

EVALUACIÓN TÉCNICO-FINANCIERA DEL MÉTODO DE
ELECTROCOAGULACIÓN PARA TRATAMIENTO DE AGUA ASOCIADA A
PROCESOS PETROLEROS

DIEGO ANDRÉS ROJAS FORERO
EDWARD TIERRADENTRO POLANIA

FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA
FACULTAD DE INGENIERÍAS
PROGRAMA DE INGENIERÍA DE PETRÓLEOS
BOGOTÁ
2018

EVALUACIÓN TÉCNICO-FINANCIERA DEL MÉTODO DE
ELECTROCOAGULACIÓN PARA TRATAMIENTO DE AGUA ASOCIADA A
PROCESOS PETROLEROS

DIEGO ANDRÉS ROJAS FORERO
EDWARD TIERRADENTRO POLANIA

Proyecto integral de grado para optar por el título de
INGENIERO DE PETRÓLEOS

Director
FERNANDO ALBERTO RODRÍGUEZ CAICEDO
Ingeniero de Petróleos

Asesora
ADRIANGELA CHIQUINQUIRÁ ROMERO SÁNCHEZ
Ingeniera de Petróleos

FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA
FACULTAD DE INGENIERÍAS
PROGRAMA DE INGENIERÍA DE PETRÓLEOS
BOGOTÁ
2018

Nota de aceptación:

Presidente del jurado
Ing. Adriangela Chiquinquirá Romero
Sánchez

Jurado 1
Ing. Yatniel Isbel Pirela Ropero

Jurado 2
Geólogo Yimy Alejandro Parra Rojas

Bogotá D.C., 03 de agosto, 2018

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

Vicerrectora Académica y de Posgrados

Dr. ANA JOSEFA HERRERA VARGAS

Decano Facultad de Ingeniería

Dr. JULIO CÉSAR FUENTES ARISMENDI

Director Programa Ingeniería de Petróleos

Dr. JOSÉ HUMBERTO CANTILLO SILVA

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.

DEDICATORIA

En primer lugar quiero dedicarle este logro a Dios, ya que sin Él nada de esto sería posible.

En segundo lugar a mis padres Olga y Mayden, mi hermano Daniel, a quienes amo y siempre han sido mi apoyo durante todo este proceso y a lo largo de mi vida.

A toda mi familia que me ha apoyado y muy especialmente a mi abuelita Lulú, quien sé que desde el cielo me ha bendecido en todo este proyecto.

A mis amigos y cada una de las personas que me apoyó e hizo parte de este proceso. Gracias.

Diego Andrés Rojas Forero.

A Dios por darme la fortaleza necesaria para afrontar los momentos difíciles que se han presentado en esta etapa.

A Eduar Tierradentro y Nelly Polanía quienes nunca se cansaron de apoyarme y acompañarme en cada una de mis decisiones.

A todas aquellas personas que me dieron una palabra de aliento cuando la necesité y me motivaron a continuar realizando mis proyectos.

Edward Tierradentro Polanía.

AGRADECIMIENTOS

Los autores de este proyecto de grado, queremos brindar nuestro más profundo agradecimiento a:

A la empresa TSP Energy por brindarnos la confianza y el apoyo técnico y financiero para la realización de este proyecto.

A los ingenieros Fernando Rodríguez y Luis Rincón, por su apoyo y acompañamiento durante el desarrollo de este proyecto.

A la ingeniera Adriangela Romero Sánchez por su paciencia, orientación y enseñanzas las cuales nos permitieron desarrollar este proyecto de manera satisfactoria.

A los ingenieros César Bertel y Jorge Serrano, quienes con su apoyo fueron de gran ayuda para la culminación del proyecto.

Al profesor Alejandro Pérez y a todo el equipo de investigación de la Pontificia Universidad Javeriana, por contribuir en todo lo relacionado con las pruebas de laboratorio.

Y en general a todos nuestros compañeros, amigos, docentes y personas relacionadas con la universidad, que de una u otra manera estuvieron involucradas en la ejecución de este proyecto y a lo largo de nuestras carreras.

CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCIÓN	28
OBJETIVOS	29
1. GENERALIDADES DEL TRATAMIENTO DE AGUA	30
1.1 MÉTODOS DE TRATAMIENTO DE AGUAS INDUSTRIALES	30
1.1.1 Físicos	31
1.1.2 Químicos	31
1.1.3 Biológicos	31
1.2 TRATAMIENTO DE AGUA EN LA INDUSTRIA PETROLERA	31
1.2.1 Principales componentes del agua asociada a procesos petroleros	32
1.2.1.1 Compuestos de aceites disueltos y dispersos	32
1.2.1.2 Minerales de formación disueltos	33
1.2.1.3 Sólidos de producción	34
1.2.1.4 Aditivos químicos	34
1.2.1.5 Gases disueltos	34
1.2.2 Tratamiento de agua asociada a procesos petroleros	34
1.2.2.1 Tratamientos físicos	36
1.2.2.2 Tratamientos químicos	45
1.2.2.3 Tratamientos biológicos	51
1.2.2.4 Tratamiento de filtrado con membranas	54
1.3 PARÁMETROS DE MEDICIÓN PARA DETERMINAR LA CALIDAD DEL AGUA DE LOS TRATAMIENTOS	57
1.3.1 pH	57
1.3.2 Conductividad	57
1.3.3 Turbidez	57
1.3.4 Color	57
1.3.5 Contenido de aceites y grasas	57
1.3.6 Sólidos suspendidos, disueltos y totales	58

1.4	NORMATIVIDAD RELACIONADA	58
1.4.1	Descripción de la resolución 1207 de 2014	58
1.4.2	Descripción de la resolución 0631 de 2015	59
2.	DESCRIPCIÓN DE LAS GENERALIDADES DEL MÉTODO DE ELECTROCOAGULACIÓN	63
2.1	DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE ELECTROCOAGULACIÓN	63
2.2	VARIABLES QUE AFECTAN LA ELECTROCOAGULACIÓN	66
2.2.1	pH	67
2.2.2	Densidad de corriente	67
2.2.3	Conductividad	68
2.2.4	Temperatura	68
2.2.5	Tiempo	68
2.2.6	Material de los electrodos	68
2.3	REACCIONES EN EL PROCESO DE ELECTROCOAGULACIÓN	69
2.3.1	Ánodo de Hierro (Fe)	69
2.3.2	Ánodo de Aluminio (Al)	70
2.4	TIPOS DE REACTORES DE ELECTROCOAGULACIÓN	71
2.4.1	Reactores tipo Bach	71
2.4.2	Reactor tipo filtro prensa	72
2.4.3	Reactor de electrodo rotativo	72
2.4.4	Reactor de lecho fluidizado	72
3.	DESCRIPCIÓN DEL PROCEDIMIENTO REALIZADO	74
3.1	CONSTRUCCIÓN DE LA CELDA DE ELECTROCOAGULACIÓN	74
3.1.1	Tipo de celda de electrocoagulación	75
3.1.2	Geometría de los electrodos	75
3.1.3	Materiales de los electrodos	76
3.1.3.1	Aluminio	77
3.1.3.2	Hierro	77
3.1.4	Número de electrodos	78
3.2	EQUIPOS ADICIONALES	79
3.2.1	Rectificador de corriente	79
3.2.2	Bomba de agua	80

3.3 PLANOS DE LA CELDA ELECTROCOAGULACIÓN UTILIZADA EN EL TRATAMIENTO	81
3.4 DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE ELECTROCOAGULACIÓN REALIZADO	84
4. DESCRIPCIÓN DE LAS PRUEBAS DE LABORATORIO	86
4.1 CONSIDERACIONES PRELIMINARES	86
4.2 MATRIZ DE PRUEBAS A REALIZAR	86
4.3 DESCRIPCIÓN DE LAS PRUEBAS DE LABORATORIO	87
4.3.1 pH	87
4.3.2 Conductividad	88
4.3.3 Turbidez	88
4.3.4 Color	88
4.3.5 Demanda Química de Oxígeno (DQO)	88
4.3.6 Contenido de aceites y grasas	89
4.3.7 Sólidos suspendidos, disueltos y totales	89
5. CARACTERIZACIÓN DEL AGUA A TRATAR MEDIANTE PRUEBAS DE LABORATORIO	91
5.1 TIPO DE AGUA A TRATAR	91
5.2 CARACTERÍSTICAS FISICOQUÍMICAS DEL AGUA PRODUCIDA	94
5.3 PRESENTACIÓN DE RESULTADOS OBTENIDOS TRAS LAS PRUEBA	95
5.4 COMPARACIÓN DE RESULTADOS OBTENIDOS	98
6. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS	100
6.1 ANÁLISIS DE LA VARIACIONES Y MAGNITUDES RESULTANTES DE LOS PARÁMETROS, CON EL MÉTODO DE TRATAMIENTO MEDIANTE ELECTROCOAGULACIÓN	100
6.1.1 pH	100
6.1.2 Conductividad	100
6.1.3 Demanda Química de Oxígeno (DQO)	101
6.1.4 Turbidez	102
6.1.5 Grasas y aceites	102
6.1.6 Sólidos totales	103
6.1.7 Sólidos suspendidos	103

6.1.8 Sólidos disueltos	103
6.1.9 Color aparente	104
6.1.10 Color real	104
6.2 DIAGNÓSTICO DEL COMPORTAMIENTO DE LOS PARÁMETROS MEDIDOS CON RESPECTO A LA VARIACIÓN DE LOS MATERIALES UTILIZADOS PARA EL PROCESO DE ELECTROCOAGULACIÓN	105
6.3 COMPARACIÓN DE LAS PROPIEDADES OFRECIDAS POR EL TRATAMIENTO POR ELECTROCOAGULACIÓN CON RESPECTO AL MÉTODO DE UTILIZADO CONVENCIONALMENTE	107
6.3.1 Descripción del método de tratamiento actual	107
6.3.2 Comparación de los métodos de tratamiento	108
6.4 ANÁLISIS DEL CUMPLIMIENTO DE LOS PARÁMETROS EXIGIDOS POR LA NOMATIVIDAD PARA LA CALIDAD DE AGUA QUE SE TRATÓ	116
7. EVALUACIÓN FINANCIERA	119
7.1 ANÁLISIS DE COSTOS DE INVERSIÓN	120
7.1.1 Costos de inversión para el tratamiento actual	120
7.1.2 Costos de inversión para el tratamiento por electrocoagulación	120
7.2 ANÁLISIS DE COSTOS DE OPERACIÓN	121
7.2.1 Costos de operación para el tratamiento actual	122
7.2.2 Costos de operación para el tratamiento por electrocoagulación	125
7.3 EVALUACIÓN FINANCIERA	129
7.3.1 Definición del indicador financiero	129
7.3.2 Flujo de caja	131
7.3.3 Cálculo del Costo Anual Uniforme Equivalente (CAUE)	134
7.4 CONCLUSIÓN FINANCIERA	136
8. CONCLUSIONES	137
9. RECOMENDACIONES	140
BIBLIOGRAFÍA	141
ANEXO	148

LISTA DE CUADROS

	pág.
Cuadro 1. Sistemas AOP más comunes.	47
Cuadro 2. Ventajas y desventajas de los sistemas con membranas.	55
Cuadro 3. Procesos de tratamiento con membranas.	56
Cuadro 4. Ventajas y desventajas de la electrocoagulación.	66
Cuadro 5. Parámetros de interés para medir.	87
Cuadro 6. Clasificación del agua de producción según Ebratth.	94
Cuadro 7. Compuestos orgánicos asociados con hidrocarburos.	95

LISTA DE ECUACIONES

	pág.
Ecuación 1. Número de electrodos.	78
Ecuación 2. Determinación del número óptimo de electrodos.	79
Ecuación 3. Densidad de corriente.	85
Ecuación 4. Consumo de energía durante el tratamiento.	122
Ecuación 5. Costos por consumo de energía eléctrica.	123
Ecuación 6. Cálculo del consumo eléctrico del mezclador.	123
Ecuación 7. Cálculo de los costos de por consumo de energía eléctrica del mezclador.	123
Ecuación 8. Costo de la materia prima para el tratamiento.	124
Ecuación 9. Determinación de los costos de la materia prima para el tratamiento químico.	124
Ecuación 10. Potencia eléctrica del rectificador de corriente durante el tratamiento.	125
Ecuación 11. Cálculo de la potencia eléctrica del rectificador de corriente.	126
Ecuación 12. Cálculo del consumo eléctrico del rectificador de corriente.	126
Ecuación 13. Cálculo del consumo eléctrico de la bomba de agua.	126
Ecuación 14. Cálculo de los costos de por consumo de energía eléctrica del rectificador de corriente.	127
Ecuación 15. Cálculo de los costos de por consumo de energía eléctrica de la bomba de agua.	127
Ecuación 16. Cálculo del costo total por consumo de energía eléctrica para el tratamiento por electrocoagulación.	127

Ecuación 17. Cálculo del costo por consumo de materia la materia prima para el tratamiento por electrocoagulación.	128
Ecuación 18. Valor Presente.	130
Ecuación 19. Costo Anual Uniforme Equivalente.	130
Ecuación 20. Cálculo del Valor Presente para el tratamiento químico.	133
Ecuación 21. Cálculo de Valor Presente para el tratamiento por electrocoagulación.	134
Ecuación 22. Cálculo del Costo Anual Uniforme Equivalente para el tratamiento actual.	135
Ecuación 23. Cálculo del Costo Anual Uniforme Equivalente para el tratamiento por electrocoagulación.	135

LISTA DE REACCIONES

	pág.
Reacción 1. Reacciones en el ánodo cuando ocurre la formación de hidróxido férrico.	69
Reacción 2. Reacción en el cátodo cuando ocurre la formación de hidróxido férrico.	70
Reacción 3. Reacción global para la formación de hidróxido férrico.	70
Reacción 4. Reacciones en el ánodo cuando ocurre la formación de hidróxido ferroso.	70
Reacción 5. Reacción en el cátodo cuando ocurre la formación de hidróxido ferroso.	70
Reacción 6. Reacción global para la formación de hidróxido ferroso.	70
Reacción 7. Reacciones en el ánodo de aluminio.	71
Reacción 8. Reacciones en el cátodo de aluminio.	71

LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1. Sistema de tratamiento del agua producida.	36
Figura 2. Proceso de floculación.	37
Figura 3. Sedimentación.	38
Figura 4. Sistema de flotación.	39
Figura 5. Diagrama de flujo de un sistema TORR.	40
Figura 6. Ilustración de la unidad CFU.	42
Figura 7. Separados de placas de flujo cruzado.	43
Figura 8. Diagrama de flujo del proceso C-TOUR.	45
Figura 9. Ensamble básico de un sistema de electrodiálisis.	51
Figura 10. Procedimiento para los fangos activados.	53
Figura 11. Esquema de un filtro percolador.	54
Figura 12. Celda de electrocoagulación.	64
Figura 13. Celda de electrocoagulación con electrodos conectados en serie.	64
Figura 14. Ilustración de un reactor tipo filtro prensa.	72
Figura 15. Reactores tipo electrodo rotativo y lecho fluidizado.	73
Figura 16. Celda de electrocoagulación.	74
Figura 17. Electrodos de aluminio utilizados.	76
Figura 18. Rectificador de corriente utilizado para los tratamientos.	80
Figura 19. Bomba HJ-531 utilizada en el procedimiento.	81

Figura 20. Planos de los soportes para los electrodos dentro de la celda de electrocoagulación.	82
Figura 21. Planos de la celda de electrocoagulación utilizada en la evaluación.	83
Figura 22. Montaje final para realizar tratamiento de agua por electrocoagulación.	84
Figura 23. Medición del pH.	87
Figura 24. Fotómetro multiparámetro de sobremesa HI83099 y kit de reactivos rango alto.	89
Figura 25. Muestra de agua de producción sin tratar.	91
Figura 26. Ciclo del agua de producción.	92
Figura 27. Muestras de agua sin tratar y tratada a diferentes condiciones.	96
Figura 28. Muestra de agua tratada con hierro.	104
Figura 29. Flujo de caja de los costos de operación para el tratamiento químico.	133
Figura 30. Flujo de caja de los costos de operación para el tratamiento por electrocoagulación.	134
Figura 31. Flujo de caja del CAUE para el tratamiento actual.	135
Figura 32. Flujo de caja del CAUE para el tratamiento por electrocoagulación.	136

LISTA DE GRÁFICAS

	pág.
Gráfica 1. Porcentajes de Remoción método químicos y tratamiento con aluminio a 30V.	110
Gráfica 2. pH obtenido con método químico y electrocoagulación con aluminio a 30V.	111
Gráfica 3. DQO obtenido con método químico y electrocoagulación con aluminio a 30V.	112
Gráfica 4. Sólidos suspendidos obtenidos con método químico y electrocoagulación con aluminio a 30V.	112
Gráfica 5. Sólidos disueltos obtenidos con método químico y electrocoagulación con aluminio a 30V.	113
Gráfica 6. Sólidos totales obtenidos con método químico y electrocoagulación con aluminio a 30V.	113
Gráfica 7. Color real obtenido con método químico y electrocoagulación con aluminio a 30V.	114
Gráfica 8. Color aparente obtenido con método químico y electrocoagulación con aluminio a 30V.	114
Gráfica 9. Grasas y aceites obtenidos con método químico y electrocoagulación con aluminio a 30V.	115
Gráfica 10. Turbidez obtenida con método químico y electrocoagulación con aluminio a 30V.	115
Gráfica 11. Conductividad obtenida con método químico y electrocoagulación con aluminio a 30V.	116

LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1. Resumen parámetros resolución 0631 de 2015.	60
Tabla 2. Características del hierro y del aluminio.	77
Tabla 3. Parámetros de operación de la bomba de agua.	80
Tabla 4. Variaciones durante los tratamientos.	85
Tabla 5. Caracterización de agua sin tratar.	96
Tabla 6. Caracterización de las muestras de agua tratadas mediante electrocoagulación.	97
Tabla 7. Porcentajes de remoción para cada parámetro.	97
Tabla 8. Porcentaje de remoción de Fe y Al a 30V.	105
Tabla 9. Porcentaje de remoción para Fe y Al a 60V.	106
Tabla 10. Porcentaje de remoción para Al a 30V y 60V.	106
Tabla 11. Comportamiento de algunas variables fisicoquímicas utilizando $Al_2(SO_4)_3$ como coagulante.	108
Tabla 12. Caracterización y % de reducción para tratamiento con Al a 30V.	109
Tabla 13. Caracterización y % de reducción para el tratamiento mediante coagulación química.	109
Tabla 14. Cumplimiento resolución 0631 del tratamiento de electrocoagulación realizado con aluminio a 30V.	117
Tabla 15. Cumplimiento resolución 0631 del tratamiento de electrocoagulación realizado con aluminio a 60V.	117
Tabla 16. Cumplimiento resolución 0631 del tratamiento de electrocoagulación realizado con hierro a 30V.	117

Tabla 17. Cumplimiento resolución 0631 del tratamiento de electrocoagulación realizado con hierro a 60V.	118
Tabla 18. Costos de inversión para el tratamiento con sulfato de aluminio.	120
Tabla 19. Costos de inversión para el tratamiento por electrocoagulación.	121
Tabla 20. Información para el cálculo de los costos operacionales.	121
Tabla 21. Condiciones durante los tratamientos.	122
Tabla 22. Costos operacionales del tratamiento actual.	125
Tabla 23. Consumo del electrodo de aluminio durante el tratamiento.	127
Tabla 24. Costos operacionales del tratamiento por electrocoagulación.	128
Tabla 25. Costos anuales, expresados en COP, para el tratamiento de 159L de agua mediante la adición de sulfato de aluminio.	132
Tabla 26. Costos anuales, expresados en COP, para el tratamiento de 159L de agua mediante electrocoagulación.	132

ABREVIATURAS

%: Porcentaje.

