PMP es más alta que la reportada en la bibliografía, al utilizar densidades

⁶⁵ Psikipedia. Diseño factorial. . [en línea] citado el 27 de octubre de 2018. Disponible en: <https://psikipedia.com/libro/39-libro/fundamentos-de-investigacion-en-psicologia/1533-diseno-factorial>

de corriente bajas es necesario más tiempo de residencia para la remoción de contaminante, de igual forma el porcentaje remoción de color aumenta con el incremento de la densidad de corriente, la disminución de pH y aumento del tiempo de tratamiento.⁶⁶

Tabla 11. *Factores y niveles experimentación 1*

Factor	Nivel
Material del electrodo	Hierro Aluminio
	1
	2
	3
Tiempo de residencia (horas)	4
	5
	6

Fuente: Elaboración propia

Para hallar el número de tratamientos de la primera experimentación se utiliza la ecuación 2.

Ecuación 2. *Número total de tratamientos*

$$n(a * b) = \text{Número total de tratamientos}^{67}$$

Donde:

a= número de niveles del primer factor

b= número de niveles del segundo factor

n= número de repeticiones

Según la ecuación 2 se obtiene el número total de tratamientos para este diseño de experimentos. Teniendo en cuenta que para el primer factor son 2 niveles y para el segundo factor evaluado son 6 niveles.

$$(2 \times 6) * 2 = 24$$

⁶⁶ ARANGO RUIZ Álvaro. Uso de electrocoagulación para la remoción de tartrazina en soluciones acuosas. Producción más limpia. Diciembre.2011.Vol 6.

⁶⁷ Diseños factoriales. [en línea] citado el 9 de marzo de 2018. Disponible en: https://issuu.com/claudiasantiesteban12/docs/cap__tulo_5_dise__os_factoriales_2_.

La configuración de ensayos de cada experimento se muestra en la tabla número 12.

Tabla 12. *Configuración de ensayos experimentación 1*

Número de experimento	Variable / tiempo (horas)	Variable / material del electrodo
1	1	Hierro
2	2	Hierro
3	3	Hierro
4	4	Hierro
5	5	Hierro
6	6	Hierro
7	1	Aluminio
8	2	Aluminio
9	3	Aluminio
10	4	Aluminio
11	5	Aluminio
12	6	Aluminio

Fuente: Elaboración propia

4.4.1 Resultados. Para obtener los resultados de la primera experimentación se filtró el agua después de 1, 2, 3, 4, 5, 6 horas de sedimentación con el fin de cuantificar la cantidad de solidos suspendidos y sedimentables que se obtuvieron en el proceso de electrocoagulación. En la figura 29 se puede observar el cambio de color después del proceso de electrocoagulación después de 1, 2, 3, 4, 5, 6 horas.

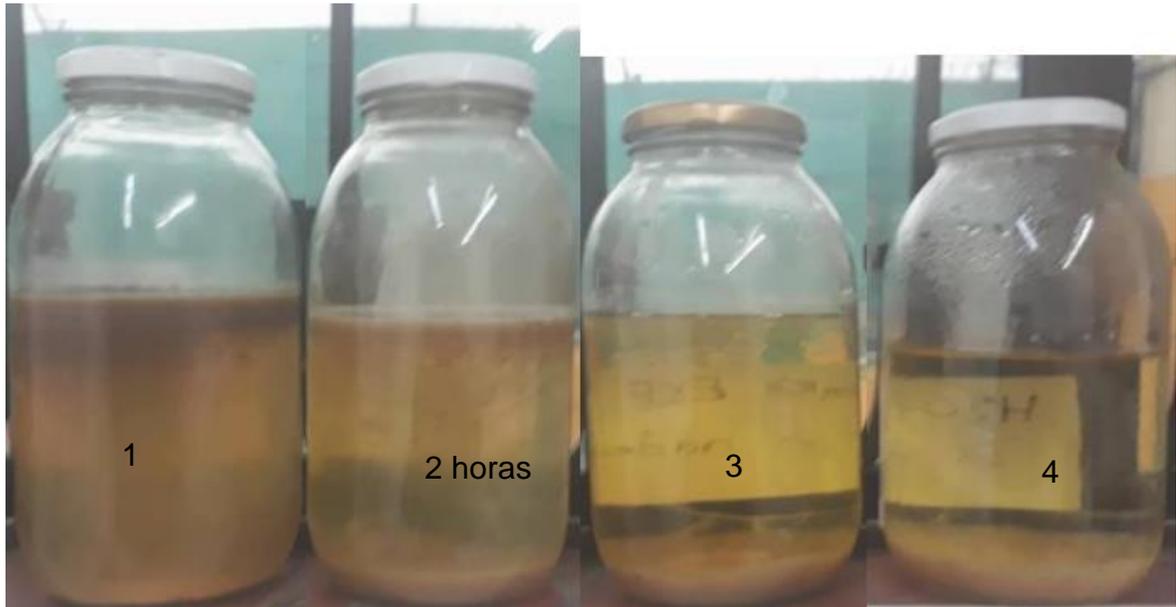
Los resultados para la experimentación con los electrodos de hierro se pueden observar en la tabla 13.

Tabla 13. *Resultados experimentación con electrodos de hierro*

Numero de experimentación	Tiempo de EC (horas)	Materia removida (gramos)	Materia removida replica (gramos)
1	1	16,4	16,7
2	2	41,5	44,1
3	3	54,9	54,8
4	4	70,4	71,4
5	5	78,6	75,6
6	6	75,7	76,4

Fuente: Elaboración propia

Figura 29. Agua tratada por EC durante 1, 2, 3 y 4 horas



Fuente: Elaboración propia

Los resultados para la experimentación con los electrodos de aluminio se pueden observar en la tabla 14.

Tabla 14. Resultados experimentación con electrodos de aluminio

Numero de experimentación	Tiempo de EC (horas)	Materia removida (gramos)	Materia removida replica (gramos)
1	1	14,5	14,2
2	2	40,9	39,3
3	3	11,6	49,1
4	4	69,3	73,5
5	5	76,3	75,8
6	6	80,1	77,4

Fuente:

Elaboración

propia

4.4.2 Análisis de resultados experimentación 1. Para determinar si el proceso de electrocoagulación fue eficiente para la remoción de materia y disminución de los parámetros fisicoquímicos, la empresa facilitó el uso de sus instalaciones para la realización de la experimentación y el análisis de estos. Sin embargo, el laboratorio de la empresa no contaba con la instrumentación requerida para análisis del agua. Como se habló en el segundo capítulo PMP se especializa en la elaboración de aceites, por esta razón el laboratorio de la empresa cuenta con los reactivos e instrumentos para el análisis y control de calidad de estos. Por tal motivo se realizó un análisis físico donde se determinó la masa de sólidos

sedimentables y suspendidos generados y la clarificación visual del agua, esto con el fin de establecer si el método propuesto era factible y en caso de ser así obtener las mejores condiciones de operación. Los análisis fisicoquímicos se realizaron de acuerdo con los parámetros que exige la norma 631 del 2015 para los vertimientos de industrias relacionadas con aceites y grasas, al no contar con la instrumentación para realizarlas dentro de la empresa, se recurrió a un laboratorio externo.

Es importante mencionar que estos análisis se hicieron al mejor resultado entre tiempo de reacción y material del electrodo.

Análisis de varianza (ANOVA)

Tabla 15. *Análisis de varianza (ANOVA) experimentación 1*

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados libertad	Cuadrado medio	F ₀	F
Tipo de material	123,76	1	123,76	2,046	4,74
Tiempo	12499,25	5	2499,85	41,34	3,10
Interacción	497,26	5	99,45	1,64	3,10
Error	725,71	12	60,47	-	-
Total	13845,98	23	-	-	-

Fuente: Elaboración propia

Para realizar el análisis del diseño de experimentos es necesario realizar un análisis de varianza ANOVA donde la variable respuesta es la remoción de materia. La hipótesis nula (H_0) de esta experimentación es igual a que los factores (material del electrodo y tiempo de residencia) no influyen en la variable respuesta y la hipótesis alterna H_1 , que los factores si influyen en la variable respuesta.

Realizando el análisis de varianza se puede identificar que a un nivel de significancia de 0,05 ($\alpha=0,05$) el valor de F encontrado en las tablas distribución Fisher- Snedecor para el tiempo de residencia es igual a 3,10 y el valor de F_0 experimental es igual a 41,34, esto quiere decir que el valor de F experimental es mayor que el valor de F obtenido por medio de las tablas, lo que indica que se rechaza la hipótesis nula (H_0) mostrando así que el tiempo de residencia es un factor que influye en la variable respuesta demostrando que a mayor tiempo mayor es la cantidad de floculos que se obtiene debido a que se favorece tanto los procesos de electrodos como la floculación y precipitación de los sólidos. Se producen más gases, que al ascender, llevan las partículas de óxido a la superficie en forma de espuma y a su vez promueve el crecimiento de los floculos y su

posterior precipitación. Un pequeño cambio del tiempo representa una gran influencia en la cantidad de sólidos obtenidos.⁶⁸

Al comparar la F_0 experimental (2,046) obtenida para el material de los electrodos con la F obtenida en las tablas (4,74) se puede evidenciar que la F_0 experimental es mejor que la F obtenida en las tablas, lo anteriormente mencionado indica que la H_0 no se rechaza, esto quiere decir que el material del electrodo no influye en la variable respuesta puesto que se obtuvo resultados entre 75 y 76 gramos removidos de materia. Tanto el hierro como el aluminio son los metales más usados en el proceso de electrocoagulación debido a que se caracterizan por su capacidad catalítica, conductividad y estabilidad química y física, cuando se aplica electrodos de Al o Fe la remoción para material suspendido es debido a la desestabilización de los coloides para que se aglutinen y se separen, mientras para los disueltos el coagulante los adsorbe o los retiene.⁶⁹ Visualmente se puede evidenciar un cambio de color, este es notorio durante las primeras 3 horas, después de la cuarta hora se evidencia un mínimo cambio de color, pero este no es significativo. (Ver figura 29). Los colores verde y amarillo se deben a la presencia de los iones Fe (II) y Fe (III). Fe (II) es el ion común generado *in situ* de la electrólisis del hierro, tiene una solubilidad relativamente alta en condiciones ácidas o neutras y se puede oxidar fácilmente a Fe (III) por el oxígeno disuelto en agua⁷⁰ Igualmente, el ion Fe (III) también se encuentra en partículas finas amarillas de Fe (OH)₃, lo cual dificulta su proceso de estabilización, incrementando así el proceso de corrosión en los electrodos.⁷¹

Electrodos de hierro.

En la gráfica 1 se puede evidenciar el comportamiento de los electrodos de hierro con base a la formación de sólidos suspendidos y sólidos sedimentables (materia removida) respecto al tiempo.

Después de la cuarta hora se logra apreciar que no hay un aumento significativo en la formación de sólidos porque se generó solo 6,2 g más de materia removida en la quinta hora y 5,15 g de materia removida en la sexta hora (los porcentajes de aumento para estas horas son 8.04% y 6.77%) esto se debe a que los electrodos de hierro ya están desgastados y la oxidación no es tan eficiente en comparación a las primeras horas del proceso, este desgaste es gracias a que los iones

⁶⁸ FRANCO COGOLLO Javier Ernesto, CÁRCAMO MEZA José Daniel. Evaluación de la eficiencia de un reactor de electrocoagulación a escala piloto para la remoción de algunos parámetros fisicoquímicos y microbiológicos presentes en las aguas residuales. Trabajo de grado de ingeniería ambiental. Ocaña. Universidad Francisco DE Paula Santander Ocaña. Facultad de ciencias agrarias y del ambiente.2017.37.p

⁶⁹ CAMBO CHILLO Nelson Álvaro. Diseño de un electrocoagulador para aguas industriales clarificadas de la empresa plusambiente base cantón joya de los sachas, provincia de Orellana. Trabajo de grado ingeniería química. Riobamba. escuela superior politécnica de Chimborazo. Facultad de ciencias.2017.15. p.

⁷⁰ CHEN, Guohua. Electrochemical technologies in wastewater treatment. In: Separation and Purification Technology. Vol. 38, No. 1 (jul. 2004); p. 67.

⁷¹ ARBOLEDA CAMACHO, Juan Manuel y HERRERA LÓPEZ Paula Julieth. Evaluación de un proceso de electrocoagulación en un reactor tipo batch para la remoción de cromo hexavalente (Cr⁶⁺) con electrodos de aluminio – aluminio y de hierro – aluminio en condiciones de laboratorio. Trabajo de grado ingeniería ambiental. Bogotá. D.C. Universidad Santo Tomas. Facultad de ingeniería ambiental. 2015. 81.p

metálicos se liberan y dispersan en el medio líquido por lo que tienden a formar óxidos metálicos que atraen eléctricamente a los contaminantes que han sido desestabilizados.⁷²

Al analizar los resultados obtenidos en el artículo de investigación diseño de una celda de electrocoagulación para el tratamiento de aguas residuales de la industria láctea (Arango Ruiz & Garcés Giraldo, 2007) se obtienen mejores remociones manteniendo electrodo de sacrificio de hierro (electrodo que se desgasta) esto se debe porque cuando se emplean electrodos de hierro como ánodos, luego de la oxidación en el sistema electrolítico, se produce hidróxido de hierro (Fe (OH)_n, donde n puede ser 2 o 3.⁷³ El hidróxido metálico insoluble de hierro puede remover los sólidos o contaminantes por la formación de complejos en la superficie o atracción electrostática.⁷⁴ Para este trabajo de grado se obtuvieron resultados acordes con los mencionados anteriormente puesto que hay una generación progresiva de los sólidos que se forman gracias a la unión de los iones de Fe con el agua y el oxígeno presente.

Tiempo de residencia

El tiempo de electrólisis influye en la eficiencia del proceso de electrocoagulación. Este tiempo presenta una relación directamente proporcional con la producción de iones hierro, producidos por el desgaste que experimentan los electrodos utilizados en el proceso⁷⁵, es decir a mayor tiempo mayor va a ser la producción de iones generando así la desestabilización de las moléculas contaminantes. En la gráfica 1 se puede observar la cantidad de materia removida.

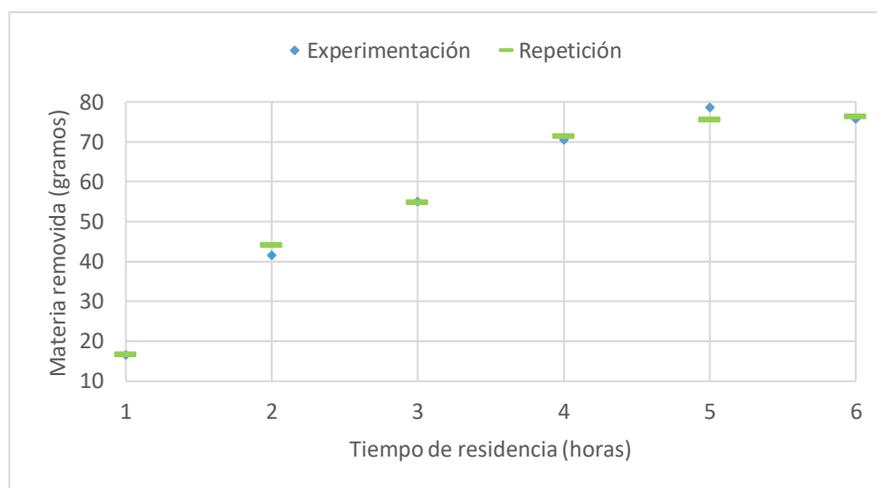
⁷² RESTREPO MEJÍA Ana Patricia, ARANGO RUIZ Álvaro, GARCÉS GIRALDO Luis Fernando. La electrocoagulación: retos y oportunidades para el tratamiento de aguas. Electrocoagulación. Medellín, 2006. p. 72

⁷³ ARMAIGNAC, Elaine Ojeda y HING CORTÓN, Romelia. Estudio del proceso de electrocoagulación de la vinaza empleando electrodos de hierro. Santiago de cuba. 2010.25.p

⁷⁴ *Ibid.*26

⁷⁵ ARMAIGNAC, Elaine Ojeda y HING CORTÓN, Romelia. Estudio del proceso de electrocoagulación de la vinaza empleando electrodos de hierro. Santiago de cuba. 2010. P.25.

Gráfica 4. Influencia en la generación de sólidos suspendidos y sedimentables utilizando electrodos de hierro



Fuente: Elaboración propia

Según el análisis de la gráfica 1 se puede evidenciar que se obtuvieron buenos resultados en cuanto a la remoción de materia utilizando electrodos de hierro, se puede identificar que al aumentar el tiempo de residencia mayor va ser la cantidad de sólidos que se van a generar, sin embargo al realizar la comparación con los resultados obtenidos en el artículo de investigación electrocoagulación de aguas residuales (G, 2002) donde se utilizó un voltaje de 2,7V en un tiempo de residencia de 15 minutos removiendo un 70%, se puede reflejar que el tiempo de residencia utilizado para este trabajo de grado es demasiado alto, esto se debe a que

los valores de los parámetros fisicoquímicos utilizados en el artículo investigación electrocoagulación de aguas residuales (G, 2002) son muchos más bajos(DQO 3104 mg/l O₂, grasas y aceites 1195 mg/l) a los generados por PMP (DQO 85229 grasas y aceites 1264 mg/l , al ser estos valores altos es necesario o utilizar un mayor tiempo de residencia o aumentar el voltaje.

Electrodos de aluminio.

Analizando la gráfica 2 se puede evidenciar que los sólidos generados en el proceso incrementan al transcurrir el tiempo de residencia, el aluminio de igual forma que el hierro después de la cuarta hora muestra una tendencia constante sin un cambio significativo de color ni un aumento considerable en la formación de sólidos se generó 4,65g mas de materia removida en la quinta hora y 7,35 g más de materia removida en la sexta hora (los porcentajes de aumento en para estas horas son 6.11% y 9.33%) esto se debe a que el aluminio está oxidado pero la capa de este material es de color transparente. Por esta razón es necesario

remover esta capa y lavar con agua destilada después de cada ensayo y obtener resultados confiables.

El aluminio solo tiene un estado de oxidación +3, y por lo tanto solo se da una reacción formando el coagulante $\text{Al}(\text{OH})_3$ que a un pH neutro se torna insoluble en el agua lo que hace que se precipiten las partículas más pesadas y floten las particular más livianas debido a que son arrastradas por los gases electrolíticos⁷⁶

Los sodios generados utilizando electrodos de aluminio se deben a la neutralización de las cargas de partículas coloidales negativas por los cationes, producto de la hidrólisis y posteriormente se produce la incorporación de impurezas en el precipitado de hidróxido amorfo ($\text{Al}(\text{OH})_3$).⁷⁷

Tiempo de residencia

El tiempo de electrólisis también influye en la eficiencia del tratamiento del proceso de electrocoagulación cuando se utiliza electrodos de aluminio. Este tiempo, determina la velocidad de producción de iones Al^{3+} de los electrodos.⁷⁸

En la gráfica 2 se puede evidenciar el incremento de materia removida al aumentar el tiempo, este aumento es lineal debido a que hay un creciente al transcurrir el tiempo. La eficiencia de la remoción de sólidos depende directamente de la concentración de hidróxido y de los iones metálicos producidos por los electrodos. Por tanto, un aumento del tiempo, promueve el crecimiento de los floculos y su posterior precipitación, y a la vez incrementa la producción de gases, que al ascender, llevan las partículas sólidas a la superficie formando la espuma.⁷⁹

Comparando los resultados obtenidos en este trabajó de grado con los presentados en el trabajo de grado electrocoagulación para reúso de aguas residuales del proceso de impresión en la industria papelera (Monsalve Osorio & Cardona Gómez, 2014) se puede evidenciar que el uso de electrodos de aluminio favorece la formación de sólidos suspendidos y sólidos sedimentables para los dos trabajos de grado. Sin embargo los tiempos utilizados en este trabajo de grado son superiores, esto se debe a que el tiempo de residencia influye junto con el voltaje en la formación de los sólidos, al utilizar un voltaje de 2V para una carga contaminante alta es necesario aumentar el tiempo de residencia para obtener resultados favorables.

⁷⁶ MONSALVE OSORIO John Alejandro, CARDONA GÓMEZ Sebastián. Electrocoagulación para reúso de aguas residuales del proceso de impresión en la industria papelera. Trabajo de grado ingeniera química. Universidad Pontificia Bolivariana. FACULTAD DE INGENIERIA QUÍMICA. 2014.68.p

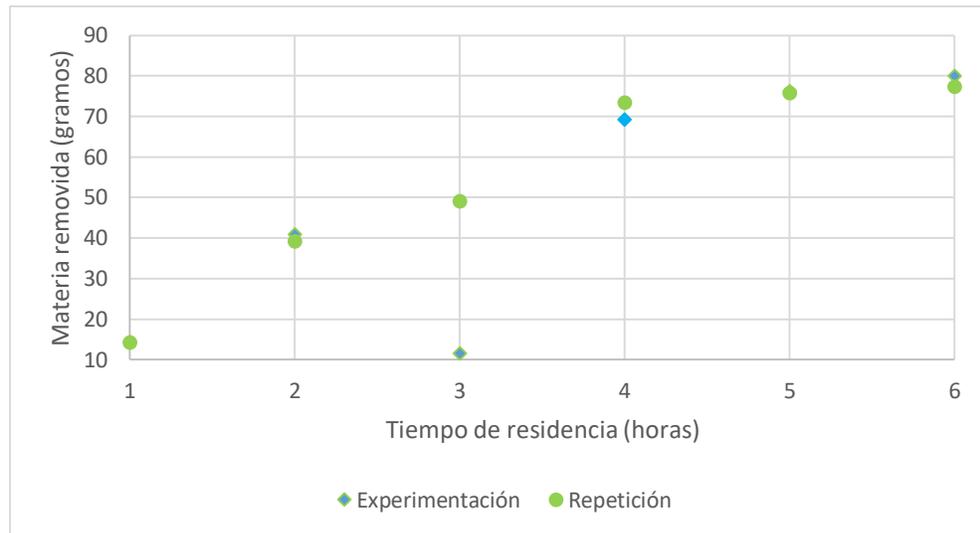
⁷⁷ ARMAIGNAC, Elaine Ojeda y HING CORTÓN, Romelia. Estudio del proceso de electrocoagulación de la vinaza empleando electrodos de aluminio. Santiago de cuba. 2010. P.25

⁷⁸ ARMAIGNAC, Elaine Ojeda y HING CORTÓN, Romelia. Estudio del proceso de electrocoagulación de la vinaza empleando electrodos de aluminio. Santiago de cuba. 2010. P.25

⁷⁹ ARMAIGNAC, Elaine Ojeda y HING CORTÓN, Romelia. Estudio del proceso de electrocoagulación de la vinaza empleando electrodos de aluminio. Santiago de cuba. 2010. p.12

El tiempo adecuado es de 4 horas, se puede evidenciar que en este tiempo la remoción de materia es alta (69,3 g y 73,5 g) y permite la reducción de costos del proceso de electrocoagulación.

Gráfica 5. Influencia en la generación de solidos suspendidos y sedimentables utilizando electrodos de aluminio



Fuente: Elaboración propia

En la gráfica 2 se observa que al transcurrir la tercera hora en la experimentación del aluminio genera menos solidos que en la primera y segunda hora, las causas probables de esta disminución pueden ser:

Es posible que, a la hora de tomar la muestra, en la planta hayan bajado la carga de aceite (12 toneladas) que se trabajaba en ese momento en el desodorizador para enviarlo al enfriador, lo que pudo generar que la corriente de vapor que arrastra los ácidos grasos y demás componentes volátiles presentes en el aceite no arrastrara más contaminantes de los que de por sí ya lleva, esto al quedar vacío el desodorizador, como el vapor de agua va saturado de contaminantes, parte del exceso de estos compuestos se pegan a las tuberías y a las paredes de las torres de enfriamiento causando disminuciones en la transferencia de calor a través de la tubería y disminución en la carga contaminante del agua, sin embargo este proceso de desocupar el desodorizador para ingresar otra carga no tarda más de dos horas, tiempo muy corto para explicar la sorpresiva baja generación de sólidos en las trampas de grasa en la experimentación de tres horas, por experiencia de los operarios los efectos de las aglomeraciones de los contaminantes a las tuberías solo son apreciables después de tiempos mayores a ocho meses hasta un año, esto se debe a la baja precipitación del vapor como agua, en ese promedio de tiempo la cantidad de cargas en el desodorizador es mayor a 200, lo que disminuye la probabilidad de que un solo cambio, genere esa fluctuación.

De manera similar pudo ocurrir un apagón de energía, que reiniciara los equipos, tanto la fuente de poder durante la reacción, como posiblemente las bombas en el proceso de producción, lo que causaría que el agua quedara estancada en las piscinas y que al tomar la muestra ya había sedimentado todos los sólidos. Por lo general, los apagones de luz no duran más de 5 minutos, tiempo muy corto para que los sólidos se sedimenten en su mayoría.

La última posibilidad es que alguien haya manipulado la experimentación o que al momento de conectar la fuente de poder con los electrodos no se hiciera de la manera correcta ocasionando un mal contacto, afectando la reacción al unir algunos de los electrodos o al desconectar las conexiones de estos a la fuente de poder, esta posibilidad es la que más se ajusta a los resultados, ya que una conexión mal hecha afectaría en gran medida la reacción de los electrodos con el agua.

Por esta razón se realizó la repetición del ensayo para la tercera hora donde se pudo obtener un valor acorde con los resultados obtenidos anteriormente, la repetición del ensayo permite identificar un error experimental y de esta manera se puede incrementar la precisión por medio de la reducción de los errores⁸⁰.

Al comparar los resultados de los diferentes ensayos realizados y en sus respectivas replicas se evidencia que ambos electrodos (hierro y aluminio) son eficientes para la formación de solidos suspendidos y sedimentables (materia removida) porque para ambos casos se obtuvo más del 80% de materia removida. Según Chen la eficacia del tratamiento para estos dos tipos de electrodos bajo la misma carga y con una concentración inicial de grasas y aceites de hasta 1500 mg/l es igualmente efectivo, obteniendo más del 90% de remoción, lo que concuerda con los resultados obtenidos en este trabajo de grado.

Análisis fisicoquímicos

Se contrató a un laboratorio externo para determinar los parámetros exigidos por la norma para los vertimientos, se utilizaron los resultados de los análisis mostrados anteriormente para elegir la mejor experimentación en términos de material removido y tiempo, dando como mejor resultado la muestra de 4 horas tanto para aluminio como para hierro.

Los resultados obtenidos utilizando electrodos de hierro se encuentran en la siguiente tabla:

⁸⁰Diseño experimental. Replicas experimentales. [en línea] citado el 30 de octubre del 2018. Disponible en: <http://www.ensayostube.com/familia/diverso/Disentildeo-experimental-iques57.php>

Tabla 16. Caracterización del agua tratada utilizando electrodos de hierro

	Caracterización del agua sin tratar	Caracterización del agua después de tratar	Parámetros elaboración de aceites y grasas de origen animal y vegetal ⁸¹ resolución 631 del 2015	Unidades
Reporte de resultados			-	-
Fecha	2017-09-26	2018-04-17	-	-
Examen solicitado	Caracterización de aguas (físicoquímico)	Caracterización de aguas (físicoquímico)	-	-
Muestreo por	Laboratorio	Empresa	-	-
Tamaño muestra	4500 ml	2750 ml	-	-
Tipo de envase	Plástico	Plástico, Vidrio, Ambar	-	-
Temperatura	10.1 °C	-	-	-
Método	S.M. 22st edition 5210 B, 522D C, 522D B, 254D D Y Gravimetría	S.M. 5210 B, S.M. 5220 C, SM 22nd Edition 5520 B, SM 22nd Edition 2540 F, SM 22nd Edition 2540 D	-	-
DBO5	12308	2052	300	mg/l O ₂
Solidos suspendidos totales (SST)	17814	1087	300	mg/l
DQO	85229	3279	550	mg/l O ₂
Grasas y aceites	1264	66	40	mg/l
Solidos totales	24007	133,3	2	mg/l

Fuente: Elaboración propia

Porcentaje removido de DQO utilizando electrodos de hierro.

El cálculo de DQO se realiza por medio de la siguiente formula:

Ecuación 3. *Porcentaje de DQO removido*

$$\%DQO = \frac{DQO_i - DQO_f}{DQO_i} \times 100$$

$$\%DQO = \frac{85229 - 3279}{85229} \times 100$$

⁸¹ COLOMBIA CONGRESO DE LA REPUBLICA. Resolución 631 del 2015. (18, abril, 2015). Por la cual se establecen los parámetros y los valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales a cuerpos de aguas superficiales y a los sistemas de alcantarillado público y se dictan otras disposiciones. Bogotá D.C.

$$DQO = 96.15\%$$

Porcentaje removido de DBO5 utilizando electrodos de hierro.

Ecuación 4. *Porcentaje de DBO5 removido*

$$\%DBO5 = \frac{DBO5_i - DBO5_f}{DBO5_i} \times 100$$

$$\%DBO5 = \frac{12308 - 2052}{12308} \times 100$$

$$DBO5 = 83.32\%$$

Porcentaje removido de solidos suspendidos (SST) utilizando electrodos de hierro.