°C: Grados Celsius.

μS: Microsiemens.

A: Amperios.

AOP: Procesos Avanzados de Oxidación.

BAF: Filtros Biológicos Aireados.

BTEX: Benceno, Tolueno, Enceno y Xileno.

CA: Corriente Alterna.

CAUE: Costo Anual Uniforme Equivalente.

CD: Corriente Directa.

CFU: Unidad Compacta de Flotación.

COP: Pesos Colombianos.

DAP: Precipitadores de Aire Disuelto.

DBO: Demanda Bioquímica de Oxígeno.

DCASH: Double Cone Air Sparged Hydrocyclone.

DQO: Demanda Química de Oxígeno.

EB: Haz electrónico.

ED: Electrodialisis.

EUA: Estados Unidos de América.

FTE: Procesos de congelación-descongelación/evaporación.

FWKO: Free Water Knock Out.

h: Hora.

HAP: Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos.

HTP: Hidrocarburos totales.

Kg: Kilogramos.

kPa: Kilopascales.

KW: Kilowatts.

L: Litros.

MF: Microfiltración.

mL: Mililitros.

mm: Milímetros.

mS: Milisiemes.

NF: Nanofiltración.

nm: Nanómetros.

NORM: Materiales Radioactivos de Origen Natural.

NPC: National Petroleum Council.

NPD: Debinzotiofenos.

NTC: Norma Técnica Colombiana.

NTU: Nephelometric Turbidity Unit.

O&G: Aceites y Grasas.

OI: Ósmosis Inversa.

PAH: Hidrocarburos Poliaromáticos.

PCU: Platinum Cobalt Color.

PPM: Partes por Millón.

PSI: Pounds per Square Inch.

RPA: Reusable Petroleum Adsorbent.

RPM: Revoluciones por Minuto.

TDS: Solidos Totales Disueltos.

TIO: Tasa de Interés de Oportunidad.

TORR: Total Oil Remediation and Recover.

TPH: Hidrocarburos Totales de Petróleo.

TSS: Sólidos Suspendidos Totales.

UF: Ultrafiltración.

US: Ultrasonido.

UV: Ultravioleta.

V: Voltaje.

VP: Valor presente.

WOR: Water Oil Relation.

GLOSARIO

AGENTE COAGULANTE: materiales químicos que se agregan al agua con el fin de crear flóculos, mediante la neutralización de la cargas presentes en las partículas.

ÁNODO: es un electrodo en el que se da una reacción de oxidación, para que mediante la pérdida de electrones de un material éste aumente su estado de oxidación.

BACTERIAS GRAMPOSITIVAS: aquellas bacterias que se tiñen de azul oscuro o violeta al agregar químicos propios del método de la tinción de Gram.

CAPACIDAD BUFFER: es la capacidad de una sustancia para mantener su pH en un valor constante, soportando perturbaciones con la adición de ácidos o bases.

CÁTODO: es un electrodo que sufre una reacción de reducción, por la cual un material disminuye su estado de oxidación al aceptar electrones.

COALESCENCIA: se refiere a la unión de las partículas en suspensión coloidal o de las gotas de una emulsión para formar gotas de tamaños mayores.

CONCENTRACION: es la proporción o relación que hay entre la cantidad de soluto y la cantidad de disolvente en una mezcla.

COPOLIMEROS: macromolécula compuesta por dos o más monómeros, pueden estar unidos de diferentes formas por medio de enlaces químicos.

CORRIENTE ALTERNA: corriente eléctrica variable en la que las cargas eléctricas cambian el sentido del movimiento de manera periódica.

CORRIENTE DIRECTA: es cuando a través de un material conductor se da un paso constante de energía eléctrica que no cambia de sentido a medida que pasa el tiempo.

CUENCA VALLE SUPERIOR DEL MAGDALENA: consiste en una provincia petrolífera, localizada en la región centro-sur de Colombia entre las cordilleras central y oriental, abarcando un área de 26200 Km².

DEMANDA BIOQUÍMICA DE OXIGENO (DBO): es la medida de la cantidad de oxígeno que necesitan los microorganismos para oxidar la materia orgánica biodegradable.

DEMANDA QUÍMICA DE OXIGENO (DQO): representa la medida de la cantidad

de oxígeno que se requiere para oxidar la materia orgánica que está presente en una muestra de agua, se expresa en mg de O₂/L.

DENSIDAD DE CORRIENTE: básicamente representa la intensidad con la que se transmite la corriente eléctrica en un área determinada.

FENOLES: son compuestos orgánicos en cuyas estructuras moleculares contienen un grupo fenol (C₆H₆O) y un anillo aromático unido a lo menos a un grupo hidroxilo (OH).

FLÓCULO: aglomeración de partículas que por la adición de sustancias químicas sufrieron una neutralización de sus cargas lo cual les permitió agregarse en microflóculos que tienden a depositarse en el fondo de los recipientes o ascienden a la superficie por flotación.

FLUIDIZACIÓN: proceso en el que se suspenden partículas sólidas en una corriente de fluido ya sea gaseoso o líquido.

FORMACIÓN: es un volumen de roca, con ciertas propiedades caracterizadas por su litología, ambiente de depositación, materia orgánica, porosidad, etc. Tiene una extensión areal dependiendo del momento en que se depositaron esos sedimentos y que posteriormente se litificaron y cementaron. Posteriormente hace parte de un sistema petrolífero completo.

GRAVEDAD API: representa una comparación entre la densidad del agua y el petróleo para determinar qué tan pesado o liviano es dicho fluido.

HIDROXIDOS BÁSICOS: son los que se forman por la reacción de un óxido de metal con el agua.

INMISCIBLE: que no se presenta mezcla entre las sustancias.

INTERSTICIOS: espacio pequeño entre dos cuerpos o entre dos partes de un mismo cuerpo.

MICROFLÓCULOS: grumo de materia orgánica formado por agregación de sólidos en suspensión de tamaño muy pequeño.

SOLUBILIZACIÓN: la solubilización es cuando un compuesto denominado soluto (ya sea sólido, líquido o gaseoso) se disuelve en otro (solvente).

TURIDEZ: medida del grado de transparencia que pierde el agua o algún otro líquido incoloro por la presencia de partículas en suspensión.

UPSTREAM: incluye las tareas de búsqueda de potenciales yacimientos

de petróleo crudo y de gas natural, tanto subterráneos como submarinos, la perforación de pozos exploratorios, y posteriormente la perforación y explotación de los pozos que llevan el petróleo crudo o el gas natural hasta la superficie.

VOLTAJE: es una magnitud física que cuantifica la diferencia de potencial eléctrico entre dos puntos.

RESUMEN

Para el siguiente proyecto de grado, se tuvo como objetivo principal la evaluación técnico-financiera del método de electrocoagulación para el tratamiento de agua asociada a procesos petroleros, para este caso el agua que se trató fue agua de producción de un campo de la cuenca del Valle Superior del Magdalena ubicado en el departamento de Huila, Colombia.

Para la evaluación técnica se plantearon cuatro escenarios en total, se utilizaron electrodos de hierro y aluminio, a cada uno se le hicieron variaciones del voltaje a 30V y a 60V. Fue necesario realizar la caracterización de las muestras resultantes de los cuatro escenarios y una muestra de agua sin tratamiento, lo anterior para poder comparar y determinar cuál fue el elemento que ofreció un tratamiento más óptimo. Además, se compararon los parámetros medidos, con los parámetros de una muestra tratada mediante el método químico convencionalmente usado por la empresa TSP Energy, y se determinó cuál de las dos metodologías de tratamiento ofrece un agua de mejor calidad y una mejor viabilidad financiera para la empresa.

Posteriormente se evaluó el cumplimiento de la resolución 0631 de 2015 de las cuatro muestras tratadas, donde se hizo una comparación entre los valores obtenidos en cada parámetro seleccionado y los rangos establecidos en dicha normatividad, teniendo como resultado que aunque el método ofrece reducciones importantes, no es suficiente para el cumplimiento de la resolución.

Finalmente se presenta la evaluación financiera del proyecto donde por medio del indicador financiero CAUE se realiza una comparación entre el método químico y el método de electrocoagulación con el mejor escenario seleccionado, donde se tiene como resultado que en términos de costos tiene mayor viabilidad el tratamiento de agua por medio de electrocoagulación.

Palabras clave: Electrocoagulación, Agua Petrolera, Electroodos, Tratamiento Agua, Costo Anual Uniforme Equivalente.

INTRODUCCIÓN

Las dinámicas industriales actuales están migrando hacia una operación mucho más responsable con el medio ambiente y el uso de los recursos naturales. En el desarrollo de la mayoría de las actividades del sector petrolero se utilizan importantes volúmenes de agua, lo cual de cierta manera estaría generando un grave impacto ambiental y un importante crecimiento de la huella hídrica generada por esta industria.

La empresa TSP Energy S.A.S, se encuentra muy comprometida con el cuidado medio ambiental y abre su línea de negocios de corte ambiental, donde se encuentra desarrollando métodos para el tratamiento de agua de las diferentes dependencias de la industria petrolera, para el caso de este estudio se va evaluar tanto técnica como financieramente la implementación del método de electrocoagulación a su portafolio de servicios. Dicho método consiste en la transmisión de corriente eléctrica a través de electrodos que consiguen neutralizar las cargas de los contaminantes generando su aglomeración en partículas de mayor tamaño y haciendo su remoción más sencilla, ya sea por sedimentación o por flotación.

En la actualidad dicho método ha sido probado para tratar aguas residuales de diferentes industrias, con porcentajes de grasas y aceites significativos y según la literatura existente ha presentado buenos resultados. Debido a esto la empresa junto con los investigadores realizan el tratamiento de electrocoagulación para agua de producción petrolera. Dicha agua se caracteriza por tener contenidos importantes de grasas y aceites, sales, metales, sustancias tóxicas, sólidos, entre otras; por esto se plantean cuatro escenarios y se determina cual es el más conveniente para tratar la muestra de agua de producción de estudio.

La selección se realiza mediante la comparación de los valores de los parámetros medidos en el laboratorio para cada uno de los escenarios propuestos y con base en eso se realiza una comparación entre el mejor escenario para electrocoagulación y el método químico actualmente desarrollado en la empresa.

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Evaluar técnico-financieramente la implementación del método de electrocoagulación para el tratamiento de agua asociada a procesos petroleros.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Describir las generalidades del tratamiento de agua asociada a procesos petroleros en Colombia.
2. Describir las generalidades del método de electrocoagulación.
3. Realizar tratamiento por electrocoagulación al agua prevista por la empresa, luego de la caracterización de entrada.
4. Realizar las pruebas de laboratorio al agua prevista por la empresa, posterior a su tratamiento por electrocoagulación, mediante las pruebas seleccionadas.
5. Determinar el elemento químico más apropiado para los electrodos de la celda de electrocoagulación en el tratamiento de agua asociada a procesos petroleros.
6. Analizar los resultados de las pruebas de laboratorio con respecto a la variación de los materiales utilizados en los electrodos y a las propiedades obtenidas con el método de tratamiento utilizado convencionalmente.
7. Evaluar la viabilidad del proyecto mediante el indicador financiero Costo Anual Uniforme Equivalente (CAUE).

1. GENERALIDADES DEL TRATAMIENTO DE AGUA

En este capítulo se presentarán las generalidades del tratamiento de agua, donde se incluyen las técnicas y procedimientos que se llevan a cabo actualmente, se expondrán las metodologías utilizadas a nivel industrial según el nivel de contaminación que presente el agua. Además, se explicarán las técnicas de tratamiento de agua que se realizan en la industria petrolera actualmente para lograr cumplir los requerimientos legales establecidos en cada territorio. Por último, se describirá la importancia que ha tomado el cuidado del medio ambiente, más específicamente las fuentes hídricas, en los temas legales y se mencionarán la normativa colombiana relacionada con este tema.

1.1 MÉTODOS DE TRATAMIENTO DE AGUAS INDUSTRIALES

De acuerdo a las dinámicas industriales actuales encaminadas a una operación amigable con el medio ambiente, las industrias locales y extranjeras se han esforzado por desarrollar métodos de tratamiento de agua que permitan disminuir los volúmenes de agua captada de fuentes naturales. Estos tratamientos han sido diseñados según las condiciones de contaminación en que se presenta el agua y las condiciones en las que se requiere según su posterior uso. Además, la industria deberá realizar el estudio acerca del método más económico a utilizar en función del caudal y el pH con el que se esté tratando.

“En la mayoría de los casos las aguas industriales presentan más de un contaminante, estos pueden ser de tamaños diferentes y estar en estados diferentes, por esto los tratamientos de agua presentan diferentes etapas”¹.

Cruz², en su investigación definió las etapas del tratamiento como:

- **Etapla preliminar.** Busca extraer los sólidos flotantes más grandes y otras partículas indeseables además involucra la eliminación de olores y eliminación de aceites, esto se hace por medio de tamices, grillas y rejillas.
- **Etapla primaria.** Esta fase busca retirar sólidos disueltos y en suspensión que terminarán siendo sedimentados por procesos como flotación, floculación y tamices de malla final.

¹ SANS FONFRÍA, Ramón y RIBAS, Joan de Pablo. Ingeniería ambiental: Contaminación y tratamientos. Barcelona: Marcombo Boixareu Editores, 1989. p. 94.

² CRUZ ANDRADE, Aura María y SIERRA PARRA, Claudia Marcela. Propuesta de una alternativa de tratamiento de aguas residuales en la salsamentaria el Bohemio. Tesis de grado Ing. Química. Bogotá D.C.: Fundación Universidad de América. 2016. p. 26.

- **Etapa secundaria.** Se busca la purificación de las aguas mediante descomposición de materia orgánica disuelta o suspendida.
- **Etapa terciaria:** En esta etapa se busca acondicionar el agua según las condiciones requeridas de su uso posterior o disposición.

En estas etapas pueden incluirse diferentes tipos de tratamiento, inclusive pueden existir fusiones entre métodos físicos, químicos y biológicos.

1.1.1 Físicos. Los procesos físicos son todos aquellos que utilizan fuerzas físicas o mecánicas, la mayor parte de los tratamientos utilizan fuerzas físicas, pero existen algunos mecanismos que son exclusivos para la fase de pre tratamiento.³

1.1.2 Químicos. Este tipo de tratamiento es el que necesariamente involucra la adición de reactivos o sustancias químicas, con el fin de modificar propiedades químicas de un compuesto⁴.

1.1.3 Biológicos. Estos tratamientos tienen como fin la coagulación y eliminación de sólidos coloidales que no son sedimentables en procesos primarios. En este tratamiento se logra la transformación de nutrientes en tejido celular y diferentes gases.⁵

1.2 TRATAMIENTO DE AGUA EN LA INDUSTRIA PETROLERA

“La industria de petróleo y gas se caracteriza por el gran volumen de agua consumida y generada durante las actividades de extracción *–upstream–*; y la generación de aguas residuales complejas asociadas con las actividades de refinación *–downstream–*. Considerando la producción global de barriles de petróleo y agua asociada, la proporción agua-petróleo es aproximadamente 3:1. El volumen global de agua producida es hasta 39,5 millones de metros cúbicos por día”⁶.

³ SANS FONFRÍA, Ramón y RIBAS, Joan de Pablo. Ingeniería ambiental: Contaminación y tratamientos. Barcelona: Marcombo Boixareu Editores, 1989. p. 95.

⁴ Ibid., p.100.

⁵ Ibid., p.

⁶ JIMÉNEZ, S., *et al.* State of the art of produced water treatment. En: Chemosphere. 2017. vol. 192, p. 5.

Si el agua producida cumple los criterios de calidad, esta puede ser reusada dentro de procesos de producción de gas y petróleo, o incluso propósitos como irrigación, ganadería, almacenamiento y otros usos industriales. Para estos fines se necesitan tratamientos específicos de acuerdo con los requerimientos para cada aplicación⁷.

1.2.1 Principales componentes del agua asociada a procesos petroleros.

Como afirma Veil, *et al.*⁸ en su estudio, las propiedades físicas y químicas del agua varían considerablemente dependiendo de la localización geográfica del campo, la formación geológica con la cual ha estado en contacto el agua por miles de años y el tipo de hidrocarburo que se está produciendo. Las propiedades y volumen del agua pueden variar a lo largo de la vida del yacimiento.

Si bien no es posible describir el agua producida utilizando un solo conjunto de propiedades químicas y concentraciones, varios grupos de componentes están presentes en la mayoría de los tipos de agua producida. El *National Petroleum Council (NPC)*⁹ de Estados Unidos, determina que los principales componentes presentes en el agua producida son:

- Sales (expresado como salinidad, TDS o conductividad eléctrica).
- Aceites y grasas.
- BTEX (benceno, tolueno, etilbenceno y xilenos).
- PAH (hidrocarburos poli aromáticos)
- Ácidos orgánicos.
- Fenol.
- Compuestos naturales orgánicos e inorgánicos.
- Aditivos químicos usados en perforación, fracturamiento y operaciones del pozo pueden tener algunas propiedades tóxicas.