Ecuación 5. *Porcentaje de solidos suspendidos totales*

$$\%Solidos\ suspendidos\ totales = \frac{SST_i - SST_f}{SST_i} \times 100$$

$$\%SST = \frac{17814 - 1087}{17814} \times 100$$

$$SST = 93.89\%$$

Porcentaje removido de solidos sedimentables totales utilizando electrodos de hierro (SSED).

Ecuación 6. *Porcentaje solidos sedimentables totales removido*

$$\%Solidos\ sedimentables\ totales = \frac{SSED_i - SSED_f}{SSED_i} \times 100$$

$$\%SSED = \frac{24007 - 133.3}{24007} \times 100$$

$$SSED = 99.44\%$$

Porcentaje removido de grasas y aceites utilizando electrodos de hierro.

Ecuación 7. *Porcentaje de grasas y aceites removido*

$$\%grasas\ y\ aceites = \frac{grasas\ y\ aceites_i - grasas\ y\ aceites_f}{grasas\ y\ aceites_i} \times 100$$

$$\%grasas\ y\ aceites = \frac{1264 - 66}{1264} \times 100$$

$$\%grasas\ y\ aceites = 94.77\%$$

Tabla 17. Caracterización del agua utilizando electrodos de aluminio.

	Caracterización del agua sin tratar	Caracterización del agua después de tratar	Parámetros elaboración de aceites y grasas de origen animal y vegetal ⁸² resolución 631 del 2015	Unidades
Reporte de resultados			-	-
Fecha	2017-09-26	2018-04-17	-	-
Examen solicitado	Caracterización de aguas (fisicoquímico)	Caracterización de aguas (fisicoquímico)	-	-
Muestreo por	Laboratorio	Empresa	-	-
Tamaño muestra	4500 ml	2750 ml	-	-
Tipo de envase	Plástico	Plástico, Vidrio, Ambar	-	-
Temperatura	10.1 °C	-	-	-
Método	S.M. 22st edition 5210 B, 522D C, 522D B, 254D D Y Gravimetría	S.M. 5210 B, S.M. 5220 C, SM 22nd Edition 5520 B, SM 22nd Edition 2540 F, SM 22nd Edition 2540 D	-	-
DBO5	12308	2559	300	mg/l O ₂
Solidos suspendidos totales (SST)	17814	1219	300	mg/l
DQO	85229	3583	550	mg/l O ₂
Grasas y aceites	1264	103,9	40	mg/l
Solidos totales	24007	152,0	2	mg/l
Fuente:		Elaboración		propia

⁸² COLOMBIA CONGRESO DE LA REPUBLICA. Resolución 631 del 2015. (18, abril, 2015). Por la cual se establecen los parámetros y los valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales a cuerpos de aguas superficiales y a los sistemas de alcantarillado público y se dictan otras disposiciones. Bogotá D.C.

Porcentaje removido de DQO utilizando electrodos de aluminio.

$$\%DQO = \frac{85229 - 3583}{85229} \times 100$$

$$DQO = 95.79\%$$

Porcentaje removido de DBO5 utilizando electrodos de aluminio.

$$\%DBO5 = \frac{12308 - 2559}{12308} \times 100$$

$$DBO5 = 79.207\%$$

Porcentaje removido de solidos suspendidos (SST) utilizando electrodos de aluminio:

$$\%SST = \frac{17814 - 1219}{17814} \times 100$$

$$SST = 93.15\%$$

Porcentaje removido de solidos sedimentables totales utilizando electrodos de aluminio (SSED).

$$\%SSED = \frac{24007 - 152.0}{24007} \times 100$$

$$SSED = 99.36\%$$

Porcentaje removido de grasas y aceites utilizando electrodos de aluminio.

$$\% \text{ grasas y aceites} = \frac{1264 - 103.9}{1264} \times 100$$

$$\text{grasas y aceites} = 91.78\%$$

Con estos resultados se muestra que el método de electrocoagulación funciona para el tratamiento de aguas de PMP ya que remueve más del 79 % de la carga contaminante. Al comparar los resultados obtenidos de la electrocoagulación con los resultados presentados en el artículo de investigación electrocoagulación de aguas residuales (G, 2002) se observa que el tiempo de reacción utilizado para obtener la mejor remoción es mayor por un 93.75% al usado en el artículo de investigación electrocoagulación de aguas residuales (G, 2002), la densidad de corriente usada para la experimentación de este trabajo de grado es 0,023 A/cm² así mismo los parámetros fisicoquímicos que presentan los vertimientos de PMP son mayores lo que hace que el tiempo de reacción dure más.

4.5 EXPERIMENTACIÓN 2

La segunda experimentación se realizó puesto que en la primera experimentación se obtuvo un porcentaje de remoción para grasas y aceites igual 94.77% y un porcentaje de remoción de DQO igual a 96.15 % en un tiempo de residencia de 4 horas con un voltaje de 2V y utilizando electrodos de hierro, al comparar estos resultados con los presentados en el artículo de investigación electrocoagulación de aguas residuales (G, 2002) donde se obtuvo un porcentaje de remoción de grasas y aceites igual a 90 % y un porcentaje de remoción de DQO igual al 70% en un tiempo de 15 min con un voltaje de 2,7V , se evidencia que el tiempo de electrocoagulación es más alto y no concuerda con los presentados en la bibliografía. Por lo anteriormente mencionado en la segunda experimentación se evaluó la influencia del tiempo de residencia (5, 15 y 30 min) y el voltaje (2,7, 7,7 y 12,6 V) sobre la cantidad de materia removida puesto que al aumentar la densidad de corriente y el tiempo de tratamiento se obtienen mejores porcentajes de remoción, por lo tanto si se quiere obtener altos porcentajes de remoción se debe utilizar la combinación.⁸³ El material de los electrodos para esta experimentación es hierro debido a que anteriormente se evidencia que se obtiene porcentajes de remoción mayores al 80% y permite un porcentaje de reducción de costos del 37.7%.

Diseño de experimentos

Para la experimentación 2 se escogió un diseño de experimento factorial N^K porque este diseño factorial tienen como ventaja evaluar los efectos de cada variable independiente sobre la variable respuesta por separado, además de evaluar los efectos de las variables independientes conjuntamente.⁸⁴ De esta manera se garantiza que se investiguen todas las combinaciones posibles de los factores y niveles. Para esta experimentación los factores son el voltaje y el tiempo de residencia ya que se quiere identificar que influencia tienen sobre la cantidad de materia removida. Los 2 factores tienen 3 niveles cada uno, en la tabla

⁸³ RICCIO YAURI Luis Fernando. Remoción de contaminantes de aguas residuales urbanas del colector agua de las vírgenes por electrocoagulación, a nivel de laboratorio, utilizando como fuente energética un panel fotovoltaico. Trabajo de grado ingeniería química y ambiental. Huancayo. Universidad nacional del centro del Perú. unidad de posgrado de la facultad de ingeniería química. 2015.124.p

⁸⁴ RAMON Gustavo. Diseño experimentales. [en línea] citado el 17 julio de 2018. Disponible en: http://viref.udea.edu.co/contenido/menu_alterno/apuntes/ac37-diseno_experiment.pdf. 18.p

18 se muestra los factores con sus respectivos niveles. Realizar un diseño factorial N^K permite determinar las principales causas de variación en la respuesta, encontrar las condiciones experimentales con las que se consigue un mejor valor en la variable de interés o respuesta y comparar las respuestas en diferentes niveles de observación.⁸⁵ (Ver tabla 18)

Donde:

N: es el número de niveles (3)

K: es el número de factores (2)

Los factores son importantes en el diseño de experimentos debido a que en la experimentación estos tienen un posible efecto sobre la variable respuesta que se quiere estudiar, los niveles de un factor tratamiento son los tipos o grados específicos del factor que se tendrán en cuenta en la realización del experimento.⁸⁶

Tabla 18. Factores y niveles experimentación 2

Factor	Nivel
Voltaje (V)	2,7
	7,7
	12,6
Tiempo de residencia (min)	5
	15
	30

Fuente: Elaboración propia

Para la identificación del número de tratamientos se utiliza la fórmula mostrada a continuación.

Ecuación 8. Número de tratamientos

$$\text{Número de tratamientos} = (\# \text{ niveles}^{\text{factores}}) * \# \text{ replicas}$$

$$\text{Número de tratamientos} = (3^2) * 2$$

$$\text{Número de tratamientos} = 18$$

⁸⁵ Introducción al diseño de experimentos. [en línea] citado el 28 de octubre de 2018. Disponible en: <http://halweb.uc3m.es/esp/Personal/personas/jmmarin/esp/Diseno/IntroDE.pdf>

⁸⁶ Introducción al diseño de experimentos. [en línea] citado el 28 de octubre de 2018. Disponible en: <http://halweb.uc3m.es/esp/Personal/personas/jmmarin/esp/Diseno/IntroDE.pdf>

Teniendo en cuenta el número de factores, el número de niveles y el número de réplicas elegidas para este trabajo de grado, se obtiene un número total de tratamientos de 18 este número nos indica que se deben realizar 9 ensayos cada uno con su correspondiente replica. La configuración de ensayos de cada experimento se muestra en la tabla 19.

Tabla 19. *Configuración de ensayos experimentación*

Numero de experimento	Variable/ Tiempo (min)	Variable / Voltaje (V)
1	5	2,7
2	15	2,7
3	30	2,7
4	5	7,7
5	15	7,7
6	30	7,7
7	5	12,6
8	15	12,6
9	30	12,6

Fuente: Elaboración propia

4.5.1 Resultados. Los resultados para la experimentación con los electrodos de hierro se pueden observar en la tabla 20.

Tabla 20. *Resultados experimentación con electrodos de hierro*

Numero de experimentación	Voltaje (voltios)	Tiempo de EC (minutos)	Materia removida (gramos)	Materia removida replica (gramos)
1	2,7	5	0,5	0,5
2	2,7	15	2,3	1,8
3	2,7	30	5,1	5,6
4	7,7	5	5	6,2
5	7,7	15	32,2	32,8
6	7,7	30	48,1	52,1
7	12,6	5	32,4	27,5
8	12,6	15	78	79,4
9	12,6	30	81	80,1

Fuente: Elaboración propia

4.5.2 Análisis de resultados experimentación 2. Al comparar los resultados obtenidos con la primera experimentación se puede evidenciar que se obtuvieron mejores resultados obteniendo mayor cantidad de materia removida aumentando el voltaje en un menor tiempo. El fenómeno mencionado anterior se explica con la ley de inducción electromagnética de Faraday ya que esta establece que la tensión inducida o voltaje es directamente proporcional a la rapidez con que cambia el tiempo, es decir, que a mayor voltaje y tiempo mayor va ser la cantidad de materia que se remueve.

Análisis de varianza (ANOVA)

Los resultados obtenidos anteriormente se analizaron por medio de un análisis de varianza donde la variable respuesta es la remoción de materia. La hipótesis nula (H_0) de esta experimentación es igual a que los factores (voltaje y tiempo de residencia) no influyen en la variable respuesta y la hipótesis alterna H_1 , que los factores si influyen en la variable respuesta. Ver tabla 21

Tabla 21. *Análisis de varianza (ANOVA) experimentación 2*

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	F_0	F
Voltaje	11004,17	2	5502,09	488,21	4,25
Tiempo	3659,42	2	1829,71	162,35	4,25
Interacción	1667,76	4	416,94	73,99	3,63
Error	22,54	9	2,50	-	-
Total	16353,90	17	-	-	-

Fuente: Elaboración propia

Teniendo en cuenta el análisis de varianza se puede concluir que el factor voltaje influye en la variable respuesta, es decir, influyen en la remoción de materia, se puede identificar que F_0 (F obtenido experimentalmente) es igual a 488,21 y la F hallada por medio de distribución Fisher- Snedecor a un nivel de significancia de 0,05 ($\alpha=0,05$) es igual a 4,25, lo que indica que se rechaza la hipótesis nula (H_0) es decir que el factor de voltaje si tiene influencia en la remoción de materia puesto que si se aumenta el voltaje se aumenta la densidad de corriente. Por lo tanto una densidad de corriente más alta generaría una mayor cantidad de iones desestabilizando las moléculas contaminantes y mejorando la eficiencia en la remoción del color.⁸⁷ Al realizar el análisis de varianza para el factor tiempo de residencia se puede observar que F_0 (F obtenido experimentalmente) es igual a 162,35 y la F hallada por medio de las tablas a un nivel de significancia de 0,05 ($\alpha=0,05$) es igual a 4,25, es decir, F_0 es mayor que F (tablas) lo que indica que se rechaza la hipótesis nula (H_0) dando como resultado que el tiempo de residencia si tiene influencia sobre la cantidad de materia que se remueve.

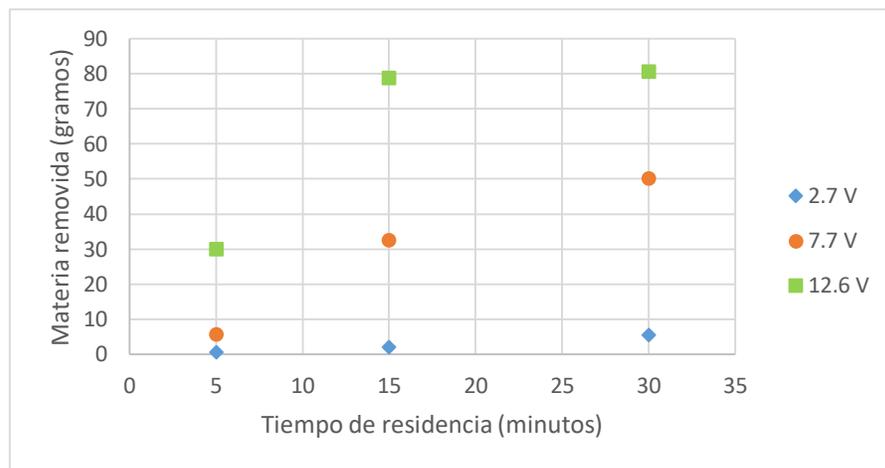
En la gráfica 4 Se puede observar que los valores obtenidos en la primera fase de experimentación con respecto al tiempo de residencia de 5 y 6 horas y un voltaje de 2V son parecidos a los resultados de 12,6 V con un tiempo de residencia de 15 y 30 minutos , 2 A y una densidad de corriente de 0,023 A/ cm², esto se debe a que hay una relación inversamente proporcional entre el tiempo de residencia y el voltaje, lo anterior quiere decir que ha mayor voltaje menor es el tiempo del proceso de electrocoagulación que se necesita para remover los contaminantes, esto se debe porque en todo proceso electrolítico, el voltaje es el parámetro más importante para controlar la velocidad de la reacción dentro del sistema. Es

⁸⁷ DANESHVAR, N. KHATAEE, 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)II. Journal of Hazardous Materials 148. 2007. 566-572.p

conocido que el voltaje determina el régimen de producción de coagulante, los hidróxidos que se forman, regulan la velocidad y volumen de burbujas que se producen, y como consecuencia afecta el crecimiento de los floculos,⁸⁸ por tal motivo la eficiencia en la remoción y el consumo de energía se incrementan con el aumento del voltaje.⁸⁹

Es importante tener en cuenta que cuando se emplean densidades de corriente demasiado elevadas, aumenta el empleo de energía eléctrica para la reacción paralela de generación de oxígeno y también la potencia disipada en forma de calor por efecto Joule⁹⁰ y por esta razón aumenta el costo de energía y a su vez el costo del tratamiento.

Gráfica 6. Influencia en la generación de solidos suspendidos y sedimentables variando voltaje y tiempo



Fuente: Elaboración propia

Según la bibliografía mostrada en el capítulo 3 el tiempo óptimo para el proceso de electrocoagulación es de 15 min en cuanto al voltaje no hay un valor óptimo definido puesto que el valor del voltaje depende de qué tipo de contaminante. Claramente a mayor voltaje mayor va a ser la producción de iones permitiendo la formación del coagulante generando así la desestabilización de los contaminantes produciendo los floculos. La remoción de materia aumento de 32,4 g a 78 g a 81g con el incremento de la corriente como era de esperarse en cualquier proceso electroquímico, en la gráfica 4 muestra las condiciones óptimas donde se obtuvo mayor remoción de materia, según la gráfica se puede concluir que a 12,6V y 30 minutos y 2 A se logra remover 81 gramos, al comparar esos resultados con los presentados en la investigación evaluación de la electrocoagulación para

⁸⁸ OJEDA ARMAIGNAC Elaine, HING CORTÓN Romelia. Estudio del proceso de electrocoagulación de la vinaza empleando electrodos de hierro. Santiago de Cuba. Universidad de Oriente. Facultad de ingeniería química.2010. 23. p

⁸⁹ BELTRÁN GONZALEZ Karen Eliana. Diseño conceptual y construcción de un electrocoagulador controlado por Labview. Trabajo de grado ingeniería ambiental. Bogotá D.C. Universidad Santo Tomas. Facultad de ingeniería ambiental. 2015.24.p

⁹⁰ CONDE GARCIA Erika. Evaluación del proceso de electrocoagulación sobre aguas de lavado con contenido de lactosuero. Trabajo de grado de ingeniería química. Bogotá D.C. Universidad del valle. Facultad de ingeniería. 2012. 17.p

tratamiento de efluentes generados por una empresa de mantenimiento de motores (Manangón, de la Torre, & Guevara, 2010) donde se obtiene una remoción de materia de 71,8 g en un tiempo de 40 minutos y 1,8 A, se concluye que mientras mayor sea el tiempo de operación, los resultados son mejores pero el costo de energía aumenta, por lo tanto se debe establecer el valor de intensidad de corriente con el cual se obtenga los mejores resultados y en el menor tiempo posible.⁹¹

Para 5 minutos, 2,7V y 2 A se obtuvo 0,5 g de materia al comprar estos resultados con los obtenidos presentados en el artículo de investigación estudio de la factibilidad del proceso de electrocoagulación para la obtención de sólidos a partir de la vinaza donde se obtuvo 7,05 g en un tiempo de 5 min y 7 A se puede concluir que al aumentar la intensidad de corriente mayor va a ser la remoción de materia. Diferentes trabajos reportan el efecto de la intensidad de la corriente en la remoción de materia, entre otras variables. Todos coinciden en que la corriente incrementa de forma significativa la cantidad de contaminante separado.⁹² Se realizó una caracterización del agua tratada en un tiempo 30 minutos y 12,6V con el fin de identificar si se generó reducción en los parámetros fisicoquímicos, los resultados obtenidos utilizando electrodos de hierro y 12,6 V se encuentran en la siguiente tabla:

Tabla 22 . *Caracterización del agua utilizando electrodos de hierro con un voltaje de 12,6 V*

	Caracterización del agua sin tratar	Caracterización del agua después de tratar	Parámetros elaboración de aceites y grasas de origen animal y vegetal ⁹³ resolución 631 del 2015	Unidades
Reporte de resultados			-	-
Fecha	2017-09-26	2018-08-17	-	-
Examen solicitado	Caracterización de aguas (fisicoquímico)	Caracterización de aguas (fisicoquímico)	-	-
Muestreo por	Laboratorio	Empresa	-	-
Tamaño muestra	4500 ml	2750 ml	-	-
Tipo de envase	Plástico	Plástico, Vidrio, Ambar	-	-
Temperatura	10.1 °C	-	-	-
Método	S.M. 22st edition 5210 B, 522D C, 522D B, 254D D Y Gravimetría	S.M. 5210 B, S.M. 5220 C, SM 22nd Edition 5520 B, SM 22nd Edition 2540 F, SM 22nd Edition 2540 D	-	-

⁹¹ MANANGÓN Eliana, DE LA TORRE Ernesto, GUEVARA Alicia. valuación de la electrocoagulación para tratamiento de efluentes generados por una empresa de mantenimiento de motores. Revista Politécnica. 2010. Vol. 31.127.p

⁹² OJEDA ARMAIGNAC Elaine, HING CORTÓN Romelia, GONZÁLEZ DÍAZ Yudith. Estudio de la factibilidad del proceso de electrocoagulación para la obtención de sólidos a partir de la vinaza. Revista CENIC Ciencias Química. Vol. 43. 2012.

⁹³ COLOMBIA CONGRESO DE LA REPUBLICA. Resolución 631 del 2015. (18, abril, 2015). Por la cual se establecen los parámetros y los valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales a cuerpos de aguas superficiales y a los sistemas de alcantarillado público y se dictan otras disposiciones. Bogotá D.C.

Tabla 22. (Continuación)

	Caracterización del agua sin tratar	Caracterización del agua después de tratar	Parámetros elaboración de aceites y grasas de origen animal y vegetal	unidades
DBO5	12308	1260	300	mg/l O ₂
Solidos suspendidos totales (SST)	17814	564	300	mg/l
DQO	85229	1843	550	mg/l O ₂
Grasas y aceites	1264	51	40	mg/l
Solidos totales	24007	75	2	mg/l

Fuente: Elaboración propia

Porcentaje removido de DQO utilizando electrodos de hierro y un voltaje de 12,6 V.

El cálculo de DQO se realiza por medio de la siguiente formula:

Porcentaje de DQO removido

$$\%DQO = \frac{85229 - 1843}{85229} \times 100$$

$$DQO = 97.83\%$$

Porcentaje removido de DBO5 utilizando electrodos de hierro y un voltaje de 12,6 V.

Porcentaje de DBO5 removido

$$\%DBO5 = \frac{12038 - 1260}{12308} \times 100$$

$$DBO5 = 89.82\%$$

Porcentaje removido de solidos suspendidos (SST) utilizando electrodos de hierro y un voltaje de 12,6 V.

Porcentaje de solidos suspendidos totales

$$\%SST = \frac{17814 - 564}{17814} \times 100$$

$$SST = 96.83\%$$

Porcentaje removido de solidos sedimentables totales utilizando electrodos de hierro (SSED) y un voltaje de 12,6 V.

Porcentaje solidos sedimentables totales removido

$$\%SSED = \frac{24007 - 75}{24007} \times 100$$

$$SSED = 99.68\%$$

Porcentaje removido de grasas y aceites utilizando electrodos de hierro y un voltaje de 12,6 V.

Porcentaje de grasas y aceites removido

$$\%grasas\ y\ aceites = \frac{1264 - 51}{1264} \times 100$$

$$\%grasas\ y\ aceites = 95.96\%$$

Al comparar los resultados obtenidos en la primera experimentación y segunda experimentación se observa un mejor resultado en todos los parámetros fisicoquímicos analizados para el voltaje utilizado en la segunda experimentación, esto se debe a que el suministro de energía eléctrica al sistema de electrocoagulación determina la cantidad de iones de hierro (Fe^{3+}) liberados⁹⁴. Al aumentar el voltaje se producen más iones de hierro en una menor cantidad de tiempo generando un aumento en la velocidad de reacción. Esto demuestra que dejar un bajo voltaje por mucho tiempo no implica mayores tasas de remoción ni un costo más bajo. Con los parámetros seleccionados en la segunda experimentación de 12,6 voltios y 30 minutos se obtiene una remoción mayor, menores costos, y un proceso mucho más rápido, sin embargo los valores de los parámetros fisicoquímicos no se lograron disminuir hasta los valores máximo que exige la resolución 631 del 2015 (Ver tabla 22) , se concluye que el método de electrocoagulación es eficiente para tratar los vertimientos de la empresa PMP pero es necesario realizar un pre tratamiento para complementar el método de electrocoagulación.

⁹⁴ MORALES BAUTISTA Patricia. Tratamiento de agua residual de biodiesel por electrocoagulación. Trabajo de grado ingeniero químico petrolero. México DF. Instituto politécnico nacional, escuela superior de ingeniería química e industrias extractivas. Facultad de química. 2015. 23 p.

4.6 ANÁLISIS DEL COSTO ENERGÉTICO EN LA EXPERIMENTACIÓN 1 Y 2

Para calcular el costo de energía del proceso de electrocoagulación se realizó por medio de la ecuación 8. Primero es necesario el cálculo de la energía consumida, esta se obtiene con la ecuación 9.

Ecuación 9. *Costo energético*

$$\text{costo energetico} = E * \text{costo de energía}$$

El costo de energía en condensa para el sector industrial y comercial es de \$ 614,25 pesos por KWh⁹⁵.

Ecuación 10. *Energía consumida* ⁹⁶

$$E = \frac{V * I * t}{V_{efR}}$$

Donde:

E = energía consumida por el electrocoagulador (kWh/m³)

V = voltaje de la celda de electrocoagulación (V)

I = intensidad aplicada (A)

t = tiempo de electrocoagulación (h)

V_{efR} = volumen efectivo de la celda (m³) (1L)

Energía consumida experimentación 1

$$E = \frac{2V * 2A * 4h}{0.001m^3 * 1000}$$

$$E = 16 \frac{kWh}{m^3}$$

Costo energético experimentación 1

$$\text{costo energetico} = 16 \frac{kWh}{m^3} * \frac{\$ 614,25 COP}{kWh}$$

⁹⁵ Condesa. [en línea] citado el 9 julio de 2018. Disponible en: <https://www.codensa.com.co/empresas/mi-cuenta/tarifas-de-energia/tarifas>.

⁹⁶ OZYONAR Fuat y KARAGOZOGLU Bunyamin. Operating Cost Analysis and Treatment of Domestic Wastewater by Electrocoagulation Using Aluminum Electrodes.2011.p. 177

$$\text{costo energetico} = 9828 \frac{\text{COP}}{\text{m}^3}$$

Energía consumida experimentación 2

$$E = \frac{12,6V * 2A * 0,5h}{0,001\text{m}^3 * 1000}$$

$$E = 12,6 \frac{\text{kWh}}{\text{m}^3}$$

Costo energético experimentación 2

$$\text{costo energetico} = 12,6 \frac{\text{kWh}}{\text{m}^3} * \frac{\$ 614,25 \text{ COP}}{\text{kWh}}$$

$$\text{Costo energetico} = 7740 \frac{\text{COP}}{\text{m}^3}$$

Al comparar el costo de la energía entre el mejor resultado de la primera experimentación (2V y 240 minutos de electrocoagulación) y la segunda experimentación (12,6 V y 30 minutos) se puede concluir que la mejor opción en cuanto a costos es la de 12,6 y 30 minutos debido a que el costo energético para estos parámetros es de 7740 COP/ m³, generando un ahorro de 2088 COP. El proceso de electrocoagulación permite la remoción de una alta cantidad de contaminante en una sola operación, situación que convierte a esta tecnología en una opción económica en comparación con otros tratamientos de agua convencionales y ambientales para el tratamiento de las aguas residuales de muchas industrias.⁹⁷

⁹⁷ RESTREPO MEJÍA Ana Patricia, ARANGO RUIZ Álvaro, GARCÉS GIRALDO Luis Fernando. La electrocoagulación: retos y oportunidades para el tratamiento de aguas. Electrocoagulación. Medellín, 2006. p. 72.

5. ESPECIFICACIONES TECNICAS DEL PROCESO DE ELECTROCUAGULACIÓN

En este capítulo se dará a conocer las dimensiones de los reactores de electrocoagulación para el tratamiento de aguas de la empresa PMP, para este es necesario determinar varios factores de diseño como lo son el material del reactor, el material de los electrodos, las dimensiones de los reactores y la dimensión de los electrodos) e identificar el lugar adecuado para situar los reactores teniendo en cuenta la ubicación de las trampas de grasa y el espacio disponible en la empresa. Es por eso que en la figura 30 se puede observar el plano de la empresa.