1.2.1.1 Compuestos de aceites disueltos y dispersos. El agua contiene diferentes compuestos orgánicos debido al contacto con el petróleo, estos compuestos se pueden encontrar dispersos en el agua como pequeñas gotas de crudo o disueltos en la misma. “El aceite es un contaminante importante en el agua ya que puede generar efectos tóxicos en los lugares de descarga. Esto contribuye con la demanda biológica de oxígeno y afecta principalmente a los ecosistemas

⁷ Ibid., p. 6.

⁸ VEIL, J. A., *et al.* A white paper describing produced water from production of crude oil, natural gas, and coal bed methane. United States, US Department of Energy (US), 2004. p. 3. DOI: 10.2172/821666.

⁹ TECHNOLOGY SUBGROUP OF THE OPERATIONS & ENVIRONMENT TASK GROUP. Management of produced water from oil and gas wells. United States, The National Petroleum Council (NPC), 2011. Paper #2-17. p. 8.

acuáticos o marinos. Usualmente el tamaño de las gotas de aceite debería ser entre cuatro a seis micrones, sin embargo, este varía entre dos a 30 micrones. Los tratamientos actuales logran disminuir las gotas a tamaños hasta de diez micrones”¹⁰. Según Faksness¹¹, algunos de los hidrocarburos semi-solubles que se pueden encontrar en el agua producida son: benceno, tolueno etilbenceno y xileno (BTEX); hidrocarburos poliaromáticos (PAH); naftenos, fenantrenos y debinzotiofenos (NPD), ácidos orgánicos, fenol y alquifenol.

1.2.1.2 Minerales de formación disueltos. El contenido inorgánico del agua producida está relacionado a las características geofísicas del pozo. Estos minerales están representados principalmente por sales, materiales radioactivos y metales pesados.

- **Cationes y aniones.** “Cationes como Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Ba^{2+} , Sr^{2+} , Fe^{2+} y aniones como Cl^- , SO_4^{2-} , CO_3^{2-} , HCO_3^- afectan la composición química del agua en términos de salinidad, pH y potencial incrustante”¹². “La salinidad del agua producida puede variar entre 1.000 ppm hasta 250.000 ppm”¹³. La salinidad es un factor importante para determinar el destino del agua de producción, ya sea reúso o vertimiento en cuerpos marinos. Fakhru’l-Razi, *et al.*¹⁴, afirman que generalmente el agua producida tiene mayor concentración de sulfatos que el agua de mar, sin embargo, hay lugares donde debido a la alta concentración de sulfatos en el agua marina, esta es inyectada para procesos de recobro mejorado.

- **Metales pesados.** “El agua contiene trazas de metales pesados de origen natural tales como cadmio, cromo, cobre, plomo, mercurio, níquel, plata y zinc. La concentración de los metales pesados en el agua depende de la edad del pozo y de la formación geológica de la cual fue extraída”¹⁵.

¹⁰ DURAISAMY, Rangarajan T.; HEYDARI BENI, Ali y HENNI, Amr. State of the Art Treatment of Produced Water. En: Water Treatment. Regina, InTech, 2013. p. 200.

¹¹ FAKSNESS, Liv-Guri; GRINI, Per Gerhard y DALING, Per S. Partitioning of Semi-Soluble Organic Compounds between the Water Phase and Oil Droplets in Produced Water. En: Marine Pollution Bulletin. 2004. vol. 48, no. 7, p. 733.

¹² JIMÉNEZ, S., *et al.* State of the art of produced water treatment. En: Chemosphere. 2017. vol. 192, p. 13.

¹³ PITRE, R. L. Produced Water Discharges into Marine Ecosystems. En: Annual Offshore Technology Conference (16: 7-9, mayo: Houston, Texas, USA). Offshore Technology Conference, 1984. p. 129.

¹⁴ FAKHRU’L-RAZI, Ahmadun, *et al.* Review of technologies for oil and gas produced water treatment. En: Journal of Hazardous Materials. vol. 170, no. 2, p. 533.

¹⁵ *Ibid.*, p. 533.

- **Materiales radioactivos de origen natural (NORM).** “Los NORM son generados por las formaciones geológicas que contienen el fluido, los materiales radioactivos más comunes son el radio (Ra) y el bario (Ba). El contenido de este tipo de compuestos puede generar incrustaciones o sedimentación de los mismos. Los NORM más comunes en el agua producida son ^{226}Ra y ^{228}Ra ”¹⁶.

1.2.1.3 Sólidos de producción. Los sólidos de producción son un rango de materiales dentro de los cuales están: sólidos de formación, productos para la corrosión e incrustación, bacterias, ceras y asfáltenos. Este tipo de compuestos influyen en el agua debido a que algunos químicos tóxicos contribuyen a la supervivencia de microorganismos (generalmente bacterias grampositivas), las bacterias pueden generar corrosión o taponamiento de las tuberías. Algunas sustancias inorgánicas como SiO_2 , Fe_2O_3 , Fe_3O_4 y BaSO_4 se pueden encontrar en el agua como sólidos suspendidos¹⁷.

1.2.1.4 Aditivos químicos. “Durante la producción de hidrocarburos se adicionan diferentes químicos para evitar problemas durante la operación, tanto la etapa de *upstream* como la etapa *downstream*. Algunos de estos aditivos son: aditivos para estimulación, inhibidores de corrosión e incrustación, rompedores de emulsiones, antiespumantes, entre otros. Habitualmente la concentración de aditivos químicos es menos de 0,1 ppm”¹⁸.

1.2.1.5 Gases disueltos. “Los gases más comunes presentes en el agua producida son CO_2 , O_2 , H_2S e hidrocarburos volátiles. Grandes cantidades de estos están presentes en las salmueras; y su solubilidad varía con propiedades como la salinidad, temperatura y presión”¹⁹.

1.2.2 Tratamiento de agua asociada a procesos petroleros. Dado que el agua producida es considerada un residuo, el manejo de esta conlleva costos para las compañías. Fakhru'l-Razi, *et al.*²⁰, jerarquizan tres niveles para manejar el agua producida y así prevenir la contaminación por la misma:

¹⁶ JIMÉNEZ, S., *et al.* State of the art of produced water treatment. En: Chemosphere. 2017. vol. 192, p. 13.

¹⁷ FAKHRU'L-RAZI, Ahmadun, *et al.* Review of technologies for oil and gas produced water treatment. En: Journal of Hazardous Materials. vol. 170, no. 2, p. 533.

¹⁸ *Ibid.*, p. 533.

¹⁹ JIMÉNEZ, S., *et al.* State of the art of produced water treatment. En: Chemosphere. 2017. vol. 192, p. 14.

²⁰ FAKHRU'L-RAZI. *Op. cit.*, p. 535.

- Minimizar la producción de agua.
- Reusar y reciclar el agua.
- Disposición final del agua.

Como se ha mencionado anteriormente, las características del agua producida pueden variar dependiendo del lugar donde se esté extrayendo. Cada ubicación tiene diferentes condiciones las cuales modificarán la composición del agua, así mismo los requerimientos legales varían dependiendo del lugar. Además de la ubicación del pozo, existen factores que inciden a la hora de escoger la tecnología que se utilizará para tratar el agua²¹:

- Propiedades físicas y químicas del agua.
- Volumen de agua generada.
- Opciones de tratamiento y disposición permitidas legalmente en el lugar.
- Factibilidad técnica y económica de las opciones, incluyendo transporte y logística.
- Disponibilidad de la infraestructura adecuada para la disposición.
- Voluntad de la compañía para emplear alguna tecnología en particular, incluyendo su preocupación sobre potenciales responsabilidades.
- Costos relacionados con el cumplimiento de los requerimientos y restricciones establecidas por el ente regulatorio.

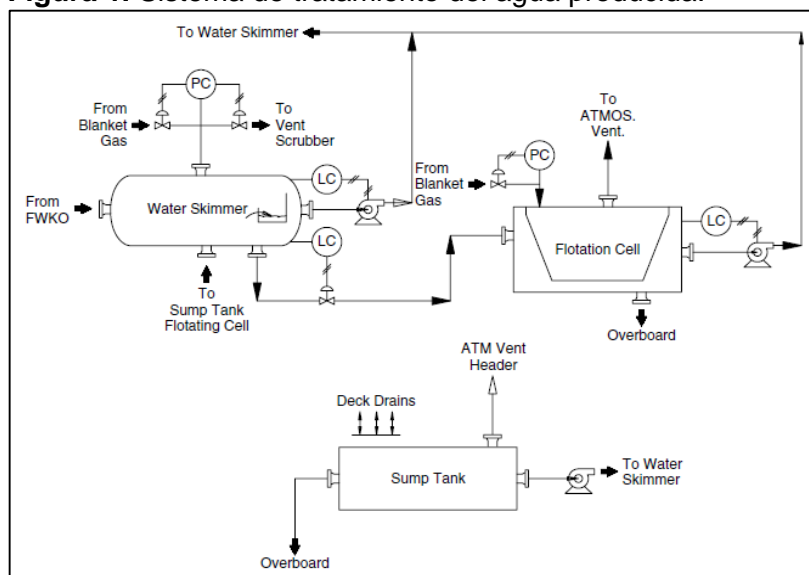
Tanto en operaciones costa afuera como en superficie, el objetivo más importante es la disminución o remoción de grasas y aceites (O&G). La disminución de los niveles de O&G contribuye a mitigar el impacto en la flora y fauna de los ecosistemas donde se dispondrá el agua. Por otro lado, para operaciones de reinyección evita el taponamiento o daño de las bombas y equipos. “El rango de concentración de O&G al que se desea llegar mediante los métodos convencionales esta entre 30-40 mg/L, dependiendo de la ubicación”²².

La Figura 1 muestra el sistema básico de tratamiento del agua producida, en donde se puede observar que el fluido previamente separado en un FWKO pasa por una serie de recipientes y tanques los cuales ayudan a separar algunos contaminantes del agua que posteriormente, de ser necesario, pasará por tratamientos más específicos para llevarla a las condiciones de calidad requeridas.

²¹ TECHNOLOGY SUBGROUP OF THE OPERATIONS & ENVIRONMENT TASK GROUP. Management of Produced Water from Oil and Gas Wells. United States, The National Petroleum Council (NPC), 2011. Paper #2-17. p. 8.

²² JIMÉNEZ, S., *et al.* State of the art of produced water treatment. En: Chemosphere. 2017. vol. 192, p. 14.

Figura 1. Sistema de tratamiento del agua producida.



Fuente: ARNOLD, Ken y STEWART, Maurice. Chapter 2 - Process Selection. En: Surface Production Operations. 3 ed. Burlington: Gulf Professional Publishing, 2008. p. 45.

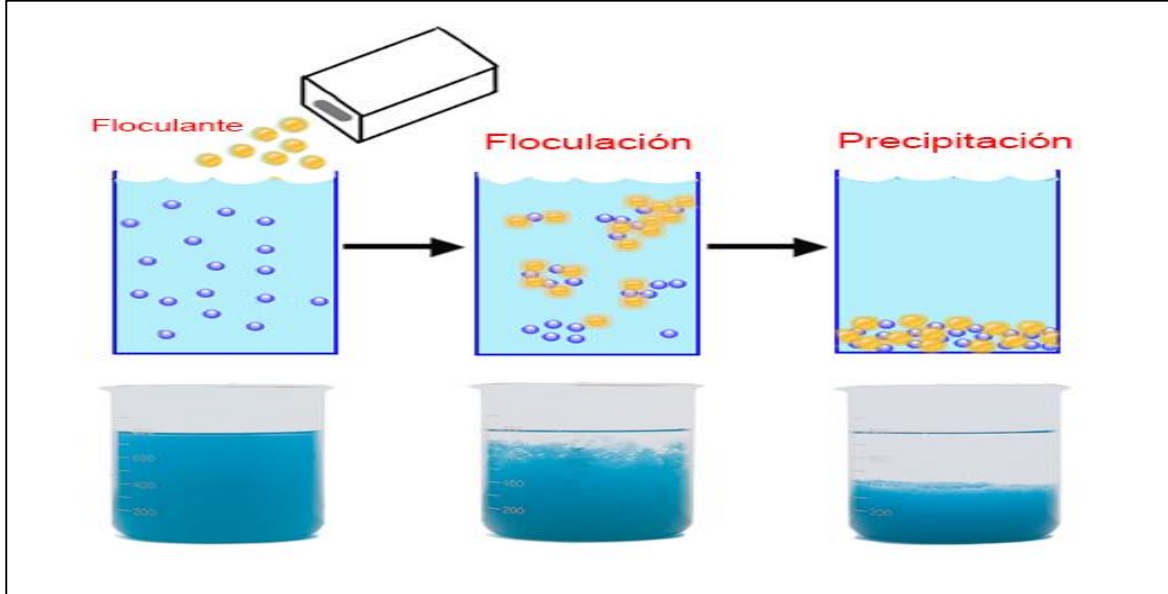
Muchas veces los métodos convencionales no son suficientes para llevar el agua a condiciones de reúso, por esta razón ha surgido la necesidad de implementar métodos terciarios de tratamiento, los cuales van enfocados a la remoción de micro y nanopartículas, compuestos volátiles, compuestos orgánicos extraíbles, amonio, sulfuro de hidrógeno y la reducción de la salinidad.

1.2.2.1 Tratamientos físicos.

- **Floculación.** Durante este proceso se realiza agitación moderada y continua del agua para que se dé una aglomeración de las partículas y se desestabilicen durante la coagulación, con esto se busca formar microfloculos con un peso superior del agua, compactar el floculo disminuyendo el grado de hidratación y así producir baja concentración volumétrica para ser removidos fácilmente por sedimentación y filtración²³. En la Figura 2 se puede observar el proceso de floculación causado por la adición de un químico floculante y su resultado final en el que los sólidos aglomerados se precipitan.

²³ ANDÍA CÁRDENAS, Yolanda. Tratamiento de agua: Coagulación y floculación. Lima: SEDAPAL, 2000. p. 33.

Figura 2. Proceso de floculación.



Fuente: HUUUUUULATODOS. Investigar los diferentes tipos de floculación que se aplican en el proceso de refinación de azúcar [en línea]. 2015- [citado el 26 de febrero de 2018]. Disponible en: <https://loshijosdegudinio.wordpress.com/2015/05/22/floculacion/>

- **Sedimentación.** Durante este proceso se lleva a cabo la eliminación de partículas apoyándose en las fuerzas de gravedad, en la Figura 3 se puede observar como producto de las fuerzas de gravedad las partículas sólidas se depositan en el fondo del recipiente. Según la cantidad de sólidos suspendidos y su tendencia a formar flóculos existen 4 tipos de sedimentación²⁴.

- **Sedimentación de Tipo 1 o de Partículas Discretas.** Hay una baja concentración de sólidos, las partículas sedimentan como entidades individuales y no interactúan entre ellas. Este tipo de sedimentación es la que se utiliza para eliminar las arenas en las aguas residuales²⁵.

- **Sedimentación de Tipo 2.** Hay una baja concentración de sólidos en suspensión en el agua, pero las partículas interactúan entre ellas y forman flóculos (grupos de partículas adheridas entre sí). La floculación es una operación muy importante cuando tenemos coloides presentes en el agua. Los coloides son partículas netamente cargadas, por lo que no sedimentan por sí mismas mediante la adición de coagulantes y floculantes, conseguimos desestabilizar estas cargas y posibilitamos que estas partículas sedimenten²⁶.

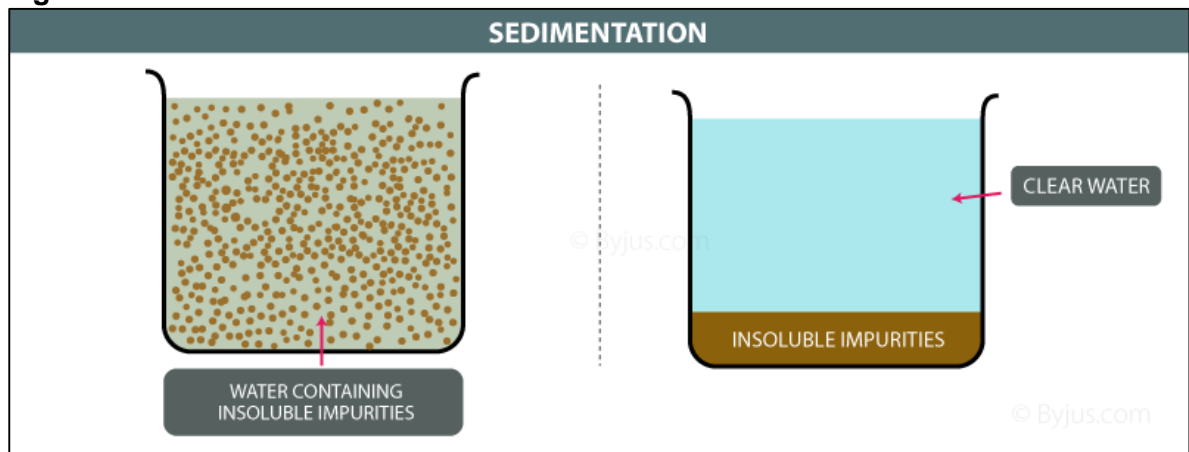
²⁴ Sedimentación [en línea]. Madrid: IMAGUA Water Technologies S.L., 2018- [citado el 24 febrero de 2018]. Disponible en: <http://www.imagua.es/pages/index/sedimentacion>.

²⁵ Ibid.

²⁶ Ibid.

- **Sedimentación de Tipo 3 o Retardada o Zonal.** Este tipo de sedimentación es característica de suspensiones con una elevada concentración de sólidos. Las partículas se adhieren entre sí y la sedimentación se produce en bloque o pistón. Las interacciones entre las partículas provocan una disminución de la velocidad de sedimentación de cada una de ellas. Se caracteriza porque hay una capa límite bien definida entre la masa sedimentable y el líquido sobrenadante²⁷.
- **Sedimentación de Tipo 4 o de Compresión.** La sedimentación por compresión es la que típicamente se da en el fondo de los clarificadores en un proceso de lodos activos. La concentración de sólidos es tan grande que se ha creado una estructura, y la única manera de progresar en la sedimentación es mediante la compresión ejercida por el peso de las nuevas partículas que se van depositando encima de las ya existentes²⁸.

Figura 3. Sedimentación.