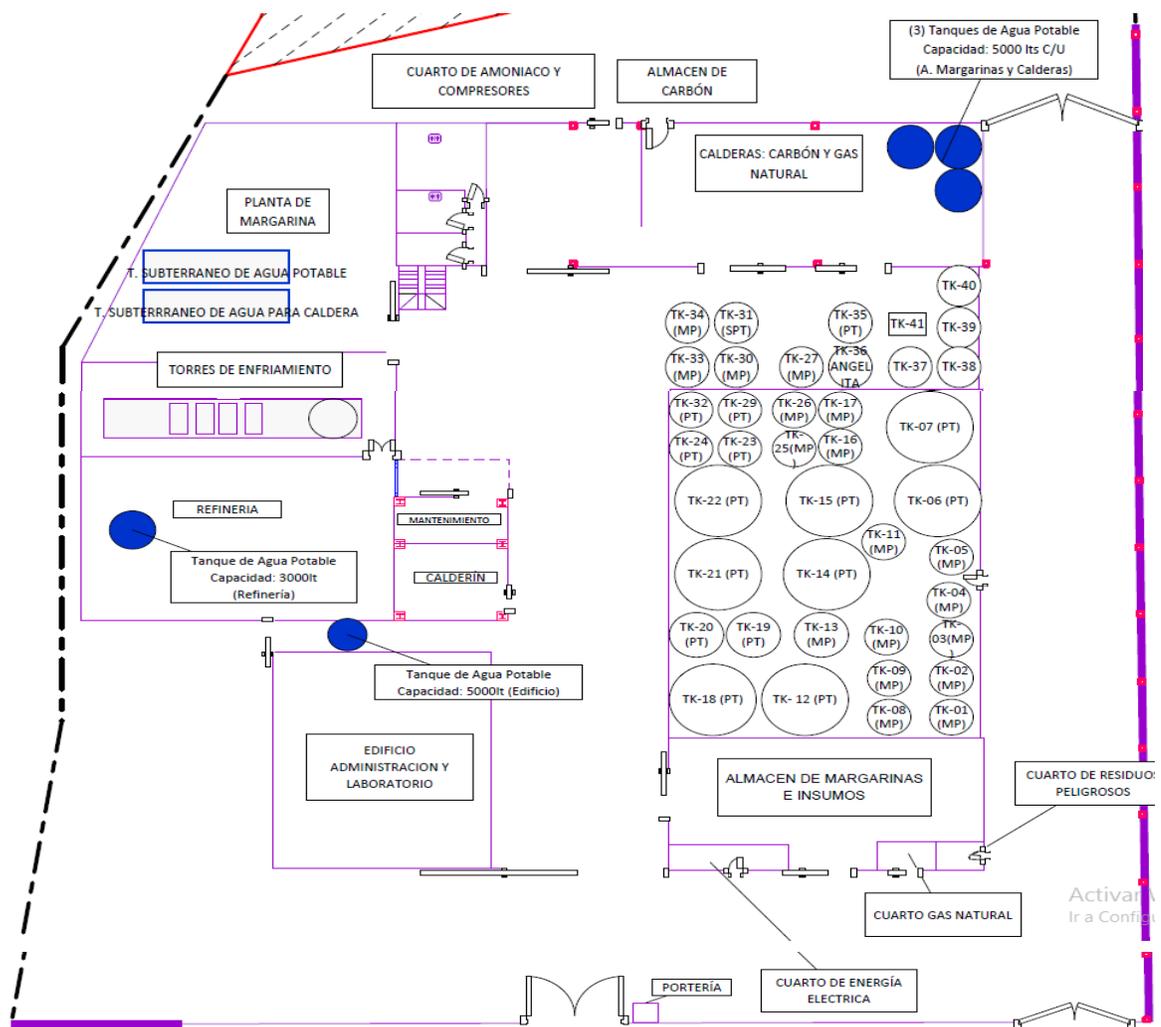


Figura 30. Plano de la empresa PMP

Fuente: Procesadora de materias primas S.A

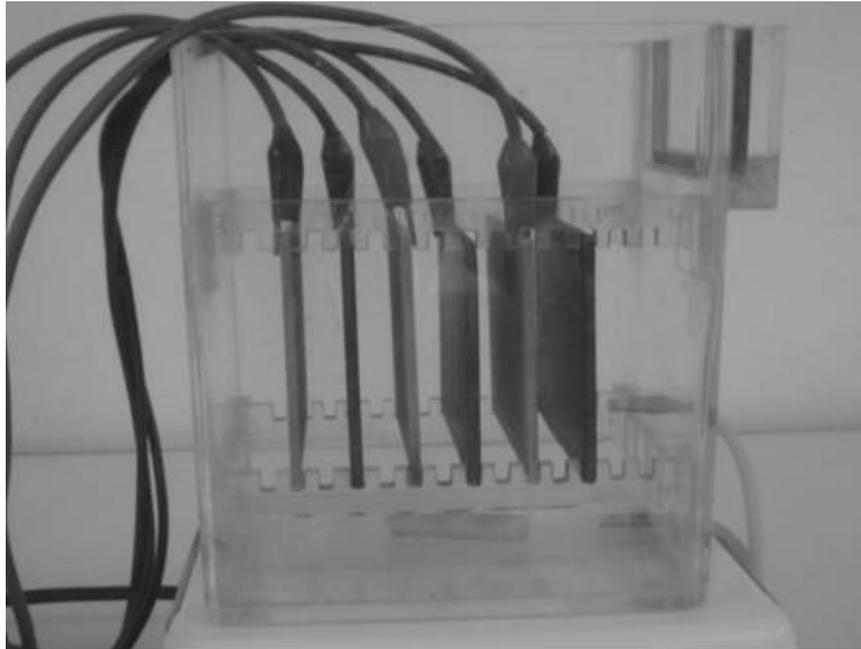
5.1 DISEÑO DEL REACTOR

Teniendo en cuenta el plano de la empresa (ver figura 31) se cuenta con un espacio de 37 m², este espacio la empresa lo tiene destinado para una posible expansión en un futuro.

Para construir el reactor de electrocoagulación es necesario tener en cuenta las características, ventajas y desventajas de los reactores utilizados en los procesos electroquímicos. En estos procesos se utilizan dos tipos de reactores debido a que estos presentan características básicas, haciendo los procesos mucho más factibles, simples, y con eficiencia óptima de tratamiento.⁹⁸

El reactor batch se caracteriza por tener una concentración C_A equivalente en todo su volumen, suelen ser cerrados o abiertos, con caudal volumétrico igual tanto en la entrada como en la salida. El tiempo de residencia de estos reactores está determinado por el tipo de reacción y la eficiencia de remoción, para la construcción de la celda de electrocoagulación está dado por la cantidad de carga contaminante a remover, el voltaje a usar y el porcentaje de remoción deseado. Estos reactores pueden ser de flujo continuo también llamado transitorio, o de flujo permanente/estacionario.

Figura 31. Reactor de electrocoagulación batch sin agitación



Fuente: MOLLAH M. Yousuf A, SCHENNACH Robert, PARGA José R. y COCKE David L. Electrocoagulation (EC) science and applications Journal of Hazardous Materials .2000. p. 32

⁹⁸ COURET. F, COSTA LOPEZ. J. Introducción a la ingeniería electroquímica. Barcelona. Reverté, S.A, 1992. 95 p.

Por otro lado el reactor de flujo pistón o reactor tubular de flujo pistón, tiene forma cilíndrica por lo regular de orientación de forma horizontal, el fluido pasa a la misma velocidad uniforme en todos los puntos del reactor además de permanecer el mismo tiempo de residencia en el interior del reactor. La concentración de material removido en la electrocoagulación varía de forma continua en la entrada y salida del reactor. Este reactor tiene flujo transitorio. En la figura 32 se observa un montaje de un sistema de electrocoagulación de flujo continuo.

Figura 32. Sistema de flujo continuo de electrocoagulación.



Fuente: ARANGO RUÍZ, Álvaro. La electrocoagulación: una alternativa para el tratamiento de aguas residuales. Revista Lasallista de Investigación. Enero-junio, 2005, vol. 2, no. 1, p. 70

Teniendo en cuenta la cantidad de agua residual y la disposición de la misma en la empresa PMP, un reactor de flujo continuo no es indicado ya que trataría una cantidad de agua muy baja y consumiría energía de manera continua, haciendo que el proceso sea de alto costo⁹⁹, para el proceso de electrocoagulación es importante tener en cuenta que se obtiene como resultados solidos sedimentables, suspendidos y floculos. Estos solidos se van a adherir a las paredes del reactor y de los electrodos generando disminución del flujo y de la eficiencia de remoción, por este motivo es esencial el mantenimiento y limpieza del sistema. En flujo continuo esto significaría obligatoriamente paradas en determinados tiempos, o la pérdida gradual de la eficiencia de remoción del tratamiento a medida del transcurso del tiempo.

⁹⁹ IBORRA Montserrat, TEEJERO Javier, CUNILL Fidel. Diseño de reactores químicos. Trabajo de grado ingeniería química. Barcelona. Universidad de Barcelona. Facultad de ingeniería. 2013.12.p

Por tanto, el reactor de electrocoagulación adecuado para el tratamiento de agua de la empresa PMP es de flujo estacionario, es decir reactor batch. En este caso el reactor no requiere agitación ya que la eficiencia de remoción de contaminantes está dada por la cantidad de electrodos presentes en el agua y el área de contacto superficial que tengan estos con el medio acuoso, un mecanismo de agitación reduciría considerablemente la cantidad de electrodos, dependiendo el material se vería afectado por la corriente inducida en el medio además de ampliar el tiempo de limpieza y dificultar el mismo.

Volumen de agua a tratar

Como se mencionó en el tercer capítulo la empresa PMP cuenta con trampas de grasas que tienen como función reducir las grasas y aceites junto con parte de los sólidos que se encuentran en los vertimientos. Estas trampas de grasas contienen 108 m³ de vertimientos que se debe tratar, el tratamiento de 108 m³ ocasionaría dificultades en la manipulación y limpieza del sistema de electrocoagulación. Por la razón mencionada anteriormente se propone emplear 6 reactores con el fin de dividir el volumen del vertimiento. Cada reactor debe tratar 18 m³ en total, sin embargo, 18 m³ siguen siendo un volumen grande para el tratamiento por medio del proceso de electrocoagulación, además el área disponible en las instalaciones de la empresa, hacen que sea necesario definir el volumen de cada reactor en 0,36 m³, por lo que según este valor, es necesario dividir el volumen de ingreso y realizar el proceso el número de veces necesario para tratar la totalidad del residuo. El tiempo de electrocoagulación se eligió debido a que en el capítulo anterior se obtuvieron mejores resultados para el proceso de electrocoagulación a 12,6V y 30 minutos.

Ecuación 11. *Volumen total de agua a tratar*¹⁰⁰

$$V_{total\ a\ tratar} = 0,36m^3 * 50\ veces$$

$$V_{total\ a\ tratar} = 18m^3 * 6\ reactores$$

$$V_{total\ a\ tratar} = 108\ m^3$$

Los 6 reactores pueden presentar un arreglo de forma en serie o en paralelo. Para determinar el arreglo óptimo a utilizar se analizó el costo y las ventajas o desventajas de cada arreglo.

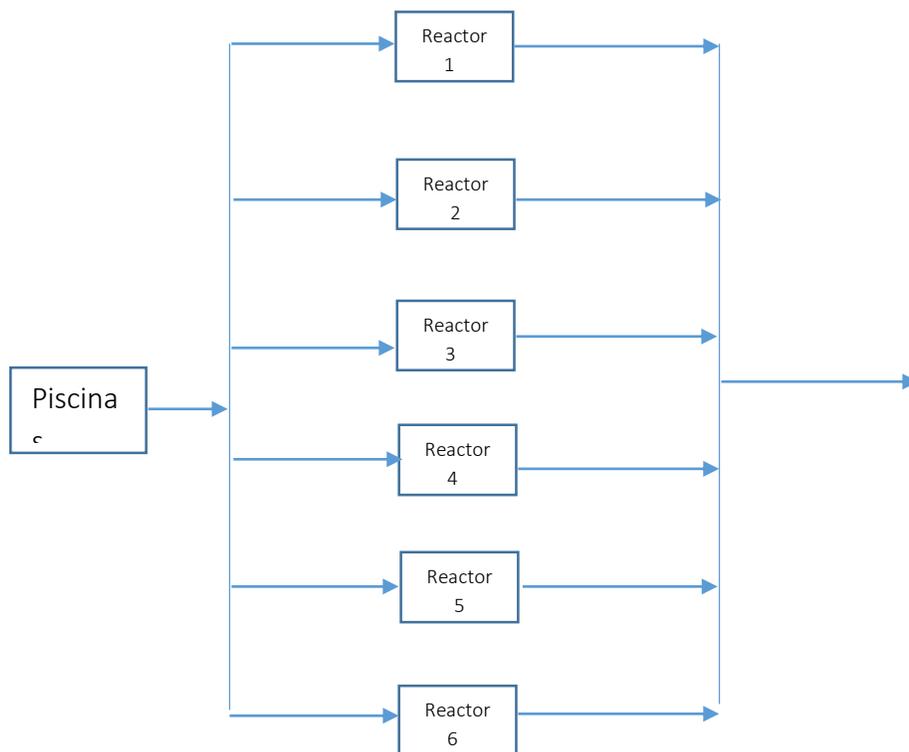
El arreglo en serie es un arreglo donde los 6 reactores van uno seguida de otro. Este arreglo presenta varios problemas prácticos a considerar.

¹⁰⁰ ROBLES MENDOZA, Lindsay Karime. LÓPEZ BUENO Andrés Felipe. Diseño de un prototipo para el tratamiento de aguas residuales domésticas, basado en electrocoagulación. Trabajo de grado ingeniería civil. Bogotá D.C. Universidad De La Salle. Facultad de ingeniería.2017.177.p

Un fallo operacional en una de las líneas de la tubería o en un reactor tendrá como resultado una parada en el tratamiento, ya que no permitirá el paso de agua en el sistema, por otra parte el método de electrocoagulación está diseñado y planteado para un solo reactor, para tratar el agua de manera eficiente el primer reactor es suficiente para remover la cantidad de contaminantes adecuada, los demás reactores de electrocoagulación son innecesarios. De esta manera se concluye que el arreglo en serie para el proceso de electrocoagulación no es una opción, por lo cual se considera el arreglo en paralelo.

El arreglo en paralelo presenta ventajas en practicidad en comparación con el arreglo en serie, se tiene la ventaja de que cada reactor de electrocoagulación va a tratar una cantidad determinada de agua, es decir, no son dependientes entre sí, lo que permite en un tiempo más corto tratar mayor cantidad de agua, por otro lado si hay un problema en las líneas de bombeo de las piscinas a algún reactor, este no afecta las demás líneas, al tener diferentes líneas conectadas a las piscinas solo es necesario dos bombas lo cual es más económico que comprar las 7 bombas del sistema anterior

Figura 33. Reactores arreglo en paralelo



Fuente: Elaboración propia

5.1.1 Dimensiones de los reactores. Basados en las dimensiones del reactor que se utilizó en la experimentación se plantea un diseño del reactor que sea eficiente,

económico, de fácil limpieza y operación. Para calcular las dimensiones del reactor es necesario utilizar la ecuación 12.

Ecuación 12. *Volumen de los reactores*¹⁰¹

$$V = L * H * A$$

Donde:

V : Volumen del reactor

L : Longitud del reactor

H : Alto

A : Ancho

Para determinar las dimensiones del reactor es necesario la relación longitud – ancho y altura – ancho del reactor que se utilizó para la experimentación, estas relaciones se obtiene por medio de la división de los respectivos términos para cada caso como se muestra en las ecuaciones 13 y 14.

Relación entre la longitud (L) y ancho (A) del reactor experimental

Ecuación 13. *Relación longitud - ancho*¹⁰²

$$\frac{L}{A} = \frac{0,08m}{0,08 m}$$

$$L = A$$

Relación entre la altura (H) y el ancho (A) del reactor experimental

Ecuación 14. *Relación altura – ancho*¹⁰³

$$\frac{H}{A} = \frac{0,16m}{0,08m}$$

$$H = 2A$$

Después de calcular la relación longitud - ancho y altura - ancho se reemplaza en la ecuación 12.

$$0,36 m^3 = A * 2A * A$$

¹⁰¹ GUANOLUIZA LLIVE, Luis Ernesto. Dimensionamiento de un sistema de electrocoagulación aplicado al tratamiento de aguas residuales domésticas, con o sin irradiación de electrones acelerado. Trabajo de grado ingeniería química. Quito. Escuela Politécnica Nacional. Facultad de ingeniería química y agroindustria.2013.130 p.