Fuente: [Anónimo]. Sedimentation [en línea]. 2016- [citado el 26 de febrero de 2018]. Disponible en: <https://byjus.com/chemistry/sedimentation/>

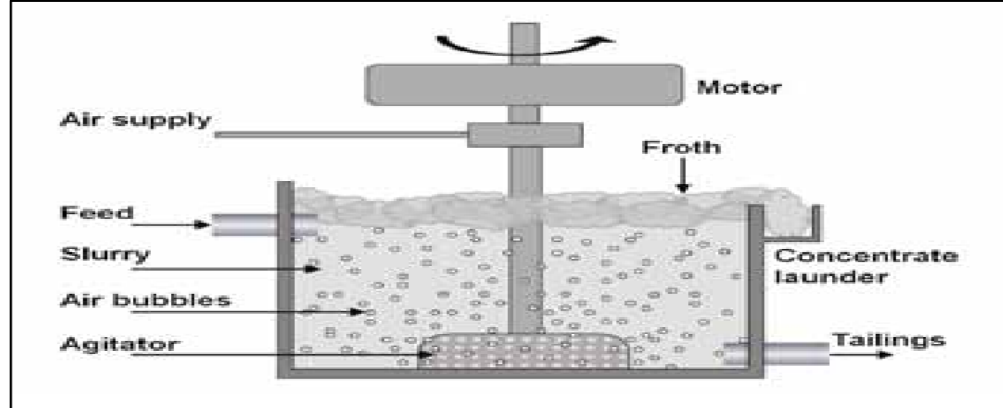
- **Flotación.** Los procedimientos de flotación son comúnmente utilizados para la separación de sólidos dispersos y líquidos inmiscibles suspendidos en una fase líquida, para lo anterior se introducen finas burbujas de aire en la fase líquida, dichas burbujas se adhieren a las partículas contaminantes y forman aglomerados con densidad menor a la fase líquida lo cual permite que las partículas asciendan a superficie y su remoción sea mucho más sencilla²⁹. En la Figura 4 es posible identificar las burbujas que generan que las partículas contaminantes se mantenga en la superficie para su remoción.

²⁷ Ibid.

²⁸ Ibid.

²⁹ FORERO, J. E.; DÍAZ, J. y BLANDÓN, V. R. Diseño de un nuevo sistema de flotación para tratamiento de aguas industriales. En: Revista Ciencia, tecnología y futuro. Diciembre, 1999. vol. 1, no. 5, p. 67.

Figura 4. Sistema de flotación.



Fuente: STRAND, Anders, *et al.* Selective froth flotation of pitch components from spruce TMP process water. En: Appita Journal. Diciembre, 2012. vol. 65, no. 4, p. 338.

- **Adsorción.** “La adsorción es un método utilizado para remover compuestos orgánicos dispersos mediante la utilización de carbón activado, organoarcilla, copolímeros, zeolitas y resinas. La combinación de carbón activado y organoarcilla es eficiente para la remoción de hidrocarburos totales de petróleo (TPH). Los copolímeros pueden reducir hasta en un 85% el contenido de O&G. Las zeolitas son utilizadas como resinas de intercambio iónico, esto para adsorber los compuestos orgánicos disueltos”³⁰.

Fakhrul-Razi, *et al.*³¹, explican una tecnología llamada *Total Oil Remediation and Recover (TORR)* que consiste en un sistema multi-fásico de adsorción y separación.

La Figura 5 muestra el diagrama de la tecnología TORR, cuyo principio de funcionamiento es hacer pasar el fluido a tratar por un medio adsorbente, en este caso un material a base de poliuretano llamado RPA (*Reusable Petroleum Adsorbent*), el cual tiene características oleofílicas, hidrofóbicas y coalescentes. Cuando el fluido pasa por el medio adsorbente, este adsorbe las gotas de aceite y permite que estas se unan para formar gotas más grandes y así por flotación pueden salir por la parte superior de la recámara, mientras que el agua tratada sale por los costados de la misma. La capacidad de remoción del método es para gotas de tamaños iguales o mayores a dos micras.

La actuación de los materiales de adsorción se puede ver afectada por factores como³²:

³⁰ DURAISAMY, Rangarajan T.; HEYDARI BENI, Ali y HENNI, Amr. State of the Art Treatment of Produced Water. En: Water Treatment. Regina, InTech, 2013. p. 200.

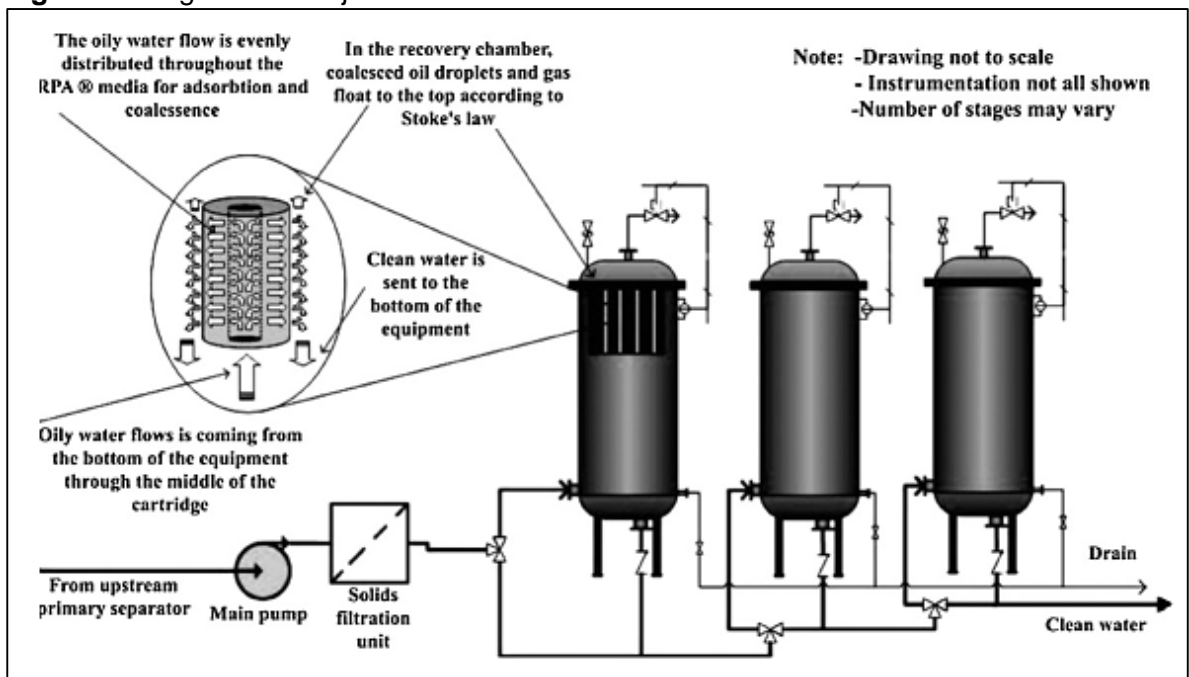
³¹ FAKHRU'L-RAZI, Ahmadun, *et al.* Review of technologies for oil and gas produced water treatment. En: Journal of Hazardous Materials. vol. 170, no. 2, p. 537.

³² *Ibid.*, p. 536.

- Temperatura y pH.
- Aceite suspendido.
- Baja concentración de metales pesados.
- Contaminantes disueltos (químicos orgánicos).
- Alta salinidad.

El tratamiento por medio de adsorción es el método que brinda las mejores calidades del agua. Sin embargo, el alto costo de instalación y mantenimiento de esta tecnología es su principal desventaja, por esta razón se justifica utilizarla en situaciones especiales³³.

Figura 5. Diagrama de flujo de un sistema TORR.



Fuente: FAKHRU'L-RAZI, Ahmadun, *et al.* Review of technologies for oil and gas produced water treatment. En: Journal of Hazardous Materials. vol. 170, no. 2, p. 536.

• **Filtros de arena.** “Esta tecnología ayuda a remover los sólidos finos que no se asentaron en el separador, con una eficiencia de más del 90%. Sin embargo, antes de realizar la filtración del agua, se sugiere hacer los siguientes tres pretratamientos:

- Ajuste del pH para iniciar la reacción de oxidación.
- Airear la unidad aumentar la concentración de oxígeno para la reacción.

³³ JIMÉNEZ, S., *et al.* State of the art of produced water treatment. En: Chemosphere. 2017. vol. 192, p. 24.

– Unidad de separación de sólidos para lograr el asentamiento de los sólidos precipitados”³⁴.

• **Ciclones.** Para Jiménez, *et al.*³⁵, los ciclones son mecanismos que utilizan la fuerza centrífuga para reducir la concentración de compuestos dispersos en el agua producida. Los compuestos dispersos pueden tener un tamaño de cinco a 15 μm . Los ciclones generalmente son diseñados para la separación líquido-líquido, sin embargo, se han diseñado separadores de tres fases para retirar los sólidos y el crudo disuelto. “No obstante, una desventaja de utilizar ciclones es la baja eficiencia para remover compuestos disueltos”³⁶.

La unidad compacta de flotación (CFU por sus siglas en inglés) que se muestra en la Figura 6, fue desarrollada por la empresa Epcon Offshore, Knudsen, *et al.*³⁷, la describen como un separador vertical diseñado principalmente para operaciones *offshore*, capaz de separar tres fases (petróleo/agua/gas) que utiliza la fuerza centrífuga y la flotación del gas para lograr dicha separación. El aceite y el gas salen por la parte superior de la unidad, mientras que el agua tratada sale por el fondo directamente al mar. “La eficiencia de este sistema para remover los compuestos dispersos en el agua está entre el 50% y el 70%”³⁸.

³⁴ FAKHRU’L-RAZI, Ahmadun, *et al.* Review of technologies for oil and gas produced water treatment. En: Journal of Hazardous Materials. vol. 170, no. 2, p. 537.

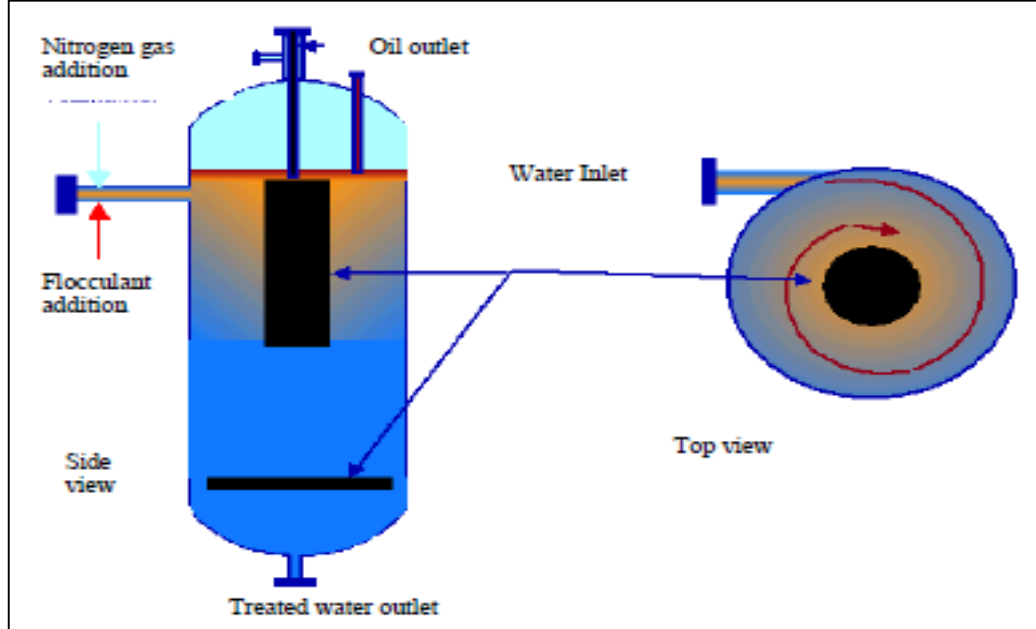
³⁵ JIMÉNEZ, S., *et al.* Op. cit., p. 26.

³⁶ DURAISAMY, Rangarajan T.; HEYDARI BENI, Ali y HENNI, Amr. State of the Art Treatment of Produced Water. En: Water Treatment. Regina, InTech, 2013. p. 202.

³⁷ KNUDSEN, B. L., *et al.* Meeting the Zero Discharge Challenge for Produced Water. En: SPE International Conference on Health, Safety, and Environment in Oil and Gas Exploration and Production (7: 29-31, marzo: Calgary, Alberta, Canadá). Society of Petroleum Engineers, 2004. p. 3.

³⁸ FAKHRU’L-RAZI, Ahmadun, *et al.* Review of technologies for oil and gas produced water treatment. En: Journal of Hazardous Materials. vol. 170, no. 2, p. 537.

Figura 6. Ilustración de la unidad CFU.



Fuente: KNUDSEN, B. L., *et al.* Meeting the Zero Discharge Challenge for Produced Water. En: SPE International Conference on Health, Safety, and Environment in Oil and Gas Exploration and Production (7: 29-31, marzo: Calgary, Alberta, Canadá). Society of Petroleum Engineers, 2004. p. 3.

Otra unidad de este tipo propuesta por Liu, *et al.*³⁹, es el *double cone air sparged hydrocyclone* (DCASH) este tipo de ciclón fue diseñado principalmente para tratar aguas con alto contenido de polímeros, por ejemplo, cuando se realizan procesos de recobro mejorado con inyección de polímeros. Este sistema utiliza burbujas de aire las cuales, al ser rociadas al fluido, mejoran la eficiencia de separación del hidrociclón y la calidad final del agua.

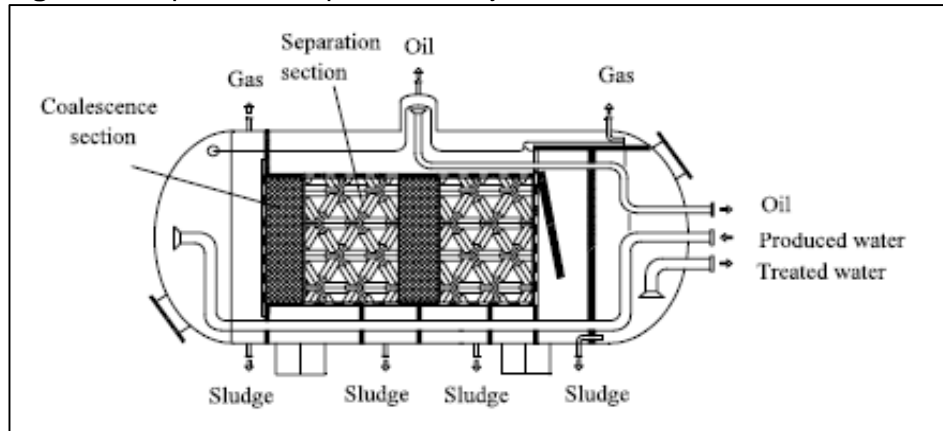
Además de la unidad de DCASH para tratar aguas con polímeros. Deng, *et al.*⁴⁰, propusieron un separador de agua y aceite de flujo cruzado, el cual consiste en hacer pasar el fluido por un separador de placas horizontal con secciones de fusión y separación. En la sección de fusión las gotas de petróleo se unen para formar gotas más grandes y fáciles de remover. De esta manera, en la sección de separación las gotas más grandes formadas son removidas del agua y extraídas por la parte superior del separador, mientras que por otro lado las partículas sólidas

³⁹ LIU, Shumeng, *et al.* Treatment of Produced Water from Polymer Flooding Process Using a New Type of Air Sparged Hydrocyclone. En: SPE Asia Pacific Health, Safety and Environment Conference and Exhibition (19-20, septiembre: Kuala Lumpur, Malaysia). Society of Petroleum Engineers, 2005. p. 1.

⁴⁰ DENG, Shubo, *et al.* Produced water from polymer flooding process in crude oil extraction: characterization and treatment by a novel crossflow oil–water separator. En: Separation and Purification Technology. Diciembre, 2002. vol. 29, no. 3, p. 212.

forman un lodo el cual es removido del fondo del mismo. La Figura 7 ilustra el separador antes mencionado.

Figura 7. Separados de placas de flujo cruzado.



Fuente: DENG, Shubo, *et al.* Produced water from polymer flooding process in crude oil extraction: characterization and treatment by a novel crossflow oil–water separator. En: Separation and Purification Technology. Diciembre, 2002. vol. 29, no. 3. p. 212.

Las tres técnicas que se mencionaron anteriormente son principalmente para remover el petróleo presente en el agua que se desea tratar. “Realizando una comparación considerando aspectos como: diámetro crítico de las gotas, la tasa de flujo y el volumen del separador el ranking de desempeño es: centrífugas, hidrociclones y separador de placas. Sin embargo, la decisión de cual sistema utilizar va ligada al espacio disponible y la viabilidad financiera.”⁴¹

• **Evaporación.** Este método ha sido propuesto principalmente para tratar aguas residuales salinas que contienen componentes aceitosos. Son métodos bastante efectivos ya que sus principales ventajas son:

- Eliminan los tratamientos físicos y químicos, disminuyendo costos en las líneas de tratamiento.
- Requiere menos mantenimiento.
- Reduce el volumen de agua producida⁴².

⁴¹ VAN DEN BROEK, Wim M.G.T.; PLAT, Robert y VAN DER ZANDE, Mark J. Comparison of Plate Separator, Centrifuge and Hydrocyclone. En: SPE International Conference and Exhibition (2-6, noviembre: Beijing, China). Society of Petroleum Engineers, 1998. p. 395.

⁴² FAKHRU’L-RAZI, Ahmadun, *et al.* Review of technologies for oil and gas produced water treatment. En: Journal of Hazardous Materials. vol. 170, no. 2, p. 538.

- **Precipitación de aire disuelto (DAP).** Fakhru'l-Razi, *et al.*⁴³, afirman que esta técnica consiste hacer pasar el agua que se desea tratar por un separador empaquetado a una presión entre 480-820 kPa, esto para saturarlo de aire. Mediante una válvula se libera la presión de la columna, lo que hace que el aire se precipite y forme burbujas con un diámetro entre 60-100 mm. “La formación de burbujas facilita la remoción por medio de flotación de compuestos alifáticos y aromáticos presentes en el agua”⁴⁴.

- **Procesos de congelación-descongelación/evaporación (FTE).** “Esta tecnología utiliza el principio de la dependencia que tiene la solubilidad de la temperatura. Cuando una solución se enfría por debajo del punto de congelación del soluto, más no del solvente, se forman cristales relativamente puros. Esta tecnología junto con la evaporación ayuda a obtener grandes volúmenes de soluto limpio. Este proceso puede remover hasta el 90% de los hidrocarburos recuperables”⁴⁵.

- **C-TOUR.** Esta tecnología ha sido patentada por la empresa C-Tour Process AS. Consiste en utilizar un fluido condensado para remover líquidos disueltos en el agua a tratar. La tecnología se basa en inyectar dicho condensado al agua y así, este se unirá con las pequeñas gotas de aceite presentes, mejorando la extracción de las mismas. El método ha mostrado buenos resultados para la remoción de hidrocarburos disueltos como BTEX y naftalenos⁴⁶. La Figura 8 muestra el proceso por el que pasa el fluido que se trata mediante la tecnología C-TOUR.

“En algunas pruebas de campo la eficiencia de esta tecnología para la remoción de aceite disuelto ha sido del 70%”⁴⁷.

⁴³ Ibid., p. 538.

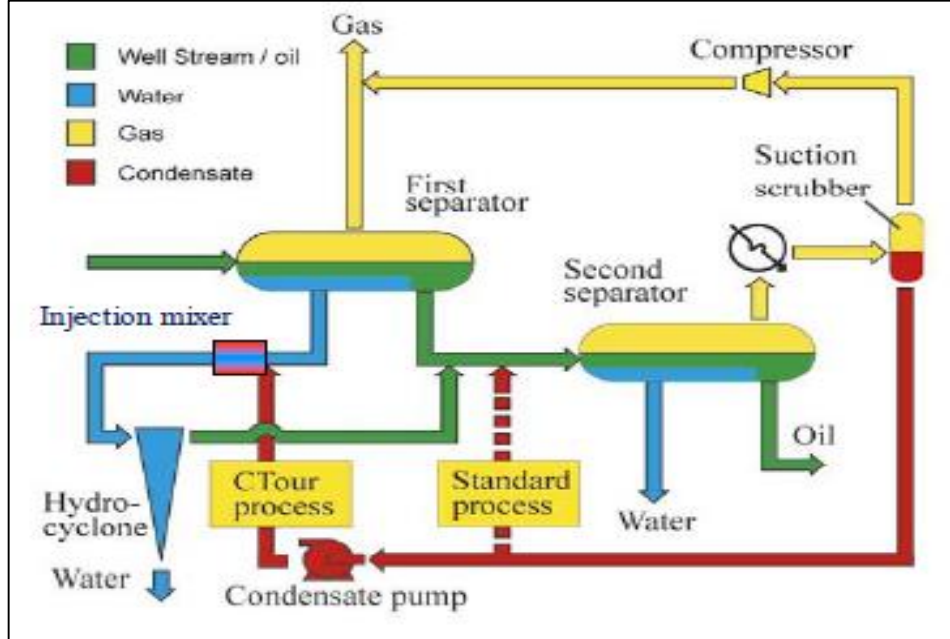
⁴⁴ DURAISAMY, Rangarajan T.; HEYDARI BENI, Ali y HENNI, Amr. State of the Art Treatment of Produced Water. En: Water Treatment. Regina, InTech, 2013. p. 202.

⁴⁵ Ibid.

⁴⁶ KNUDSEN, B. L., *et al.* Meeting the Zero Discharge Challenge for Produced Water. En: SPE International Conference on Health, Safety, and Environment in Oil and Gas Exploration and Production (7: 29-31, marzo: Calgary, Alberta, Canada). Society of Petroleum Engineers, 2004. p. 2.

⁴⁷ DURAISAMY. Op. cit., p. 202.

Figura 8. Diagrama de flujo del proceso C-TOUR.



Fuente: KNUDSEN, B. L., *et al.* Meeting the Zero Discharge Challenge for Produced Water. *En:* SPE International Conference on Health, Safety, and Environment in Oil and Gas Exploration and Production (7: 29-31, marzo: Calgary, Alberta, Canada). Society of Petroleum Engineers, 2004. p. 2.

1.2.2.2 Tratamientos químicos.

- **Precipitación química.** Mediante técnicas como coagulación y floculación es posible remover los sólidos suspendidos (SS) en el agua y las partículas coloidales, lo anterior se logra mediante la adición de algún compuesto químico en el agua.

Para la reducción de la dureza, empresas como Marathon Oli Company⁴⁸ realizan procesos de suavización del agua mediante la adición de cal o carbonato de sodio (soda ash), estos componentes inducen a la formación de precipitados insolubles como el carbonato de calcio y el hidróxido de magnesio, los cuales se acumulan en lodos que posteriormente son retirados del agua suavizada.

⁴⁸ MARATHON OIL COMPANY. Water treatment process for reducing the hardness of an oilfield produced water. Inventor: CHARLES F. GARBUTT. Int. CL.:C02F 1/52. Fecha de solicitud: 15, abril, 1997. Estados Unidos. US005879562A. 09, marzo, 1999.

“FMA (Al, Fe, Mg) es una mezcla de metales inorgánicos que se caracteriza por tener buenas propiedades coagulantes, desaceitadoras e inhibidoras de incrustaciones. Gracias a sus características, con la implementación del método FMA se pueden alcanzar eficiencias de remoción de sólidos suspendidos y aceites de hasta del 92% y 97%, respectivamente”⁴⁹.

“Dos desventajas de la precipitación mediante aditivos químicos son: la ineficiencia al momento de remover componentes disueltos en el agua y la generación de grandes cantidades de lodos con altas concentración de metales pesados”⁵⁰.

• **Oxidación química.** “Esta tecnología oxida las sustancias orgánicas presentes en el agua hasta su estado de oxidación más alto y estable, esto para lograr su mineralización”⁵¹. Los métodos más utilizados para alcanzar dichos estados de estabilidad son:

- Adición de oxidantes fuertes: ozono (O₃), peróxido de hidrógeno (H₂O₂) y dióxido de titanio (TiO₂).
- Irradiación: ultravioleta (UV), ultrasonido (US), haz electrónico (EB).
- Catálisis: iones metálicos de transición o fotocatálisis.

En su investigación Renou, *et al.*⁵², denominan como procesos avanzados de oxidación (AOP), la implementación combinada de los métodos antes mencionados. Además, expresan algunas desventajas que tienen los AOP, principalmente los altos costos de operación debido a la gran demanda de energía eléctrica de dispositivos como: ozonizadores, lámparas UV, ultrasonidos; y las grandes cantidades de oxidante requeridas para lograr la mineralización de los contaminantes.

El Cuadro 1 muestra las combinaciones más utilizadas en el tratamiento de aguas.

⁴⁹ JIMÉNEZ, S., *et al.* State of the art of produced water treatment. En: Chemosphere. 2017. vol. 192, p. 37.

⁵⁰ DURAISAMY, Rangarajan T.; HEYDARI BENI, Ali y HENNI, Amr. State of the Art Treatment of Produced Water. En: Water Treatment. Regina, InTech, 2013. p. 202.

⁵¹ *Ibid.*, p. 203.

⁵² RENO, S., *et al.* Landfill leachate treatment: Review and opportunity. En: Journal of Hazardous Materials. 2008. vol. 150, no. 3, p. 480.

Cuadro 1. Sistemas AOP más comunes.

Sistemas homogéneos		Sistemas heterogéneos	
Con radiación	Sin radiación	Con radiación	Sin radiación
O ₃ /UV H ₂ O ₂ /UV Haz electrónico US H ₂ O ₂ /US UV/US H ₂ O ₂ /Fe ²⁺ /UV (foto-fenton)	O ₃ /H ₂ O ₂ O ₃ /OH ⁻ H ₂ O ₂ /Fe ²⁺ (fenton)	TiO ₂ /O ₂ /UV TiO ₂ /H ₂ O ₂ /UV	Electro-fenton

Fuente: RENO, S., *et al.* Landfill leachate treatment: Review and opportunity. En: Journal of Hazardous Materials. 2008. vol. 150, no. 3, p. 480. Modificado por autores.

Por otro lado, “un aspecto que se debe tener en cuenta es la cantidad de contaminantes presentes en el agua, expresado en términos de demanda química de oxígeno (DQO). La implementación de este tipo de tratamientos es recomendable para aguas con DQO menor a cinco g/L ya que si este porcentaje es mayor se van a requerir grandes concentraciones de aditivos, lo cual puede impedir el tratamiento”⁵³.

Mota, *et al.*⁵⁴, afirman que una manera de reducir los costos de los sistemas AOP es utilizar estos como pretratamientos seguidos por tratamientos biológicos.

• **Proceso con fenton y foto-fenton.** “Este método consiste en disolver una solución de dos reactivos, hierro (Fe²⁺) y peróxido de hidrógeno (H₂O₂), en el agua que se desea tratar. En un medio ácido, dichos reactivos se degradan para así reaccionar con los contaminantes presentes en el agua. El pH ideal para que ocurran las reacciones durante el proceso fenton es tres”⁵⁵.

Cuando se habla de foto-fenton, se refiere a la adición de luz ultravioleta al sistema de tratamiento tradicional fenton, esto ayuda a acelerar la degradación de los reactivos y así acelerar el proceso.

Dentro de la investigación llevada a cabo por Mota, *et al.*⁵⁶, se mencionan algunas aplicaciones que se le han dado a este tipo de tratamiento, donde se evidencia que ha sido enfocado principalmente para remover contaminantes orgánicos como: componentes BETX y microcontaminantes de baja biodegradabilidad (fenoles, sulfuros, mercaptanos, amonias y cianuros); y ha mostrado resultados favorecedores.

⁵³ MOTA, A. L. N., *et al.* Advanced oxidation processes and their application in the petroleum industry: A review. En: Brazilian journal of petroleum and gas. 2008. vol. 2, no. 3, p. 124.

⁵⁴ *Ibid.*, p. 125.

⁵⁵ *Ibid.*, p. 126.

⁵⁶ *Ibid.*, p. 129.

A pesar de los buenos resultados evidenciados en los tratamientos con fenton y foto-fenton, estos tienen ciertas desventajas. Económicamente la utilización de grandes cantidades de reactivos y consumo energético por parte de las lámparas UV. Por otro lado, es necesario realizar un ajuste de pH previo al tratamiento para que este brinde resultados positivos, además en ciertos casos es necesario remover el hierro residual presente en el agua pos tratamiento⁵⁷.

- **Tratamiento con ozono (O₃).** Mota, *et al.*⁵⁸ en su investigación hablan de la ozonización como un tipo de tratamiento que utiliza el ozono para generar radicales hidroxilos en el agua a tratar. Gracias a que tiene la ventaja de que no es dañino para muchos organismos este compuesto ha sido utilizado frecuentemente para tratar agua para consumo humano. Sin embargo, el uso de este método es limitado debido a la gran demanda de energía que se requiere para generar el ozono, esto gracias a que la eficiencia del ozono depende de la transferencia másica gas-liquido debido a la baja solubilidad del mismo en una solución acuosa.

A pesar de lo anterior, hay diversas formas de mejorar la eficiencia del ozono al momento de degradar los compuestos orgánicos en el agua. Algunas de ellas son: combinar el O₃ con peróxido de hidrógeno, con radiación UV o ultrasonido. El uso de O₃/UV ha sido utilizado para la remoción de compuestos de hidrocarburos, donde se han mostrado índices de remoción de más del 99%.

- **Tratamiento fotocatalítico.** “El principio de la fotocatalisis es la activación de material particulado semiconductor, mediante la acción de la radiación con una longitud de onda apropiada”⁵⁹.

Mota, *et al.*⁶⁰, afirman que el material más indicado para realizar este tipo de tratamiento es el dióxido de titanio (TiO₂) cuando se encuentra en forma como anatasa, debido a su toxicidad, resistencia a la fotocorrosión, disponibilidad, eficiencia como catalizador y costo. Además se puede utilizar la luz solar como fuente de radiación ya que el TiO₂ absorbe radiaciones con longitudes de onda por debajo de 400 nm. Adicionalmente, en la misma investigación se mencionan algunas aplicaciones que se le han dado a este método dentro de la industria del petróleo, las cuales han arrojado resultados importantes para el tema del tratamiento de aguas.

Por un lado, se menciona un caso donde se realizó tratamiento de agua fotocatalítico con TiO₂/UV y este mostró mediante un análisis cromatógrafo una degradación de contaminantes presentes en el agua tratada.

⁵⁷ Ibid., p. 128.

⁵⁸ Ibid., p. 131.

⁵⁹ Ibid., p. 132.

⁶⁰ Ibid., p. 132.

Saien y Nejati⁶¹, utilizaron TiO₂/UV para degradar contaminantes orgánicos en aguas residuales de procesos de refinación, las cuales ya habían sido pre-tratadas mediante procesos fisicoquímicos. Los resultados de esta investigación mostraron un máximo porcentaje de degradación de 90%, cuando la concentración de TiO₂ era cercana a los 100mg/L, el pH de tres y la temperatura de 318°K.

- **Desemulsificantes.** “Una emulsión es una mezcla estable entre aceite y agua, que no se separa simplemente por gravedad. En el caso del petróleo, la mayoría de emulsiones que existen son de tipo normal, es decir, la fase continua o externa es el petróleo y la fase dispersa o interna es el agua; sin embargo, existen otro tipo de emulsiones. Las emulsiones inversas, por ejemplo, son en las que la fase continua es el agua y la fase dispersa es el petróleo”⁶²; el tratamiento de estas últimas es el objetivo cuando se habla de aplicar desemulsificantes.

Según Arnold y Stewart⁶³, para que exista una emulsión deben existir algunas características, por ejemplo, deben haber dos líquidos inmiscibles, un agente emulsificante y una agitación suficiente para que las gotas de la fase interna se dispersen lo suficiente en la fase continua. En el caso de las emulsiones presentes en el agua de producción, esta contiene contaminantes orgánicos e inorgánicos los cuales se absorben en la interfase de las gotas de la fase dispersa, formando una película que impide la unión entre ellas y dificulta el rompimiento de la emulsión.

“Las emulsiones se pueden romper por medio de la utilización de químicos o térmicamente; los químicos utilizados para el tratamiento de emulsiones son llamados desemulsificantes o rompedores de emulsión, estos actúan principalmente para neutralizar el efecto de los agentes emulsificantes y así facilitan la atracción entre las gotas que se desean retirar”⁶⁴. Vale la pena aclarar que, para las emulsiones inversas, como las de nuestro caso de estudio, es necesario también un rompedor de emulsiones inversas.

- **Oxidación electroquímica.** “La oxidación electro química se puede dar mediante dos formas: oxidación anódica (forma directa) y mediante electro-oxidación”⁶⁵.

⁶¹ SAIEN, J. y NEJATI, H. Enhanced photocatalytic degradation of pollutants in petroleum refinery wastewater under mild conditions. En: Journal of Hazardous Materials. 2007. vol. 148. p. 491-495.

⁶² ARNOLD, Ken y STEWART, Maurice. Chapter 7 – Crude Oil Treating and Oil Desalting Systems. En: Surface Production Operations. 3 ed. Burlington: Gulf Professional Publishing, 2008. p. 384.

⁶³ *Ibid.*, p. 385.

⁶⁴ *Ibid.*, p. 392.

⁶⁵ MOTA, A. L. N., *et al.* Advanced oxidation processes and their application in the petroleum industry: A review. En: Brazilian journal of petroleum and gas. 2008. vol. 2, no. 3, p. 133.

Como explica Mota, *et al.*⁶⁶, mediante la electro-oxidación, en el cátodo se pueden generar compuestos como el peróxido de hidrógeno, el cual puede ser utilizado como reactivo en los procesos fenton. Además, con la adición de hierro a una solución en presencia de una reacción fenton puede generarse Fe^{3+} , el cual posteriormente se reduce a Fe^{2+} y actúa como un catalizador contribuyendo al tratamiento del agua mediante la oxidación de los contaminantes, el sistema anterior se conoce como un proceso electroquímico-fenton y se podría aumentar su eficiencia mediante la adición de radiación UV. Otra forma de producir los iones de hierro necesarios para un sistema electroquímico-fenton es mediante una celda electroquímica con electrodos (cátodos y ánodos), en este sistema un ánodo de hierro es el encargado de transferir sus iones a la solución, mientras que el cátodo actúa como electrodo inerte para la reducción de agua.

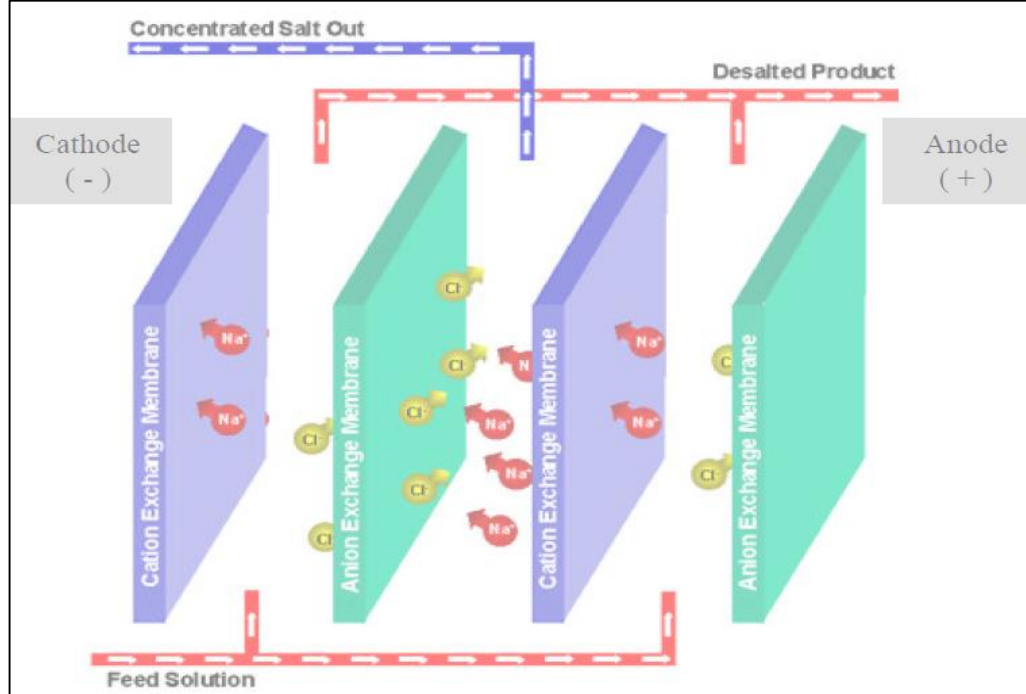
- **Electrodiálisis (ED).** Este método es utilizado para remover las sales disueltas en el agua de producción. Ya que dichas sales están cargadas iónicamente, el método utiliza electrodos cargados para atraer dichos iones, tanto positivos como negativos. Este sistema consiste en ubicar una serie de membranas en medio de dos electrodos, uno cargado positivo y otro negativamente, las membranas solo permiten el paso de uno de los iones y se ubican de forma intercalada para así poder capturar los contaminantes ionizados⁶⁷.