¹⁰² GUANOLUIZA LLIVE, Luis Ernesto. Dimensionamiento de un sistema de electrocoagulación aplicado al tratamiento de aguas residuales domésticas, con o sin irradiación de electrones acelerado. Trabajo de grado ingeniería química. Quito. Escuela Politécnica Nacional. Facultad de ingeniería química y agroindustria.2013.130 p.

¹⁰³ GUANOLUIZA LLIVE, Luis Ernesto. Dimensionamiento de un sistema de electrocoagulación aplicado al tratamiento de aguas residuales domésticas, con o sin irradiación de electrones acelerado. Trabajo de grado ingeniería química. Quito. Escuela Politécnica Nacional. Facultad de ingeniería química y agroindustria.2013.131 p.

$$0,36 \text{ m}^3 = 2A^3$$

$$A = 0,56 \text{ m}$$

Utilizando el valor obtenido en la ecuación 12 se reemplaza en la ecuación 13 y 14 para hallar el valor del ancho y la altura del reactor.

$$L = A$$

$$L = 0,56 \text{ m}$$

$$H = 2A$$

$$H = 1,12 \text{ m}$$

En la tabla 23 se puede observar las dimensiones de los reactores para el proceso de electrocoagulación.

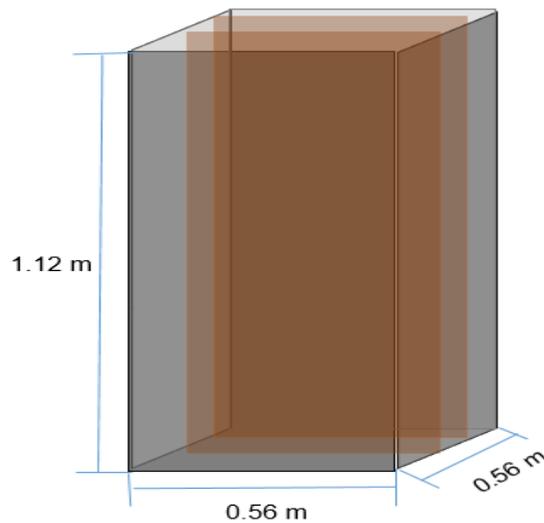
Dimensiones	Valor
Ancho (m)	0,56
Largo (m)	0,56
Alto (m)	1,12

Tabla 23. Dimensiones de los reactores de electrocoagulación

Fuente: Elaboración propia

En la figura 34 se puede observar las dimensiones de los 6 reactores para un volumen de 0,36 m³.

Figura 34. Dimensiones de los reactores



Fuente: Elaboración propia

5.1.2 Dimensiones de los electrodos. La ecuación 15 muestra la relación entre h (nivel del agua a tratar en el reactor experimental) y el ancho de este reactor.

Ecuación 15. *Relación nivel del agua – ancho* ¹⁰⁴

$$\frac{h}{A} = \frac{0,13m}{0,08m}$$

$$h = 1,63A$$

Para calcular el valor de a_e se reemplazó el valor de a hallado en la ecuación 15 en la ecuación 16.

Donde:

a_e = ancho de los electrodos

a = ancho del reactor

Ecuación 16. *Ancho de los electrodos*

$$a_e = a$$

$$a_e = 0,56m$$

Para calcular el valor de h_e es necesario hallar los valores de e y b con las relaciones mostradas a continuación.

Calculo de b

Donde:

b = espacio bajo el borde inferior de los electrodos en el reactor experimental.

h = nivel del agua en el reactor experimental.

Ecuación 17. *Relación espacio bajo el borde inferior – nivel del agua*¹⁰⁵

$$\frac{b}{h} = \frac{0,005m}{0,13m}$$

$$b = 0,038 h$$

$$b = 0,038 * 1,63 * 0,56$$

¹⁰⁴ GUANOLUIZA LLIVE, Luis Ernesto. Dimensionamiento de un sistema de electrocoagulación aplicado al tratamiento de aguas residuales domésticas, con o sin irradiación de electrones acelerado. Trabajo de grado ingeniería química. Quito. Escuela Politécnica Nacional. Facultad de ingeniería química y agroindustria.2013.131 p.

¹⁰⁵ GUANOLUIZA LLIVE, Luis Ernesto. Dimensionamiento de un sistema de electrocoagulación aplicado al tratamiento de aguas residuales domésticas, con o sin irradiación de electrones acelerado. Trabajo de grado ingeniería química. Quito. Escuela Politécnica Nacional. Facultad de ingeniería química y agroindustria.2013.131 p.

$$b = 0,034m$$

Calculo de e

Donde:

e = espacio sobre el borde superior de los electrodos.

h = nivel del agua en el reactor experimental.

Ecuación 18. *Relación espacio sobre el borde – nivel del agua*¹⁰⁶

$$\frac{e}{h} = \frac{0,04m}{0,13m}$$

$$e = 0,30h$$

$$e = 0,30 * 1,63 * 0,56m$$

$$e = 0,27m$$

Remplazando los valores calculados anteriormente en la ecuación 19 se obtiene el valor de h_e .

Donde:

h_e = altura de los electrodos.

h = Relación nivel del agua – ancho.

e = espacio sobre el borde superior de los electrodos.

b = espacio bajo el borde inferior de los electrodos en el reactor experimental.

Ecuación 19. *Altura de los electrodos*¹⁰⁷

$$h_e = h - e - b$$

$$h_e = 0,91m - 0,27m - 0,034m$$

$$h_e = 0,60m$$

Las medidas de los electrodos se pueden observar en la tabla 24.

Tabla 24. *Dimensiones de los electrodos*

Dimensiones	Valor
Ancho (m)	0,56
Alto (m)	0,60

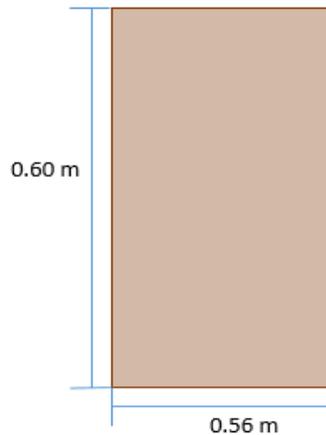
¹⁰⁶ *Ibíd.*, p. 133

¹⁰⁷ GUANOLUIZA LLIVE, Luis Ernesto. Dimensionamiento de un sistema de electrocoagulación aplicado al tratamiento de aguas residuales domésticas, con o sin irradiación de electrones acelerado. Trabajo de grado ingeniería química. Quito. Escuela Politécnica Nacional. Facultad de ingeniería química y agroindustria.2013.131 p.

Fuente: Elaboración propia

En la figura 35 se puede observar las dimensiones de los electrodos

Figura 35. Electrodo de hierro



Fuente: Elaboración propia

5.2 MATERIAL DEL REACTOR

El polimetilmetacrilato (PMMA) es un plástico que se caracteriza por ser irrompible es utilizado en diferentes industrias por ejemplo industria de automóvil, iluminación y construcción. Para el material de la celda se escogió PMMA debido a disponibilidad y características frente a otros plásticos.

Este material se destaca¹⁰⁸:

- Alta resistencia.
- Transparencia.
- Resistencia a la intemperie.
- Resistencia al rayado.
- Excelente desempeño como aislante térmico, acústico.
- Resistente a altas temperaturas.

Adicionalmente este material se ha utilizado en varias investigaciones del método de electrocoagulación.

5.3 MATERIAL DE LOS ELECTRODOS

¹⁰⁸ AMAYA CELIS Angie Carolina, NAVAS ESPINOSA Carla Michelle. Evaluación del proceso simultáneo de fotocatalisis heterogénea y electrocoagulación (fcec) para la eliminación de compuestos orgánicos contaminantes en agua residual de la industria litográfica. Trabajo de grado de ingeniera química. Bogotá D.C. Fundación universidad de américa .Facultad de ingenierías. 2012.34.p

Como se evidenció en los capítulos anteriores los electrodos más utilizados para el tratamiento de aguas es aluminio y hierro esto se debe a la fácil obtención de estos materiales y oxidación.

Para la implementación de este tratamiento en la empresa PMP se elige que los electrodos serian de hierro por las razones mostradas a continuación.

El hierro es más económico que el aluminio, La lamina de aluminio se encuentra en un valor de \$159000 COP en cambio la lámina de hierro tiene un valor de \$83000 COP.

Es importante tener en cuenta el precio porque permite la disminución de costos de operación ya que los electrodos por su desgaste natural al estar en la celda electroquímica hay que cambiarlos constantemente.

El hierro es menos contaminante que el aluminio, por esta razón al realizar la disposición de solidos se va a generar menos contaminación.¹⁰⁹

Los electrodos de hierro remueven con mayor facilidad las grasas, la turbiedad y la demanda química de oxígeno (DQO).¹¹⁰

5.4 NUMERO DE ELECTRODOS

Por medio de la ecuación 1 se determina el número de los electrodos que se necesitan para la celda de electrocoagulación (Arango & Garcés, 2007, p.64)

$$\text{Número de electrodos} = \frac{56\text{cm} - 2 * (1,2\text{cm})}{1\text{cm} + 0,4\text{cm}}$$

$$\text{Número de electrodos} = 38$$

5.5 BOMBAS

La implementación de bombas es necesaria debido a que el agua necesita ser transportada desde las trampas de grasa hasta los 6 reactores de electrocoagulación. Las bombas de desplazamiento positivo se caracterizan porque tienen la capacidad de bombear fluidos con partículas, son adecuadas para los fluidos con alta viscosidad y manejan presiones altas. Las bombas de desplazamiento positivo de la marca Bonve se caracterizan por

¹⁰⁹ SOBERANIS, M. Piña, DOMÍNGUEZ, A. Martín, Revisión de variables de diseño y condiciones de operación en la electrocoagulación. Mexico. 2011. p 5.

¹¹⁰ SOBERANIS, M. Piña, DOMÍNGUEZ, A. Martín, Revisión de variables de diseño y condiciones de operación en la electrocoagulación. Mexico. 2011. p 5.

tener alta eficiencia, fiabilidad y resistencia a la corrosión¹¹¹.

Finalmente, en la figura 36 se puede observar el diagrama de flujo del proceso (PFD), este es necesario para determinar los costos de inversión del proyecto ya que el diagrama permite determinar la cantidad de válvulas y bombas que se necesitan en el tratamiento de aguas de la empresa PMP. En la tabla 25 se encuentra los nombres de los equipos que se pueden observar en el diagrama PFD.

Tabla 25. *Nombre de los equipos utilizados en el diagrama de flujo*

Equipo	Nombre
E-1	Torre de enfriamiento
E-2	Pre-tratamiento / trampas de grasa
E-3	Reactor (Electrocoagulación) 1
E-4	Reactor (Electrocoagulación) 2
E-5	Reactor (Electrocoagulación) 3
E-6	Reactor (Electrocoagulación) 4
E-7	Reactor (Electrocoagulación) 5
E-8	Reactor (Electrocoagulación) 6
E-9	Alcantarillado

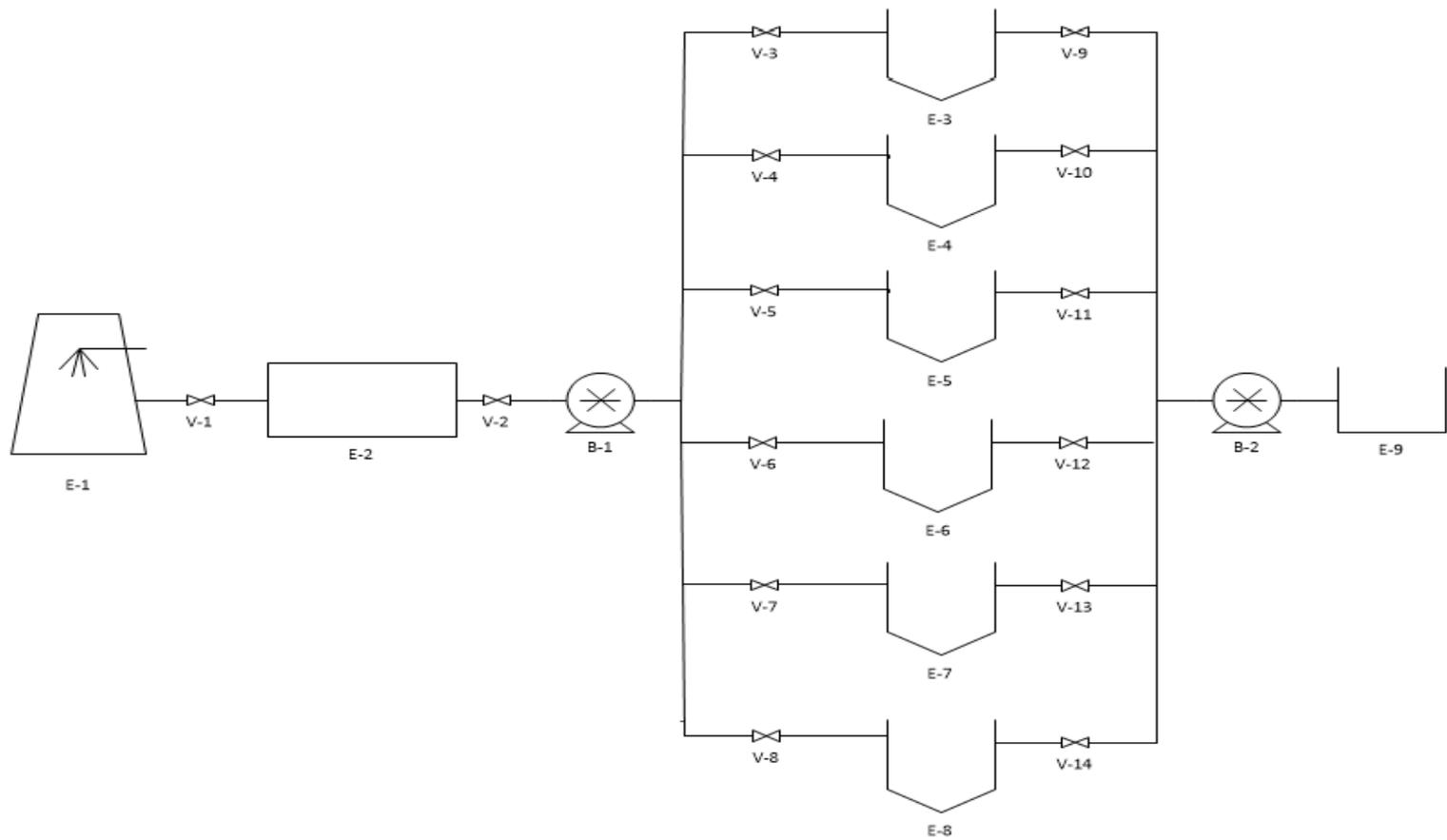
Fuente:

Elaboración

propia

¹¹¹ BONVE. Ningbo Bonve pumps co. LTD. [en línea] citado el 30 de octubre de 2018. Disponible en: <http://en.bvwww.com/>

Figura 36. Diagrama de flujo del proceso (PFD)



Fuente: Elaboración propia

6. EVALUACIÓN FINANCIERA DE LA IMPLEMENTACIÓN DE LA PROPUESTA

En este capítulo se analizará el costo de la implementación de la propuesta teniendo en cuenta el costo de la inversión inicial (construcción del sistema de electrocoagulación en PMP) y el manteniendo del sistema de electrocoagulación.

6.1 INVERSIÓN

En los costos de inversión se encuentra los costos de los materiales, los costos de mano de obra para la construcción del sistema. Por medio del diagrama PFD (Ver figura 36) se calcularon el número de bombas, válvulas y tubería que se necesitan para el proceso de electrocoagulación.

6.1.1 Costos directos. En la tabla 26 se puede observar los costos directos de la inversión

Tabla 26. Costos directos

Descripción del material	Cantidad	Precio unitario (COP)	Precio total (COP)
Lamina ¹¹² de PMMA	10	\$ 2'564.800	\$ 25'648.000
Lámina de hierro ¹¹³	38	\$ 83000	\$ 3'154.000
Fuente de poder ¹¹⁴	1	\$ 2'405.000	\$ 2'405.000
Bomba ¹¹⁵ desplazamiento positivo	2	\$ 6'412.000	\$ 12'824.000
Tubería PVC ¹¹⁶	46	\$ 41990	\$ 1'931.540
Válvula de ¹¹⁷ compuerta	14	\$ 650999	\$ 9'113.986
Total			\$55'076.526

Fuente: Elaboración propia

¹¹² Sunplas - Plásticos, Lda. Polimetilmetacrilato (PMMA). [en línea] citado el 30 de octubre de 2018. Disponible en: <http://www.sunplas.pt/>

¹¹³ Didelco. Lámina de hierro. [en línea] citado el 13 de septiembre de 2018. Disponible en: https://www.didelco.net/interna_producto?id=8399

¹¹⁴ Final Test. Venta de instrumentos de prueba y de medición. [en línea] citado el 13 de septiembre de 2018. Disponible en: <https://www.finaltest.com.mx/category-s/446.htm>

¹¹⁵ BONVE. Ningbo Bonve pumps co. LTD. [en línea] citado el 30 de octubre de 2018. Disponible en: <http://en.bvwww.com/>

¹¹⁶ PAVCO. Tubería de PVC. [en línea] citado el 13 de septiembre de 2018. Disponible en: https://pavco.com.co/tuberia-pvc-alcantarillado-novaloc-pavco?gclid=EA1aIQobChMI4IG_1Iqv3glVCeDICH3v_QS9EAAYAiAAEgKUMfD_BwE

¹¹⁷ Tecval. Válvula de compuerta. [en línea] citado el 13 de septiembre de 2018. Disponible en: http://www.tecval.cl/valvula_de_compuerta.html

6.1.2 Costos indirectos (mano de obra). Teniendo en cuenta que el salario mensual de un ingeniero químico en la empresa PMP es de \$ 1'800.000,00 COP y el de los operarios es \$ 781.242,00 COP; Para la construcción del sistema de electrocoagulación es necesario 5 operarios, 1 ingeniero químico y un tiempo estimado de 3 meses. El costo total de mano de obra es mostrado en la tabla 27.

Tabla 27. *Costos indirectos*

Cargo	Cantidad de empleados	Salario (COP)	Tiempo de trabajo (meses)	Total (COP)
Ingeniero químico	1	\$ 1'800.000,00	3	\$ 5'400.000
Operario	2	\$ 881.242,00	3	\$ 5'287.452
			Total	\$ 10'687.452

Fuente: Elaboración propia

6.2 EGRESOS

Es importante incluir la depreciación anual de los reactores, bombas de desplazamiento positivo y fuente de poder porque la depreciación indica la pérdida de valor debido al desgaste del equipo. La depreciación anual se calcula con la ecuación 20.

6.2.1 Depreciación de los reactores. La depreciación de los reactores se puede observar en la siguiente ecuación.

Ecuación 20. *Depreciación*

$$\text{Depreciación anual} = \frac{\text{Valor activo}}{\text{vida útil del activo}}$$

$$\text{depreciación anual} = \frac{12'824.000}{5 \text{ años}}$$

$$\text{depreciación anual} = 2'564.800$$

6.2.2 Depreciación fuente de poder. La depresión de la fuente de poder se puede observar a continuación.

$$\text{Depreciación anual} = \frac{\$ 2'405.000}{5 \text{ años}}$$

$$\text{Depreciación anual} = 481.000 \text{ COP}$$

6.2.3 Depreciación bombas desplazamiento positivo. La depresión de las bombas se puede observar a continuación.

$$\text{Depreciación anual} = \frac{\$ 6'412.000}{5 \text{ años}}$$

$$\text{Depreciación anual} = \$ 1'282.400 * 2$$

$$\text{Depreciación anual} = \$ 2'564.800$$

6.2.4 Costos de mantenimiento (mano de obra). Es necesario limpiar los electrodos de hierro con agua destilada y lijarlos después de realizar varios procesos de electrocoagulación. Esto permite que el proceso sea eficiente y disminuye los costos, no es necesario remplazarlos cada vez que se usan, se remplazan cuando los electrodos están desgastados.

Para el manteniendo del sistema es necesario 3 operarios.

Tabla 28. *Costos de mantenimiento*

Cargo	Cantidad de empleados	Salario (COP)	Total (COP)
Operario	3	\$ 881.242	\$ 2'643.726

Fuente: Elaboración propia

6.2.5 Energía. Para el cálculo de la energía que se consume durante el proceso de electrocoagulación es necesario utilizar en los valores que se utilizaron para realizar la experimentación de este trabajo de grado. La energía se calcula por medio de la ecuación 10. (Ozyonar & Karagozoglu; 2011, p. 177)

$$E = 14823 \frac{kWh}{m^3}$$

La energía que se necesita para realizar el proceso de electrocoagulación con un tiempo de residencia de 0.5 horas es de 14823 kWh/m³.

Teniendo en cuenta que el costo de energía en condensa para el sector industrial y comercial es de \$ 614,25 pesos por kWh¹¹⁸. Se realiza el cálculo del costo energético para el proceso de electrocoagulación.

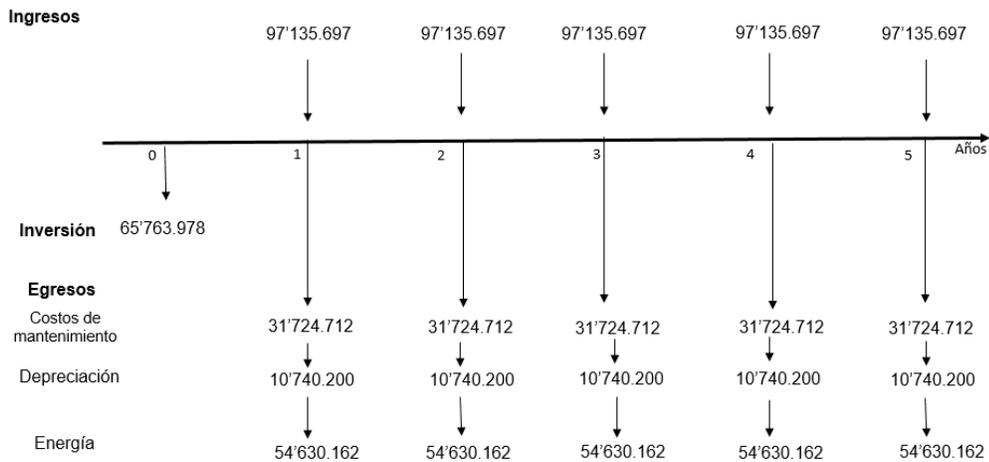
$$\text{costo energetico} = 14823 \frac{\text{kWh}}{\text{m}^3} * \frac{\$ 614,25 \text{ COP}}{\text{kWh}}$$

$$\text{costo energetico} = 9'105.027 \frac{\text{COP}}{\text{m}^3}$$

6.3 MULTAS

En PMP no hay tratamiento de aguas esto generó que la empresa reciba sanciones por un valor de 97'135.697 COP, si se emplea un tratamiento de aguas se puede tomar este valor como ingresos debido a que es un ahorro que se está generando en la empresa. En la figura 37 se puede observar el flujo de caja del proyecto para tratar los vertimientos de la empresa PMP.

Figura 37. Flujo de caja



Fuente: Elaboración propia

¹¹⁸ Condesa. [en línea] citado el 30 de octubre de 2018. Disponible en: <https://www.codensa.com.co/empresas/mi-cuenta/tarifas-de-energia/tarifas>.

6.4 RELACIÓN BENEFICIO – COSTO (B/C)

La relación benéfico costo permite identificar si el proyecto debe ser considerado esta relación se calcula con la siguiente ecuación.

Ecuación 21. *Relación beneficio costo*

$$RB/C = \frac{\sum Vp \text{ ingreso}}{\sum Vp \text{ egreso}}$$

Para el este trabajo de grado se obtuvo un total de 586'789.524 COP de ingresos en comparación al total de los egresos generados por un valor de 586'544.124 COP.

$$RB/C = \frac{586'789.524}{586'544.124}$$

$$RB/C = 1.00$$

Cuando $B/C > 1$ indica que los beneficios superan los costos por esta razón debe ser considerado el proyecto.

7. CONCLUSIONES

- Al comparar los valores de los parámetros fisicoquímicos de la empresa PMP con los valores máximos de los parámetros fisicoquímicos de la resolución 631 del 2015 se evidencia que todos los parámetros DQO, DBO, grasas y aceites, sólidos suspendidos y sólidos sedimentables se encuentran sobre los valores máximos permitidos por la norma.
- Para el tipo de vertimientos generados por PMP se obtienen resultados de remoción mayores al 80% utilizando electrodos de hierro y aluminio en un tiempo de residencia de 4 horas. Las variables donde se obtuvieron resultados mayores al 90 % fueron 12.6 V, 30 minutos y utilizando electrodos de hierro.
- A partir de los análisis de laboratorio se muestra que realizar el sistema de electrocoagulación planteado en este trabajo logra disminuir significativamente los parámetros fisicoquímicos obteniendo un porcentaje de DQO igual al 97.38%, porcentaje de sólidos suspendidos totales igual al 96.38%, porcentaje de sólidos sedimentables totales igual al 99.68% y porcentaje de grasas y aceites igual al 95.96% pero estos no son suficientes para cumplir con los valores exigidos por la norma.
- El sistema propuesto de electrocoagulación es más económico que implementar una PTAR nueva, ya que se aprovecha el uso de las trampas de grasa y el bajo costo de los materiales para su implementación, además el espacio que ocupa es lo suficientemente para no tener que hacer ampliaciones en la planta ni estructuras que permitan su instalación.
- Se obtuvo una relación beneficio – costo mayor de 1 esto indica que el proyecto es viable debido a que los beneficios del proceso de electrocoagulación superan los costos de la construcción e implementación de este debido a que no requiere la contratación de personal especializado o nuevo solo requiere de 3 empleados que remueva la espuma generada y limpie los electrodos entre tratamientos.

8. RECOMENDACIONES

- Se recomienda incluir filtros de arena y carbón activado o implementar otro sistema de pre tratamiento para complementar el método de electrocoagulación para hacer un tratamiento mucho mayor y se logre cumplir con la resolución 631 del 2015.
- Se recomienda realizar el estudio del tipo de geometría del reactor para favorecer la sedimentación de los sólidos.
- Se recomienda agregar coagulantes durante el proceso de electrocoagulación, ya que pueden ayudar a disminuir el tiempo de reacción, o incluso remover más contaminantes de los separados en este trabajo de grado.
- Seguir realizando mejoras al tratamiento propuesto, sea a través del uso de diferentes materiales para los electrodos y agregar elementos que aumenten la conductividad del proceso.

BIBLIOGRAFÍA

ACOSTA NIÑO, G. E., COY BARRERA , C. A., Bourdón Garcia , A., & Cuervo Lumbaque, E. (2013). La electrocoagulación como un tratamiento eficiente para la remoción de metales pesados presentes en aguas residuales. *Facultad de ciencias básicas*, 306-317.

AGUILAR ASCON , E. A. (2015). *Evaluación de la eficiencia de una celda de electrocoagulación a escala laboratorio para el tratamiento de agua* . Lima: Tesis para optar el grado académico de magíster en ciencias ambientales con mención en control de la contaminación y ordenamiento ambiental. Universidad Nacional Mayor De San Marcos. Facultad de ingeniería geológica, minera, metalúrgica y geográfica.

AMAYA CELIS, A. C., NAVAS ESPINOSA, C. M. (2012). *Evaluación del proceso simultáneo de fotocatalisis heterogenea y electrocoagulación (FCEC) para la eliminación de compuestos organicos contaminates en agua residual de la industria litográfica*. Bogotá: Trabajo de grado para optar por el título de ingeniero químico. Universidad de América. Facultad de ingenierias.

ANDALUZ DELGADO , J. C. (2016). *Reducción de materia orgánica e inorgánica presente en agua residual de agroquímicos mediante técnica electroquímica de oxidación avanzada*. Guayaquil : Maestría en gestión ambiental. Universidad de Guayaquil. Facultad de ingeniería química .

ARANGO RUIZ, Á. (2005). La electrocoagulación: una alternativa para el tratamiento de aguas residuales. *Lasallista*, 49-56.

ARBOLEDA CAMACHO , J. M., & HERRERA LÓPEZ, P. J. (2015). *Evaluación de un proceso de electrocoagulación en un reactor tipo batch para la remoción de cromo hexavalente (Cr 6+) con electrodos de aluminio-aluminio y hierro- aluminio en condiciones de laboratorio*. Bogotá: Trabajo de grado. Universidad Santo Tomás. Facultad de ingeniería ambiental .

AYALA GIL , K. A. (2016). *Evaluación de procesos para la remoción de iones cloruro en el agua residual de la planta de alimentos Pepsico (Funza)*. Bogotá: Trabajo de grado Ingeniería química. Universidad de America. Facultad de ingenierías.