La Figura 9 muestra el ensamble de un sistema básico de electrodiálisis, en donde las membranas están separadas, para que por allí pueda pasar el agua que se desea tratar.

⁶⁶ Ibid., p. 133-134.

⁶⁷ DANIEL ARTHUR, J., *et al.* Technical Summary of Oil & Gas Produced Water Treatment Technologies. ALL Consulting, LLC, 2005. p. 18.

Figura 9. Ensamble básico de un sistema de electrodiálisis.



Fuente: DANIEL ARTHUR, J., *et al.* Technical Summary of Oil & Gas Produced Water Treatment Technologies. ALL Consulting, LLC, 2005. p. 18.

Sin embargo, debido al uso de membranas es necesario realizar un pretratamiento al agua contaminada para remover los materiales que puedan dañar las membranas o taponar los canales entre ellas⁶⁸.

1.2.2.3 Tratamientos biológicos. Este tipo de tratamiento consiste en la biodegradación de la materia orgánica presente en el agua de producción, la cual se ve reflejada principalmente en compuestos hidrocarburos. Cuando ocurre la oxidación biológica, los microorganismos como bacterias, algas, hongos y protozoarios; convierten los compuestos orgánicos disueltos y el amoníaco en agua y CO₂, respectivamente⁶⁹.

Jiménez *et al.*⁷⁰, en el mismo documento describen los dos mecanismos de tratamiento biológico más conocidos. En la biodegradación las bacterias utilizan la energía de su metabolismo para descomponer los hidrocarburos presentes en el agua, mientras que la biofloculación ocurre generalmente en presencia de lodos en

⁶⁸ *Ibid.*, p. 19.

⁶⁹ JIMÉNEZ, S., *et al.* State of the art of produced water treatment. *En:* Chemosphere. 2017. vol. 192, p. 29.

⁷⁰ *Ibid.*, p. 29.

el agua de producción, allí los flóculos adsorben el material soluble e insoluble generando flóculos más grandes los cuales son más fáciles de remover.

“Los tratamientos biológicos con microorganismos aeróbicos más usuales son: lodos o fangos activos, filtros percoladores, reactores Batch alternados (SBRs), reactores *Chemostat*, filtros biológicos aireados (BAF) y lagunas; siendo los lodos activados el tratamiento más utilizado. Se han estudiado cuatro fuentes principales para la generación de microorganismos para los tratamientos biológicos, estas son: microorganismos naturales, microorganismos comerciales, grupos específicos de microorganismos y lodos aclimatados de aguas residuales”⁷¹.

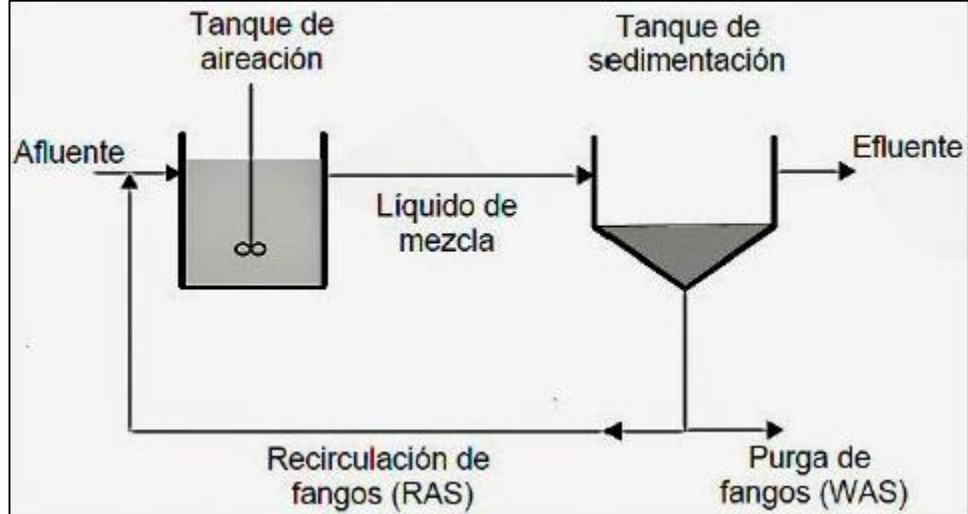
- **Lodos o fangos activados.** Este proceso de tratamiento requiere de oxígeno adicional para lograr la activación de las bacterias aerobias presentes. Se mezcla el lodo con los sólidos residuales sedimentados y se agita usando aire comprimido en el centro del tanque donde se almacena la mezcla, dicha agitación maximiza la absorción del oxígeno de la atmósfera y el adicionado. Los microorganismos por medio del oxígeno adicionado lograr oxidar la materia orgánica generando la aglutinación de partículas y creando unas de mayor tamaño y más fácil remoción, la mezcla de microorganismos, partículas sólidas y aguas residuales es aireada y posteriormente sedimentada para separar los sólidos biológicos que serán enviados a los recipientes de aireación donde se reciclarán mezclándose con el agua residual entrante⁷².

Tal como se muestra en la Figura 10 los fangos son mezclados con los sólidos residuales del tanque de sedimentación y mediante procesos de aireación empiezan su mecanismo de acción.

⁷¹ FAKHRU'L-RAZI, Ahmadun, *et al.* Review of technologies for oil and gas produced water treatment. En: Journal of Hazardous Materials. vol. 170, no. 2, p. 539.

⁷² ARELLANO, J. y GUZMÁN, J. Ingeniería Ambiental. México D.F; Editorial Alfaomega, 2011. p. 34. ISBN 978-607-707-233-1.

Figura 10. Procedimiento para los fangos activados.



Fuente: SERRANO FONTANILLO, Gerardo. Fangos, tratamiento biológico [en línea]. 2014- [citado el 3 de marzo de 2018]. Disponible en: <http://ensysingenieria.blogspot.com.co/2014/05/fondos-activados-tratamiento-biologico.html>

El sistema de tratamiento biológico más común es el de lodos activados, Fakhru'l-razi *et al.*⁷³, explican que utilizando microorganismos naturales en tanque aireados, los lodos activados pueden mostrar una eficiencia del 98-99% en la remoción de los hidrocarburos totales, con un tiempo de retención de 20 días.

- **Filtros percoladores.** Estos filtros se asemejan a un asentamiento de grava o pueden ser un medio plástico, se realiza un rociamiento de aguas negras pre-tratadas sobre su superficie para que se forme una capa biológica cuya función será la de digerir y eliminar los contaminantes del agua que percole por dicho filtro.

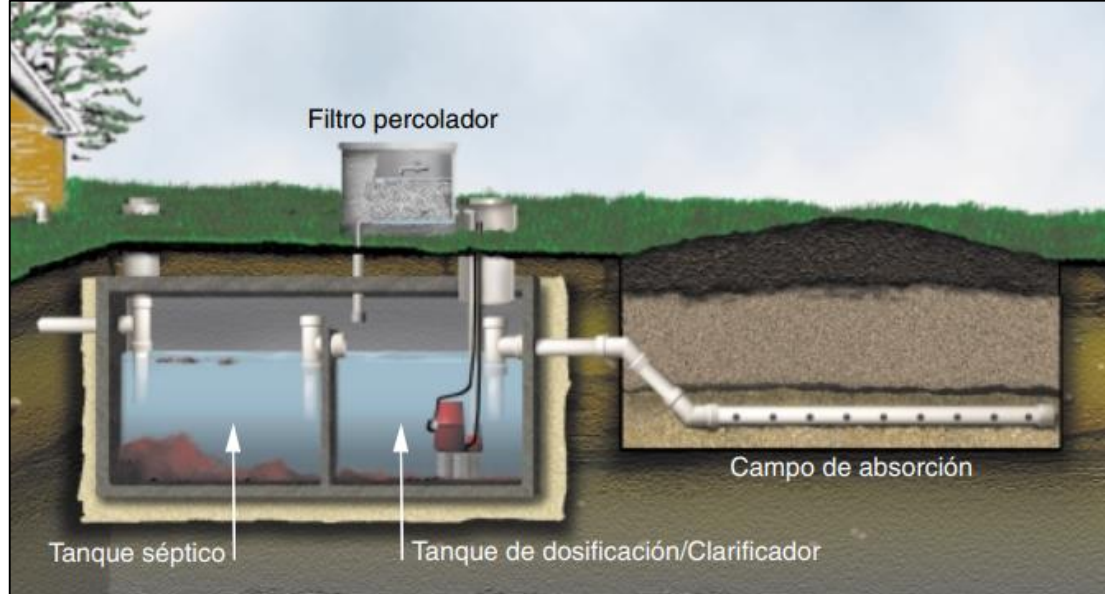
Los filtros percoladores pueden reducir la demanda bioquímica de oxígeno, disminuye la cantidad de organismos patógenos, coliformes fecales u otras bacterias presentes en desechos de origen animal.

Los componentes pueden ser observados en la Figura 11.

- **Tanque séptico:** Es el lugar en el que se eliminan los sólidos que permanecen en las aguas negras y luego se asientan.
- **Tanque de dosificación:** permite que el material biológico se sedimente, puede estar fabricado en hormigón o fibra de vidrio.

⁷³ FAKHRU'L-RAZI, Ahmadun, *et al.* Review of technologies for oil and gas produced water treatment. En: Journal of Hazardous Materials. vol. 170, no. 2, p. 539.

Figura 11. Esquema de un filtro percolador.



Fuente: LESIKAR, Bruce y ENCISO, Juan. Sistemas individuales para el tratamiento de aguas negras. Texas A&M Agrilife Extension [en línea]. 2011- [citado el 10 de mayo de 2018]. Disponible en: <http://aqlifesciences.tamu.edu/baen/wp-content/uploads/sites/24/2017/01/L-5345S.-Trickling-Filter-Spanish-Version.pdf>

1.2.2.4 Tratamiento de filtrado con membranas. En este tipo de tratamientos se logra la separación de los contaminantes y del agua cuando se aplica una presión al fluido que se desea tratar, y este se hace pasar por una lámina delgada de un material semipermeable. Este tipo de sistemas se utilizan generalmente cuando los tratamientos convencionales no son capaces de retirar los contaminantes presentes en el agua y por esta razón no se logran cumplir los estándares regulatorios.

Según Duraisamy⁷⁴, la capacidad máxima de remoción de los tratamientos convencionales es para partículas con tamaños mayores o iguales a cinco micrones. Por tal razón han surgido nuevas tecnologías para lograr remover partículas de menor tamaño.

Los tratamientos con membranas tienen grandes ventajas, pero también tienen ciertas desventajas. “La mayor desventaja de esta tecnología es el ensuciamiento

⁷⁴ DURAISAMY, Rangarajan T.; HEYDARI BENI, Ali y HENNI, Amr. State of the Art Treatment of Produced Water. En: Water Treatment. Regina, InTech, 2013. p. 204.

de las membranas”⁷⁵. En el Cuadro 2 se enlistan algunas ventajas y desventajas de los sistemas con membranas mencionadas por Duraisamy⁷⁶.

Cuadro 2. Ventajas y desventajas de los sistemas con membranas.

Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none"> - Reducción de lodos. - Alta calidad de filtrado. - Requieren poco espacio. - Fácil operación. - Requieren poco o nada de químicos. - Fácil combinación con otros métodos de tratamiento. - Bajo consumo de energía. 	<ul style="list-style-type: none"> - Alta concentración de suciedad en las membranas. - Baja selectividad de membranas. - Corta vida útil de las membranas.

Fuente: DURAISAMY, Rangarajan T.; HEYDARI BENI, Ali y HENNI, Amr. State of the Art Treatment of Produced Water. En: Water Treatment. Regina, InTech, 2013. p. 204.

Para Dores, *et al.*⁷⁷, los tratamientos con membranas se pueden clasificar dependiendo del tamaño de los poros de las mismas, esto será proporcional al tamaño de las partículas de los contaminantes que se desean separar. De mayor a menor tamaño de poro, la clasificación de los sistemas sería: microfiltración (MF), ultrafiltración (UF), nanofiltración (NF) y ósmosis inversa (OI).

De la misma forma que varía el tamaño de poro, varía la presión que se debe aplicar al fluido para lograr la separación, dicha presión se traduce en consumo de energía, lo que implica costos durante los procesos.

La microfiltración y ultrafiltración tienen principios de funcionamiento similares. Sin embargo, difieren en el tamaño de partículas que pueden retirar del agua. Por un lado, las membranas de MF pueden retirar partículas como bacterias y sólidos suspendidos; mientras que las membranas de UF son empleadas para retirar partículas más pequeñas como aceites emulsificados en el agua⁷⁸.

Las membranas NF y OI son implementadas principalmente en procesos de desalación de agua, esto debido a que el tamaño de las partículas que se desean remover es muy reducido. La concentración de sal presente en el agua es un factor importante que determina la eficiencia de los procesos con este tipo de membranas

⁷⁵ JIMÉNEZ, S., *et al.* State of the art of produced water treatment. En: Chemosphere. 2017. vol. 192, p. 31.

⁷⁶ DURAISAMY. Op. cit., p. 204.

⁷⁷ DORES, Raul, *et al.* Using advanced water treatment technologies to treat produced water from the petroleum industry. En: SPE International Production and Operation Conference and Exhibition (14-16, mayo: Doha, Qatar). Memorias. Doha. Society of Petroleum Engineers, 2012. p. 3.

⁷⁸ *Ibid.*, p. 4.

ya que dicha concentración define la presión requerida para lograr la separación de las partículas. “Por ejemplo, para el tratamiento de agua con mucho contenido de sal, se puede alcanzar una remoción del 80% con presiones entre 100-150 psi, mientras que la desalación del agua de mar requiere presiones entre 700-1000 psi para lograr un porcentaje de remoción de hasta 40%”⁷⁹.

Dores, *et al.*⁸⁰, determinan que durante los procesos con OI se logran retirar iones divalentes como monovalentes con un porcentaje de remoción de hasta el 99%; mientras que las membranas de NF solo son capaces de retirar iones divalentes como calcio, magnesio y sulfato con porcentajes de remoción entre 80-90%.

Los mecanismos de los procesos de filtrado con membranas mencionados anteriormente se pueden resumir como se observa en el Cuadro 3.

Cuadro 3. Procesos de tratamiento con membranas.

Proceso	Mecanismo de separación	Objetivo
Microfiltración (MF)	Separación mediante tamizado a través de macroporos (>50 nm).	Remover sólidos suspendidos, moléculas orgánicas de gran tamaño y coloides. Principalmente para reducir turbiedad.
Ultrafiltración (UF)	Separación mediante tamizado a través de mesoporos (2-50 nm).	Remover moléculas disueltas de gran tamaño y coloides suspendidos, incluyendo bacterias y proteínas.
Nanofiltración (NF)	Separación mediante repulsión de cargas, solubilidad-difusión y tamizado a través de microporos (<2 nm).	Remover iones multivalentes.
Osmosis Inversa (OI)	Separación basada en la diferencia en las tasas de solubilidad y difusión del agua y los solutos.	Remover compuestos de bajo peso molecular como iones inorgánicos.

Fuente: DURAISAMY, Rangarajan T.; HEYDARI BENI, Ali y HENNI, Amr. State of the Art Treatment of Produced Water. *En:* Water Treatment. Regina, InTech, 2013. p. 206. Modificado por autores.

⁷⁹ Ibid., p. 5.

⁸⁰ Ibid., p. 5.

1.3 PARÁMETROS DE MEDICIÓN PARA DETERMINAR LA CALIDAD DEL AGUA DE LOS TRATAMIENTOS

Estos parámetros incluyen algunas de las características físicas, químicas y biológicas que posee el agua, son monitoreados de forma continua o discontinua según se requiera durante los procesos de tratamiento. Dichos parámetros son definidos por Rigola⁸¹ en su trabajo, de la siguiente manera:

1.3.1 pH. Es una medida de la concentración de iones de hidrógeno. Puede indicar la naturaleza ácida o alcalina de la muestra de agua. Es importante el control de este parámetro ya que al no tener los valores requeridos algunos aditivos no van a funcionar y se pueden generar otros problemas técnicos como corrosión e incrustaciones.

1.3.2 Conductividad. Es la medida indicativa de la materia ionizable total presente en el agua, esto permite obtener la capacidad que tiene la muestra de agua para conducir la electricidad. El control de este parámetro garantiza que la composición del agua se mantiene relativamente constante.

1.3.3 Turbidez. Se refiere a la dificultad del agua para transmitir la luz debido a la presencia de materiales en suspensión, coloidales o muy finos. Su control es fundamental ya que esta propiedad interviene en muchos de los procesos industriales a los que se quiera someter el agua tratada.

1.3.4 Color. Es la capacidad de absorber ciertas radiaciones del espectro visible. En ocasiones el color que presente una muestra de agua puede ser indicador de la presencia de algún contaminante. Su control es importante ya que afecta estéticamente la calidad del agua, industrialmente el color puede ser un potencial espumante para las calderas. Según el origen del color las mejores formas de tratamiento son coagulación, filtración, cloración o la adsorción en carbón activado.

1.3.5 Contenido de aceites y grasas. En este factor se incluye la presencia de grasas animales, ceras y aceites. Son compuestos orgánicos altamente estables por lo que no es fácil su remoción mediante métodos bacterianos. De acuerdo a su densidad estos componentes flotan sobre el agua produciendo una capa que

⁸¹ RIGOLA LAPEÑA, Miguel. Tratamiento de aguas industriales: aguas de proceso y residuales). Barcelona: Marcombo Boixareu Editores. 1990. p. 27. ISBN-84-267-0740-8.

además de interferir en el intercambio gaseoso, bloquea el ingreso de la luz alterando los procesos propios del ecosistema.

1.3.6 Sólidos suspendidos, disueltos y totales. Se refiere a la medida de los materiales disueltos y suspendidos presentes en el agua, sin embargo, esta medida está condicionada a ciertos parámetros como la temperatura y la duración de la desecación. Su control es fundamental para garantizar la calidad de una muestra de agua ya que, al no controlar este parámetro, se generarán problemáticas durante las operaciones de reúso o vertimiento⁸².

1.4 NORMATIVIDAD RELACIONADA

“Según los artículos 79 y 80 de la constitución política de Colombia, el estado tiene la obligación de proteger la diversidad e integridad del medio ambiente, para lo cual debe controlar los factores de deterioro ambiental, delimitar los valores máximos permitidos de contaminación e imponer las restricciones y sanciones necesarias para el cumplimiento de tal obligación”⁸³. La industria del petróleo en Colombia y el mundo ha sido conocida como una industria altamente nociva para el medio ambiente, por esto entidades gubernamentales de todo el mundo han establecido limitantes para su operación con el fin de mitigar el impacto ambiental que la operaciones petroleras generaran, allí surgen las resoluciones que serán descritas a continuación donde se exponen los parámetros que se deben controlar del agua que se usa en sus operaciones, junto con los niveles máximos permitidos para garantizar su calidad.

1.4.1 Descripción de la resolución 1207 de 2014. Esta resolución se crea con el objetivo de preservar y proteger el recurso hídrico en Colombia, sin embargo, presenta parámetros homogéneos para todas las industrias y actividades operativas. Según lo anterior, los parámetros reguladores no diferenciaban entre los contaminantes que pueden ser usados en una u otra industria; por lo cual el tratamiento que se realizaba a las aguas no siempre cumplía con los requerimientos técnicos para tal tipo de agua, generando así un alto impacto ambiental a las fuentes hídricas. Como se mencionó previamente la resolución 1207 de 2014 no ofrecía la

⁸² SEVERICHE SIERRA, Carlos Alberto; CASTILLO BERTEL, Marlon Enrique y ACEVEDO BARRIOS, Rosa Leonor. Manual de métodos analíticos para la determinación de parámetros fisicoquímicos básico en Aguas. Cartagena de Indias: Fundación Universitaria Andaluza Inca Garcilaso, 2013. p. 54.

⁸³ COLOMBIA. MINISTERIO DE AMBIENTE Y DESARROLLO SOSTENIBLE. Resolución 1207. (25, julio, 2014). Por la cual se adoptan disposiciones relacionadas con el uso de aguas residuales tratadas. Diario Oficial. Bogotá D.C.: El Ministerio, 1996. p 1.

precisión necesaria, ya que no evaluaba adecuadamente los parámetros requeridos para cada tipo de agua residual. Por esta razón, en el año 2015 el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible establece la resolución 0631, donde se especifica con mayor precisión ciertos parámetros importantes para tener en cuenta al momento de realizar tratamientos de aguas residuales.

1.4.2 Descripción de la resolución 0631 de 2015. Esta resolución surge de la necesidad de proteger y preservar el recurso hídrico de Colombia, ya que en los últimos años se ha visto un déficit muy alto en los niveles de agua disponible. Esta resolución establece parámetros específicos para 73 actividades productivas que vierten sus efluentes a fuentes hídricas naturales, causando alteraciones importantes en los mismos. Las especificaciones y modificaciones realizadas son fruto de ciertas irregularidades que se identificaron en la normatividad previa donde los parámetros no discriminaban la mayor afectación de algunas industrias. Además, mediante esta resolución se cambian las unidades de medida de los parámetros, de kilogramo por hora (kg/h) a miligramos por litro de agua (mg/L), unidad también conocida como partes por millón (ppm). Lo anterior se determinó ya que las industrias no manejan diariamente el mismo caudal de fluidos, ni la misma concentración de contaminantes⁸⁴.

En la Tabla 1 se resumen los parámetros de la resolución 0631 de 2015, solo se muestran los límites para producción ya que son de interés para esta evaluación.

⁸⁴ EL TIEMPO. A controlar los vertimientos. Editorial [en línea], marzo de 2015- [citado el 24 de febrero de 2018]. Disponible en: <http://www.eltiempo.com/archivo/documento/CMS-15437637>

Tabla 1. Resumen parámetros resolución 0631 de 2015.

PARÁMETRO	UNIDADES	PRODUCCIÓN (UPSTREAM)
GENERALES		
Ph	UNIDADES DE Ph	6,00 a 9,00
Demanda Química de Oxígeno(DQO)	mg/L O2	180,00
Demanda Bioquímica de Oxígeno(DBO)5	mg/L O2	60,00
Sólidos Suspendidos Totales(SST)	mg/L	50,00
Sólidos Sedimentables (SSED)	mg/L	1,00
Grasas y Aceites	mg/L	15,00
Fenoles	mg/L	0,20
Sustancias activas al Azul de Metileno	mg/L	Análisis y Reporte
Hidrocarburos		
Hidrocarburos Totales (HTP)	mg/L	10,00
Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos(HAP)	-	Análisis y Reporte
BTEX(Benceno, Tolueno , Etilbenceno y Xileno)	-	Análisis y Reporte
Compuestos Orgánicos Halogenados Adsorbibles(AOX)	-	Análisis y Reporte
Compuestos de Fósforo		
Fósforo Total (P)	mg/L	Análisis y Reporte
Ortofosfatos (P-PO ₄ ³⁻)	mg/L	Análisis y Reporte

Fuente: COLOMBIA. MINISTERIO DE AMBIENTE Y DESARROLLO SOSTENIBLE. Resolución 0631. (17, marzo, 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.: El Ministerio, 2015. 62 p. Modificado por autores.

Tabla 1. (Continuación).

PARÁMETRO	UNIDADES	PRODUCCIÓN (UPSTREAM)
Compuestos de Nitrógeno		
Nitratos(N-NO ₃ ⁻)	mg/L	Análisis y Reporte
Nitrógeno Amoniacal (N-NH ₂)	mg/L	Análisis y Reporte
Nitrógeno Total(N) Iones	mg/L	10,00
Cianuro Total	mg/L	1,00
Cloruros	mg/L	1.200,00
Fluoruros	mg/L	Análisis y Reporte
Sulfatos	mg/L	300,00
Sulfuros	mg/L	1,00
Metales y Metaloides		
Arsénico(As)	mg/L	0,10
Bario(Ba)	mg/L	Análisis y Reporte
Cadmio(Cd)	mg/L	0,10
Cinc(zn)	mg/L	3,00
Cobre(Cu)	mg/L	1,00
Cromo(Cr)	mg/L	0,50
Hierro(Fe)	mg/L	3,00
Mercurio(Hg)	mg/L	0,01
Niquel(Ni)	mg/L	0,50
Plata(Ag)	mg/L	Análisis y Reporte
Plomo(Pb)	mg/L	0,20
Selenio(Se)	mg/L	0,20
Vanadio(V)	mg/L	1,00

Fuente: COLOMBIA. MINISTERIO DE AMBIENTE Y DESARROLLO SOSTENIBLE. Resolución 0631. (17, marzo, 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.: El Ministerio, 2015. 62 p. Modificado por autores.

Tabla 1. (Continuación).

PARÁMETRO	UNIDADES	PRODUCCIÓN (UPSTREAM)
Otros Parámetros para Análisis y Reporte		
Acidez Total	mg/L CaCO ₃	Análisis y Reporte
Alcalinidad Total	mg/L CaCO ₃	Análisis y Reporte
Dureza Cálctica	mg/L CaCO ₃	Análisis y Reporte
Dureza Total	mg/L CaCO ₃	Análisis y Reporte
Color-Real(Medidas de absorbancia a las siguientes longitudes de onda:436 nm, 525 nm y 620 nm)	m-1	Análisis y Reporte

Fuente: COLOMBIA. MINISTERIO DE AMBIENTE Y DESARROLLO SOSTENIBLE. Resolución 0631. (17, marzo, 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.: El Ministerio, 2015. 62 p. Modificado por autores.

2. DESCRIPCIÓN DE LAS GENERALIDADES DEL MÉTODO DE ELECTROCOAGULACIÓN

En este capítulo se expondrán las generalidades del método de electrocoagulación, se describirá el proceso llevado a cabo para tratar el agua de interés y de esta manera intentar llegar a las propiedades requeridas por la legislación colombiana. Además, se definirán las variables que afectan el proceso, ya que son estas las que determinarán su eficiencia. Por último, se mostrará el diseño de la celda que se seleccionó para realizar el tratamiento del agua.

2.1 DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE ELECTROCOAGULACIÓN

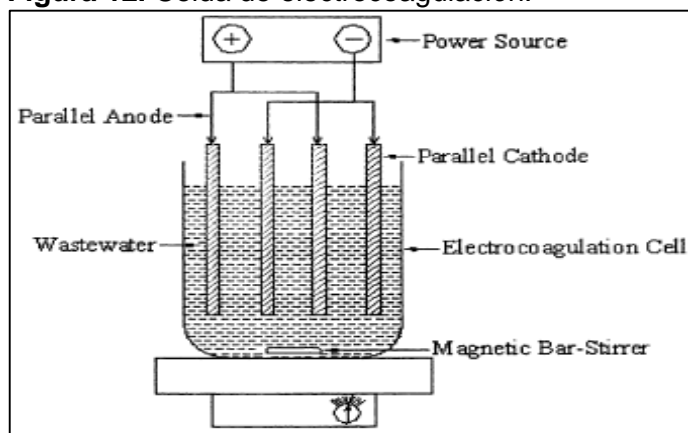
Los tratamientos de agua en función de tecnologías electroquímicas datan del siglo XIX. Sin embargo, su entendimiento es aún muy abstracto. A pesar de lo anterior se ha identificado que dicha tecnología permite un equilibrio entre los intereses de la industria y el medio ambiente; ya que ofrece gran versatilidad y se adapta tanto a la eliminación de contaminantes como a evitar contaminación del agua en su origen⁸⁵.

La electrocoagulación es un proceso electroquímico donde se introduce un ánodo sacrificio (generalmente hierro y/o aluminio) en el agua a tratar. Mediante la corrosión intencional del ánodo se generan cationes metálicos que neutralizan las cargas de las partículas presentes en el agua, esto facilita la floculación entre dichas partículas formando flóculos de mayor tamaño que posteriormente podrán ser removidos con mayor facilidad mediante métodos de separación sólido/líquido. En la electrocoagulación lo que se busca es que, por medio de la aplicación de una corriente se generen iones de carga contraria y se logre la neutralización de los contaminantes para así obtener una desestabilización y que dichas partículas se agreguen entre sí formando mayores tamaños que serán removidos con mayor facilidad⁸⁶. La Figura 12 muestra un arreglo simple de una celda de electrocoagulación.

⁸⁵ CARRASCO MARÍN, Francisco y MENÉNDEZ DÍAZ, J. Ángel. Nuevos materiales y tecnologías para el tratamiento del agua. Andalucía: Universidad Internacional de Andalucía, 2010. p. 30. ISBN-978-84-7993-202-2.

⁸⁶ MORANTE, Gonzalo. Electrocoagulación de Aguas Residuales. En: Revista Colombiana de Física. 2002, vol. 6, no. 2, p. 484-487.

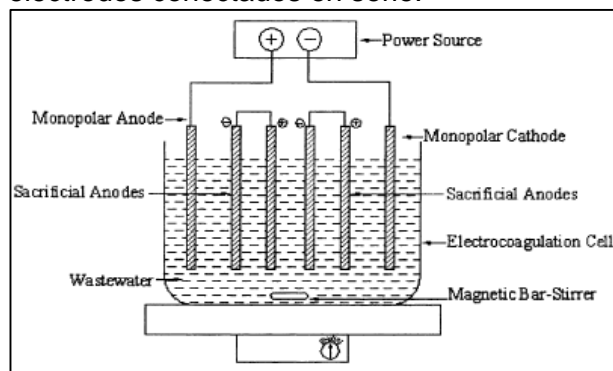
Figura 12. Celda de electrocoagulación.



Fuente: MOLLAH, M. Y., *et al.* Electrocoagulation (EC) - science and applications. En: Journal of Hazardous Materials. 2001. vol. 84, no. 1, p. 32.

Según Mollah, *et al.*⁸⁷, un arreglo así de simple no es suficiente para tratar aguas residuales, por tal razón es necesario utilizar electrodos con mayores áreas de contacto con el agua, con esto se genera una mayor dilución del metal generando una mejor eficiencia en el proceso. Además de la variación del tamaño de los electrodos, es importante tener control sobre la densidad de corriente aplicada al proceso, esto se puede variar cambiando la forma de conectar los electrodos a la fuente de poder. Esta conexión puede ser en paralelo como muestra la Figura 12 o en serie como muestra la Figura 13.

Figura 13. Celda de electrocoagulación con electrodos conectados en serie.



Fuente: MOLLAH, M. Y., *et al.* Electrocoagulation (EC) - science and applications. En: Journal of Hazardous Materials. 2001. vol. 84, no. 1, p. 33.

⁸⁷ MOLLAH, M. Y., *et al.* Electrocoagulation (EC) - science and applications. En: Journal of Hazardous Materials. 2001. vol. 84, no. 1, p. 32.

A pesar del desconocimiento que se tiene acerca de la electrocoagulación, dicho método ha sido aplicado para el tratamiento de aguas residuales de diferentes actividades industriales, donde se han encontrado excelentes resultados.

La electrocoagulación en la galvanoplastia ha sido utilizada para remover la carga de los metales que se han solubilizado en las descargas. Por otro lado, la combinación de la electrocoagulación con electroflotación ha sido probada para remoción de cromo en industria como la metalúrgica, la industria de curtiembres y los fertilizantes, obteniendo aguas tratadas con concentraciones de cromo inferiores a los 0,5 ppm⁸⁸.

Además de dichos procesos industriales, se han realizado pruebas con electrocoagulación para la potabilización de agua, lo anterior ya que el paso de la corriente por el agua genera un efecto desinfectante dejando porcentajes de remoción de microorganismos de alrededor del 99%⁸⁹.

Las refinerías de hidrocarburos, industrias de almacenamiento y transporte de los mismos han realizado experiencias de electrocoagulación para desestabilizar las emulsiones generadas por los elementos aceitosos y grasosos, lo cual ha mostrado alta efectividad, permitiendo la remoción de aceites y grasas. Younker, J., *et al.*⁹⁰, realizan un análisis del tratamiento de agua de producción petrolera mediante electrocoagulación con electrodos de hierro puro. Los resultados mostraron una reducción del 74% y 27% en el DBO y la turbidez, respectivamente.

Como se ha mencionado a lo largo del documento, actualmente la legislación con respecto a la protección del medio ambiente se ha tornado más estricta. De la mano con este hecho han surgido nuevas tecnologías como la electrocoagulación. El principal método de comparación para la electrocoagulación es la coagulación química que consiste en adicionar agentes químicos coagulantes al agua que se desea tratar. Sin embargo, hay autores como Prieto, *et al.*⁹¹, que afirman que emplear un electrón como reactivo evita la adición de agentes coagulantes, los cuales pueden generar residuos que posteriormente se convierten en contaminantes. En el mismo documento, los autores manifiestan que la electrocoagulación presenta alta eficiencia en de remoción de color, demanda química de oxígeno (DQO) y demanda bioquímica de oxígeno (DBO); además es

⁸⁸ RESTREPO MEJÍA, Ana Patricia, *et al.* La Electrocoagulación: retos y oportunidades en el tratamiento de aguas. En: Producción + Limpia. 2006. vol. 1, no. 2, p. 58-77.

⁸⁹ *Ibid.*, p. 58-77.

⁹⁰ YOUNKER, J., *et al.* Atlantic Canada Offshore R&D: Treatment of Oilfield Produced Water by Chemical Coagulation and Electrocoagulation. En: Offshore Technology Conference (2-5, Mayo: Houston, Texas, USA). Offshore Technology Conference, 2011. p. 3.

⁹¹ PRIETO GARCÍA, Francisco, *et al.* Electrocoagulación: Una Alternativa para Depuración de Lactosuero Residual. En: Revista AIDIS de Ingeniería y Ciencias Ambientales: Investigación, Desarrollo y Práctica. vol. 5, no. 3, p. 53.

más económico que otros tratamientos como la utilización de radiación UV o la ozonización.

El Cuadro 4 muestra las ventajas y desventajas de método de electrocoagulación.

Cuadro 4. Ventajas y desventajas de la electrocoagulación.

Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none"> - Costos de operación menores que los procesos de coagulación química. - Requiere equipos simples y de fácil operación. - Elimina el uso de productos químicos. - Genera lodos más compactos y en menor cantidad, lo que involucra menor problemática de disposición. - Produce flóculos más grandes que aquellos formados en la coagulación química. - Alta efectividad en la remoción de un amplio rango de contaminantes. - Purifica el agua y permite su reciclaje. - El paso de la corriente eléctrica favorece el movimiento de las partículas de contaminante más pequeñas, incrementando la coagulación. - El agua tratada por electrocoagulación contiene menor cantidad de sólidos disueltos con respecto a los productos químicos. - Durante el tratamiento se generan burbujas que arrastran los contaminantes a la superficie, donde pueden ser removidos con facilidad. 	<ul style="list-style-type: none"> - Es necesario reponer periódicamente los electrodos sacrificio. - Los lodos tienen altas concentraciones del material utilizado como electrodo. - Puede ser un tratamiento costoso en regiones en las cuales el costo de la energía eléctrica sea alto. - El óxido formado en el ánodo puede, en muchos casos, formar una capa que impide el paso de la corriente eléctrica, disminuyendo de esta forma la eficiencia del proceso.

Fuente: RESTREPO MEJÍA, Ana Patricia, *et al.* La Electrocoagulación: retos y oportunidades en el tratamiento de aguas. En: Producción + Limpia. 2006. vol. 1, no. 2, p. 64-65. Modificado por autores.

2.2 VARIABLES QUE AFECTAN LA ELECTROCOAGULACIÓN

Son muchos los factores que influyen en el proceso de electrocoagulación, los que más afectan la eficiencia del proceso se describirán a continuación.

2.2.1 pH. Restrepo, *et al.*⁹², explican que el pH influye sobre la eficiencia del proceso, específicamente en la conductividad del agua. Lo anterior se debe a que el pH influye en la solubilidad del metal y así mismo a su capacidad para formar hidroxilos durante el tratamiento.

Durante el proceso de electrocoagulación, el pH varía debido a la oxidación del ánodo sacrificio, dicha variación depende de los materiales utilizados como electrodos. Algunas investigaciones realizadas sobre este tema han determinado que el rango de pH óptimo en el que los procesos de tratamiento por medio de electrocoagulación presentan mayor eficiencia, está entre seis y ocho. Además, las reacciones que se dan durante el proceso le dan al medio acuoso capacidad buffer para neutralizar el cambio de pH.

2.2.2 Densidad de corriente. La variación eléctrica en el proceso de electrocoagulación es un factor de gran influencia en la remoción de contaminantes, además está ligado a factores económicos por lo que toma gran importancia.