BANI SALAMEH, W., AHMAD, H., AL-SHANNAG, M. (2015). Treatment of olive mill wastewater by electrocoagulation processes and water resources management. *World Academy of Science, Engineering and technology international journal of environmental and ecological engineering*, 296-300.

CAMBO CHILLO , N. Á. (2017). *Diseño de un electrocoagulador para aguas industriales clarificadas de la empresa Plusambiente base cantón joya de los sachas*. Riobamba. Trabajo de grado ingeniería química. Escuela superior politécnica de chimborazo. Facultad de ciencias.

CHEN, X., CHEN, G., & YUE, P. L. (2000). Separation of pollutants from restaurant wastewater by electrocoagulation. *ELSEVIER*, 65-76.

FLORENCIO PÉREZ , K., & CIENFUEGOS PÁUCAR, H. (2013). *Tratamiento de agua residual procedente del lodo de perforación del pozo petrolero "Bretaña Norte 95-2-1XD" mediante el proceso electroquímico de electrocoagulación usando electrodos de aluminio*. Lima: Tesis para optar el título profesional de ingeniero químico. Universidad Nacional de ingeniería. Facultad de ingeniería química y textil .

GUANOLUIZA LLIVE, L. E. (2013). *Dimensionamiento de un sistema de electrocoagulación aplicado al tratamiento de aguas residuales domésticas, con y sin irradiación de electrones acelerados*. Bogotá: Trabajo de grado Ingeniería química. Escuela Politécnica Nacional. Facultad de ingeniería química y agroindustria.

HERNÁNDEZ RODRÍGUEZ, B. D. (2016). *Tratamiento acoplado fisicoquímico-electrocoagulación para incrementar la remoción de la materia orgánica de un agua residual de rastro municipal* . Toluca: Tesis de maestría : Ciencias del agua. Universidad Autónoma del estado de México. Facultad de ingeniería.

HOLT, P., BARTON , G., & Mitchell, C. (2005). The future for electrocoagulation as a localised water treatment technology. *ELSEVIER*, 355-367.

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y VERTIFICACIÓN. Compendio de normas para trabajos escritos NTC -1436-6166. Bogotá D.C.: El instituto, 2018. ISBN 9789588585673 153 p.

LÓPEZ ESCOBAR , G. P. (2014). *Diseño de un proceso de electrocoagulación para el tratamiento de aguas residuales de una industria de yogurt*. Santiago : Trabajo de grado ingeniería ambiental en prevención y remediación. Universidad de las Américas. Facultad de ingeniería y ciencias agropecuarias.

MANANGÓN, E., de la Torre, E., & Guevara, A. (2010). Evaluación de la electrocoagulación para tratamiento de efluentes generados por una empresa de mantenimiento de motores. *Revista Politécnica*, 123-129.

MARTÍNEZ NAVARRO , F. (2007). *Tratamiento de aguas residuales industriales mediante electrocoagulación y coagulación convencional* . Ciudad Real : Tesis doctoral en ingeniería química. Universidad de Castilla-La Mancha. Facultad de ciencias químicas.

MEDINA CEVALLOS , J. F., & Peralta Calderon , M. O. (2015). *Validación de un prototipo de electrocoagulación para el tratamiento de aguas residuales de alta carga orgánica presentes en la industria*. Cuenca: Tesis para la obtención de título de ingeniería ambiental. Universidad Politécnica Salesiana. .

MOLLAH, Y., SCHENNACH, R., PARGA, J., & COCKE, D. (2001). Electrocoagulation (EC) — science and applications. *ELSEVIER*, 29-41.

MONSALVE OSORIO , J. A., & Cardona Gómez, S. (2014). *Electrocoagulación para reuso de aguas residuales del proceso de impresión en la industria papelera* . Medellín : Trabajo de grado para optar al título de ingeniería química. Universidad Pontificia Bolivariana. Escuelas de ingenierías.

MORALES BAUTISTA , P. (2015). *Tratamiento de agua residual de biodiésel por electrocoagulación* . México D.F: Tesis para obtener el título de ingeniero químico petrolero. Escuela superior de ingeniería química e industrias extractivas.

MORANTE, G. (2002). Electrocoagulación de aguas residuales. *Revista Colombiana de física*, 484-487.

OJEDA ARMAIGNAC, E., HING CORTÓN, R., & GONZALEZ DÍAZ , Y. (2012). Estudio de la factibilidad del proceso de electrocoagulación para la obtención de sólidos a partir de la vinaza. *CENIC Ciencias Químicas*, 1-14.

OJEDA ARMAIGNAC, E., & HING CORTÓN, R. (2010). Estudio del proceso de electrocoagulación de la vinaza empleando electrodos de aluminio . *Tecnología Química*, 5-15.

OJEDA ARMAIGNAC, E., & HING CORTÓN, R. (2010). Estudio del proceso de electrocoagulación de la vinaza empleando electrodos de hierro . *Tecnología Química*, 21-30.

OÑA PAZMIÑO, B. G., & FALCONÍ CEDILLO , D. R. (2013). Tratamiento avanzado de aguas residuales del proceso de lavado y tinturado de jeans en la empresa "Mundocolor " mediante electrocoagulación. Riobamba: Trabajo de grado ingeniería industrial. Escuela superior politécnica de Chimborazo. Facultad de mecánica .

OZYONAR, F., & KARAGOZOGLU, B. (2011). Operating cost analysis and treatment of domestic wastewater by electrocoagulation using aluminum electrodes. *Polish J. of Environ*, 173-179.

RESTREPO MEJÍA, A. P., ARANGO RUIZ, Á., & GARCÉS GIRALDO, L. F. (2006). La Electrocoagulación: retos y oportunidades en el tratamiento de aguas . *La sallista*, 58-71.

ROBLES MENDOZA, L. K., & López Bueno , A. F. (2017). *Diseño de un prototipo para el tratamiento de aguas residuales domésticas, basado en electrocoagulación*. Bogotá : Trabajo de grado Ingeniero civil. Universidad de la salle. Facultad de ingeniería.

RUBIO HERREÑO, D. R., & SIACHOQUE CABRERA, S. C. (2012). *Evaluación de un sistema acoplado de electrocoagulación / fotocátalisis (EC/FC) para la remoción de carga orgánica contaminante en agua residual de la industria litográfica*. Bogotá: Trabajo de grado para obter el título de ingeniero químico. Universidad de América. Facultad de ingeniería.

ANEXOS

ANEXO A

CARACTERIZACIÓN DEL AGUA TRATADA POR EL MÉTODO DE ELECTROCOAGULACIÓN CON ELECTRODOS DE HIERRO



Laboratorio acreditado
NIT-ISO/IEC-17025:2005
mediante Resolución
número 0076/2014-2017



ACOPI
Premio Nacional
PPIME
Producto Innovador
2008
REG-REA-094 Versión 4.0

REPORTE DE RESULTADOS MUESTRA No. **1111839**

INFORMACION DEL CLIENTE

Empresa	Procesadora de Materias Primas S.A.	Ciudad y Fecha	Bogota D.C., 2018/05/16 15:05		
Nit	830097789	Teléfono	7133060	Fax	7133060
Dirección	Bogotá D. C., Diagonal 47 A Sur N° 61 A 84		E-mail	compras@pmpsa.com.co/ Ing.	

INFORMACION DE LA MUESTRA

Muestra	Agua residual				
Fecha recolección	2018/04/27	Características	Muestra Ambiental	Tipo Envase	Empaque plástico, vidrio, ambar
Fecha Elaboración		Temperatura °C		Tamaño Muestra	2750 mL
Fecha Venimiento		Método muestreo	Puntual	Norma	Resolución No.631 de 2015
Nro Lote		Sitio muestreo	Planta	Muestreo por:	Empresa
Proveedor				Muestreo Fecha/hora:	2018/04/27 12:00

RESULTADOS

Parámetro	Resultado Fecha/Hora	Método	Resultado	Unidades	Especificaciones recomendadas		
					Inferior	superior	Cualitativo
Fisicoquímica							
A DBO5	2018/05/16 15:05	S.M. 5210 B	2.052	mgO ₂ /L			
A DQO	2018/05/16 15:05	S.M. 5220 C	3.279	mgO ₂ /L			
A Grasas y Aceites	2018/05/16 14:05	SM 22nd Edition 5520 B	66	mg/L			
A Sólidos Sedimentables (SSFD)	2018/05/16 08:05	SM 22nd Edition 2540 F	133,3	ml/L			
A Sólidos Suspendidos Totales (SST)	2018/05/09 07:05	SM 22nd Edition 2540 D	1.087	mg/L			

Los resultados son válidos solo para la muestra en referencia y para los ensayos realizados. No se permite la reproducción parcial o total del informe sin previa autorización escrita por parte de Asinal Ltda.
A Parámetros Acreditados, S Parámetros Subcontratados.

Bellisario Acevedo D. Ph.D.
Director técnico

ANEXO B

CARACTERIZACIÓN DEL AGUA TRATADA POR EL MÉTODO DE ELECTROCOAGULACIÓN CON ELECTRODOS DE ALUMINIO



Laboratorio acreditado
NTC-50/IC-17025:2005
mediante Resolución
número 0076/2014-2017



ACOP
Premia Nacional
PYME
Producto Innovador
2008

REPORTE DE RESULTADOS MUESTRA No. **1111839**

REG-REA-094 Versión 4.0

INFORMACION DEL CLIENTE

Empresa	Procesadora de Materias Primas S.A.	Ciudad y Fecha	Bogotá D.C., 2018/05/16 15:05		
Nit	830097789	Teléfono	7133060	Fax	7133060
Dirección	Bogotá D. C., Diagonal 47 A Sur N° 61 A 84	E-mail	compras@pmprsa.com.co/ Ing.		

INFORMACION DE LA MUESTRA

Muestra	Agua residual				
Fecha recepción	2018/04/27	Características	Muestra Ambiental	Tipo Envase	Empaque plástico, vidrio, ambar
Fecha Elaboración		Temperatura °C		Tamaño Muestra	2750 mL
Fecha Vencimiento		Método muestreo	Puntual	Norma	Resolución No.631 de 2015
Nro Lote		Sitio muestreo	Planta	Muestreo por:	Empresa
Proveedor				Muestreo Fecha/hora:	2018/04/27 12:00

RESULTADOS

Parámetro	Resultado Fecha/Hora	Método	Resultado	Unidades	Especificaciones recomendadas		
					Inferior	superior	Cualitativo
Fisicoquímica							
D ORO	2018/05/16 15:05	S.M. 5210 B	2,599	mgO ₂ /l			
D DOO	2018/05/16 15:05	S.M. 5220 C	3,583	mgO ₂ /l			
A Grasas y Aceites	2018/05/16 14:05	SM 22nd Edition 3520 B	103,9	mg/L			
A Sólidos Sedimentables (SSED)	2018/05/16 06:05	SM 22nd Edition 2540 F	152,0	mL/L			
D Sólidos Suspensivos Totales (SST)	2018/05/09 07:05	SM 22nd Edition 2540 D	1,219	mg/L			

Los resultados son válidos solo para la muestra en referencia y para los ensayos realizados. No se permite la reproducción parcial o total del informe sin previa autorización escrita por parte de Asinal Ltda.
A Parámetros Acreditados; S Parámetros Subcontratados

Delisario Avevedo D. Ph.D.
Director técnico

ANEXO C

CARACTERIZACION DEL AGUA TRATADA POR EL MÉTODO DE ELECTROCOAGULACIÓN CON ELECTRODOS DE HIERRO Y 12,6 V



Laboratorio Acreditado
NTC-ISO/IEC-17025:2005
Mediante Resolución
Número 2456 del 2017



AGOPI
Premio Nacional
FFNL
Proyecto Innovador
2010

REG-REA-094 Versión 4.0

REPORTE DE RESULTADOS MUESTRA

No. 1113823

INFORMACIÓN DEL CLIENTE

Empresa	Procesadora de Materias Primas S.A.	Ciudad y fecha	Bogota, 2018-08-24
NIT	830097789-1	Teléfono	7133060
Dirección	Diagonal 47 A Sur N° 61 A - 84	Email	compras@pmpsa.com.co
Fax			N.E.

INFORMACIÓN DE LA MUESTRA

Muestra	Agua Residual Refinería					
Fecha de recepción	2018-08-15	Características	ARD	Tipo de Envase	Vidrio, Ambar	
Fecha de elaboración	N.A.	Temperatura	47 °C	Tamaño Muestra	2000mL	
Fecha de vencimiento	N.A.	Método de Muestreo	Puntual	Norma	Resolución 0631 de 2015	
No. Lote	N.A.	Sitio de Muestreo	Planta	Muestreo por	Jeffeson Mora	
Proveedor	N.A.			Muestreo Fecha/Hora	2018-08-15 - 16:00 PM	

RESULTADOS

Parámetro	Resultado Fecha	Método	Resultado	Unidades	Especificaciones recomendadas		
					Inferior	Superior	Cualitativo
<i>Fisicoquímica</i>							
Sólidos Suspendedos Totales (SST)	2018-08-17	Gravimétrico – secado a 103°C – 105°C, SM 2540 D	564	mgSST/L		Máximo 300,00	
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	2018-08-15	Reflujo cerrado y volumétrico, SM 5220 C	1843	mgO ₂ /L		Máximo 550,00	
Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO5)	2018-08-15	Incubación a 5 días y Modificación de Azida, SM 5210 B, 4500 – O, C	1260	mgO ₂ /L		Máximo 300,00	
Grasas y Aceites	2018-08-27	Extracción Soxhlet, SM 5520 D	51	mg/L		Máximo 30,00	
Sólidos Sedimentables (SSED)	2018-08-17	Volumétrico – Cono Imhoff, SM 2540 F	75	mgSSED/L		Máximo 2,00	

Los resultados son válidos solo para la muestra en referencia y para los ensayos realizados. No se permite la reproducción parcial o total del informe sin previa autorización escrita por parte de Asinal S.A.S. A Parámetros Acreditados, 5 Parámetros Subcontratados

CALIFICACIÓN DE LA MUESTRA

Laboratorio	Observaciones
-------------	---------------

Fisicoquímica

No Aceptable

La Resolución 0631 de 2015 presenta resultados Fisicoquímicos Superiores a los límites establecidos por la normatividad para todos los parámetros analizados.

Belisario Acevedo D. Ph.D.
Director Técnico

www.asinal.com - Tel: +57(1) 605-3555 Fax: 7202144 - Calle 10 Sur No 41-27 (Ciudad Montes), Bogotá D.C. Colombia
SERVICIO NACIONAL E INTERNACIONAL (PANAMA, CENTROAMERICA, CARIBE, ECUADOR)