Restrepo, *et al.*⁹³, afirman que el suministro de corriente determina la cantidad de iones catiónicos que el electrodo liberará en el agua tratada. A medida que se aumente la densidad de corriente, se aumentarán la producción de iones y con ello la conductividad del agua, esto generará un mayor consumo de energía en el proceso. Generalmente con el aumento de la densidad de corriente aumenta la remoción de los contaminantes; sin embargo, el aumento excesivo del suministro de corriente podría disminuir significativamente la eficiencia ya que ocurre una transformación de la energía eléctrica a energía calórica, produciéndose un aumento en la temperatura del medio, factor que también afecta la electrocoagulación. La selección de la densidad de corriente podría realizarse teniendo en cuenta otros parámetros de operación como pH y temperatura.

El suministro de energía eléctrica se puede realizar mediante corriente alterna (CA) o bien como corriente directa (CD). Lo anterior genera diferentes respuestas en el agua y en los electrodos, dependiendo de la naturaleza de los mismos, un ejemplo es la generación de capas en las superficies que causan impermeabilización y menor eficiencia de remoción⁹⁴.

⁹² RESTREPO MEJÍA, Ana Patricia, *et al.* La Electrocoagulación: retos y oportunidades en el tratamiento de aguas. En: Producción + Limpia. 2006. vol. 1, no. 2, p. 70.

⁹³ *Ibid.*, p. 71.

⁹⁴ PRIETO GARCÍA, Francisco, *et al.* Electrocoagulación: Una Alternativa para Depuración de Lactosuero Residual. En: Revista AIDIS de Ingeniería y Ciencias Ambientales: Investigación, Desarrollo y Práctica. vol. 5, no. 3, p. 71.

2.2.3 Conductividad. El aumento de la conductividad eléctrica genera a su vez un incremento en la densidad de corriente. La presencia de electrolitos como NaCl y CaCl₂ favorecen aún más el aumento de la conductividad del agua residual. Además, la presencia de iones carbonatos y sulfatos (HCO₃⁻ y SO₄⁼, respectivamente) pueden conducir a la precipitación de Ca⁺² y Mg⁺² produciendo una capa insoluble sobre los electrodos que aumentaría el potencial entre éstos, decreciendo así la eficiencia de la corriente. Para procesos de electrocoagulación normal se recomienda una cantidad de Cl⁻ alrededor del 20%⁹⁵.

2.2.4 Temperatura. No se ha encontrado una temperatura exacta que aumente la eficiencia de la electrocoagulación, sin embargo, se ha evidenciado que dicha eficiencia aumenta hasta llegar a 60°C, punto donde se hace máxima para después decrecer. El aumento de la temperatura se atribuye principalmente al incremento en la actividad para destruir la película de óxido de aluminio de la superficie del electrodo⁹⁶.

2.2.5 Tiempo. Para Prieto, *et al.*⁹⁷, a pesar que no es un factor tan importante comparado con otros como el pH, el tiempo de residencia del agua en el procedimiento afecta la eficiencia del mismo ya que a mayor tiempo, mayor será la cantidad de sólidos formados, debido a que se favorecen los procesos de electrodos como la floculación y la precipitación de sólidos.

2.2.6 Material de los electrodos. Ya que los electrodos serán los que aporten los cationes durante la electrocoagulación, dependiendo de la naturaleza de los materiales, las reacciones de oxidación y reducción que se obtendrán serán diferentes. Usualmente se utiliza el hierro y el aluminio como materiales. Es importante realizar limpieza de los electrodos periódicamente debido a la acumulación lodos en las superficies, esto hace que se reduzca la eficiencia del proceso.

⁹⁵ RESTREPO MEJÍA, Ana Patricia, *et al.* La Electrocoagulación: retos y oportunidades en el tratamiento de aguas. En: Producción + Limpia. 2006. vol. 1, no. 2, p. 71.

⁹⁶ *Ibid.*, p. 72.

⁹⁷ PRIETO GARCÍA, Francisco, *et al.* Electrocoagulación: Una Alternativa para Depuración de Lactosuero Residual. En: Revista AIDIS de Ingeniería y Ciencias Ambientales: Investigación, Desarrollo y Práctica. vol. 5, no. 3, p. 71.

2.3 REACCIONES EN EL PROCESO DE ELECTROCOAGULACIÓN

Durante el proceso de electrocoagulación ocurren diferentes procesos físicos y químicos para remover los contaminantes presentes en el agua que se está tratando. Los electrodos son los principales proveedores de los iones tanto positivos como negativos, en el caso del ánodo es el encargado de proveer los iones metálicos, los cuales contribuyen a la remoción de los contaminantes. La naturaleza de los electrodos es un factor que afecta la electrocoagulación, así mismo dependiendo del material que se escoja se darán una serie de reacciones.

Los materiales más utilizados como electrodos son el Hierro y el Aluminio, para cada uno de ellos hay una serie de reacciones que ocurren durante la electrocoagulación.

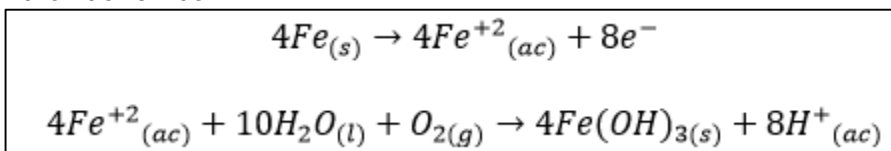
Sin importar el material de los electrodos, el metal sufre el mismo proceso de oxidación. "El proceso empieza cuando la corriente eléctrica pasa a través del electrodo, oxida el metal (M) a su forma catódica (M^{n+}) y simultáneamente el agua es reducida a hidrogeno y el ion hidróxilo (OH^-). El hidróxilo del metal formado actúa como coagulante de impurezas. El hidrógeno producido en el cátodo forma una espuma que contiene impurezas, que más tarde podrán ser retiradas mediante floculación o sedimentación"⁹⁸.

Lo dicho anteriormente se traduce en una serie de reacciones químicas dependiendo del elemento que se utilice como electrodo.

2.3.1 Ánodo de Hierro (Fe). Para este caso en particular el hierro puede producir posibles coagulantes mediante dos mecanismos: formación de hidróxido férrico y formación de hidróxido ferroso.

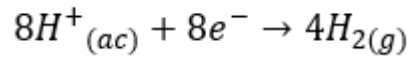
- **Mecanismo I: Formación de hidróxido férrico.** En la Reacción 1, Reacción 2 y Reacción 3 se muestran las reacciones que ocurren en el medio acuoso cuando existe la formación de hidróxido férrico como agente coagulante.

Reacción 1. Reacciones en el ánodo cuando ocurre la formación de hidróxido férrico.

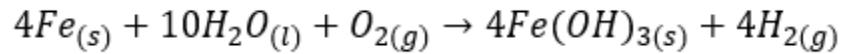


⁹⁸ PRIETO GARCÍA, Francisco, *et al.* Electrocoagulación: Una Alternativa para Depuración de Lactosuero Residual. En: Revista AIDIS de Ingeniería y Ciencias Ambientales: Investigación, Desarrollo y Práctica. vol. 5, no. 3, p. 65.

Reacción 2. Reacción en el cátodo cuando ocurre la formación de hidróxido férrico.

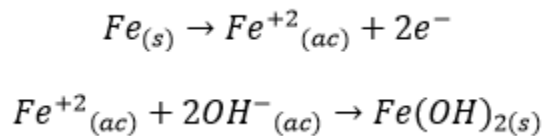


Reacción 3. Reacción global para la formación de hidróxido férrico.

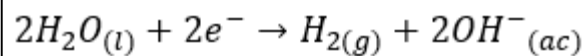


- **Mecanismo II: Formación de hidróxido ferroso.** En la Reacción 4, Reacción 5 y Reacción 6 se muestran las reacciones que ocurren en el medio acuoso cuando existe la formación de hidróxido ferroso como agente coagulante.

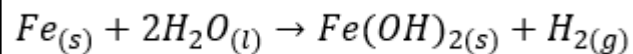
Reacción 4. Reacciones en el ánodo cuando ocurre la formación de hidróxido ferroso.



Reacción 5. Reacción en el cátodo cuando ocurre la formación de hidróxido férrico.



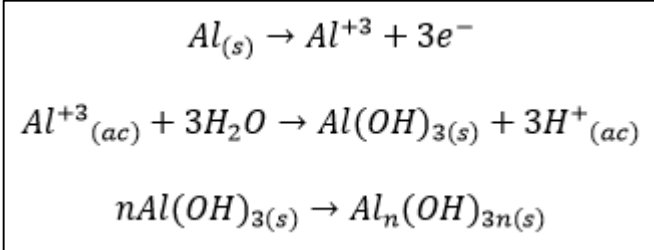
Reacción 6. Reacción global para la formación de hidróxido ferroso.



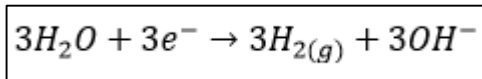
Luego de que se forman los hidróxidos de hierro por cualquiera de los dos mecanismos hay una aglomeración de coloides los cuales interactúan con los contaminantes para su posterior remoción.

2.3.2 Ánodo de Aluminio (Al). A diferencia del hierro, cuando se utiliza Aluminio como ánodo solo hay un mecanismo de producción de posibles coagulantes. Las reacciones de oxidación que ocurren en el ánodo y en el cátodo para el aluminio, se muestran en la Reacción 7 y Reacción 8, respectivamente.

Reacción 7. Reacciones en el ánodo de aluminio.



Reacción 8. Reacciones en el cátodo de aluminio.



“La generación del Al^{+3} en combinación con los OH^{-} , reaccionan y posteriormente por procesos de precipitación forman el $Al(OH)_{3(s)}$, ésta sustancia de carácter gelatinoso con propiedades absorbentes, es propicia para los procesos de adsorción y atracción de las partículas contaminantes”⁹⁹.

2.4 TIPOS DE REACTORES DE ELECTROCOAGULACIÓN

La selección del tipo de reactor a utilizar depende de las características del contaminante y de su concentración, así como de las cantidades de agua a tratar.

Según Restrepo, *et al.*¹⁰⁰, los reactores se pueden clasificar de dos maneras. En primera instancia se pueden clasificar como reactores tipo Bach y reactores de sistema continuo; y, por otro lado se pueden clasificar según el mecanismo de separación después de realizar la coagulación, dichos mecanismos de separación pueden ser sedimentación o flotación.

2.4.1 Reactores tipo Bach. El diagrama de este tipo de reactores se muestra en la Figura 12 y Figura 13, pueden ir conectados en serie o en paralelo. Los reactores tipo Bach son los diseños más simples y populares en la electrocoagulación. Autores como Chen¹⁰¹, afirman que a pesar de que son los reactores más simples,

⁹⁹ Ibid., p. 67.

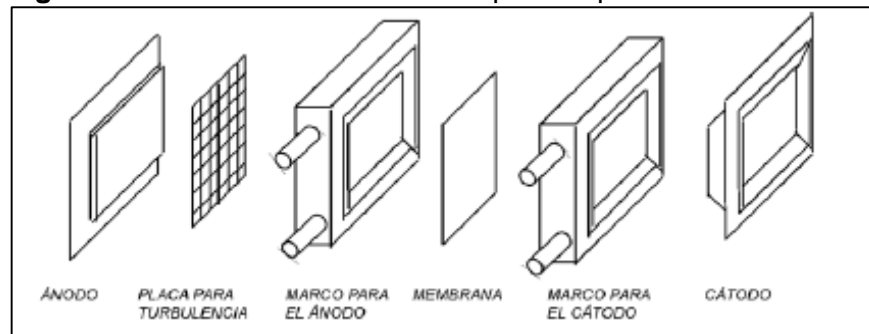
¹⁰⁰ RESTREPO MEJÍA, Ana Patricia, *et al.* La Electrocoagulación: retos y oportunidades en el tratamiento de aguas. En: Producción + Limpia. 2006. vol. 1, no. 2, p. 68.

¹⁰¹ CHEN, Guohua. Electrochemical technologies in wastewater treatment. En: Separation and Purification Technology. Octubre, 2004. vol. 38, no. 1, p. 13.

son fáciles de escalar y su aplicación más adecuada es para la remoción de metales en corrientes con alta concentración de los mismos.

2.4.2 Reactor tipo filtro prensa. Este tipo de reactor, mostrado en la Figura 14, se utiliza en combinación con membranas de filtrado. La composición del reactor está constituida por dos recamaras, en una de ellas se aloja el ánodo y en la otra el cátodo en forma de placas Restrepo, *et al.*¹⁰², explican que para el reactor tipo prensa, el agua entra por la parte lateral de la cámara y es inducida a flujo turbulento para incrementar la eficiencia del proceso. Una de las ventajas que presenta este tipo de reactor es que su limpieza y mantenimiento son relativamente simples.

Figura 14. Ilustración de un reactor tipo filtro prensa.



Fuente: RESTREPO MEJÍA, Ana Patricia, *et al.* La Electrocoagulación: retos y oportunidades en el tratamiento de aguas. En: Producción + Limpia. 2006. vol. 1, no. 2, p. 69.

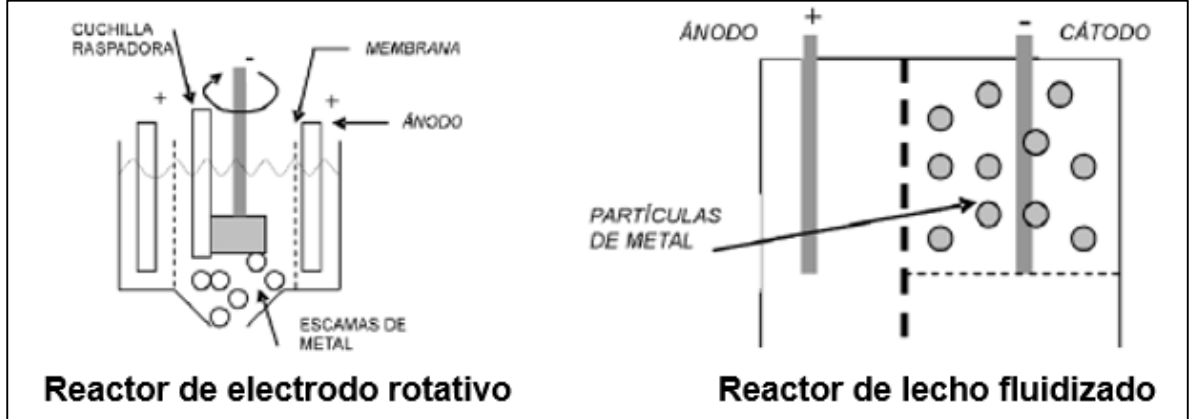
2.4.3 Reactor de electrodo rotativo. Este tipo de reactor surge por la necesidad de mejorar la transferencia de masa entre el volumen de agua que se está tratando y el área superficial del cátodo¹⁰³. La estructura de este tipo de reactor se muestra en la Figura 15, donde el cátodo está representado por un cilindro que rota, mientras que los ánodos se encuentran a los costados del reactor.

2.4.4 Reactor de lecho fluidizado. Este tipo de reactor permite aumentar el área superficial mejorando la eficiencia del proceso. La estructura del reactor se muestra en la Figura 15.

¹⁰² RESTREPO. Op. cit., p. 69.

¹⁰³ CHEN, Guohua. Electrochemical technologies in wastewater treatment. En: Separation and Purification Technology. Octubre, 2004. vol. 38, no. 1, p. 13.

Figura 15. Reactores tipo electrodo rotativo y lecho fluidizado.



Fuente: RESTREPO MEJÍA, Ana Patricia, *et al.* La Electrocoagulación: retos y oportunidades en el tratamiento de aguas. En: Producción + Limpia. 2006. vol. 1, no. 2, p. 70. Modificado por autores.

Los materiales usados en el ánodo deben ser dimensionalmente estables. Como se ha afirmado a lo largo del documento, los materiales más utilizados son el hierro y el aluminio, sin embargo, actualmente se han implementado electrodos de titanio con capas de óxidos de metales noble; mientras que para los cátodos es posible utilizar metales, y compuestos de carbón como el grafito o inclusive titanio¹⁰⁴.

¹⁰⁴ RESTREPO MEJÍA, Ana Patricia, *et al.* La Electrocoagulación: retos y oportunidades en el tratamiento de aguas. En: Producción + Limpia. 2006. vol. 1, no. 2, p. 70.

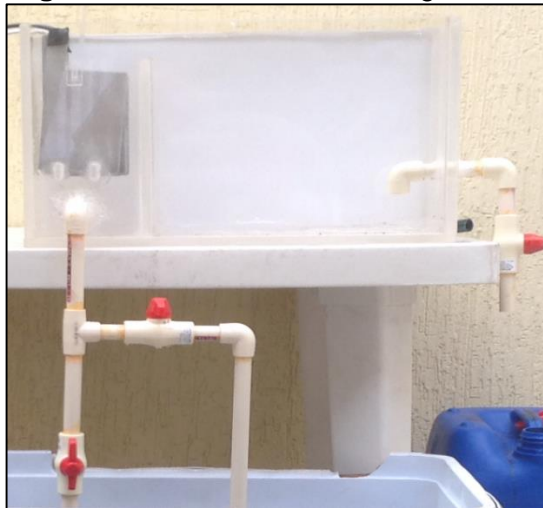
3. DESCRIPCIÓN DEL PROCEDIMIENTO REALIZADO

El procedimiento principal que se llevó para esta investigación fue el tratamiento de agua de producción petrolera mediante el método de electrocoagulación. Para este fin, fue necesario realizar el diseño y la construcción de una celda de electrocoagulación para llevar a cabo los diferentes tratamientos. En este capítulo se describirá el proceso de construcción de la celda, en donde se explicarán diferentes aspectos como la geometría de los electrodos, el material de los mismos, entre otros. Finalmente se describirán los diferentes tratamientos realizados mediante electrocoagulación.

3.1 CONSTRUCCIÓN DE LA CELDA DE ELECTROCOAGULACIÓN

La celda de electrocoagulación utilizada para esta investigación fue diseñada por los autores, con colaboración del director asignado por la empresa. La celda en su totalidad constaba de dos compartimentos. El primero de ellos, alojó los electrodos metálicos que se oxidarían para realizar el tratamiento; mientras que la función del segundo compartimento era recibir el agua tratada y recolectar el volumen necesario para poder extraer las muestras para su posterior análisis. La Figura 16 muestra una imagen real de la celda la construida en donde se pueden apreciar los electrodos en el compartimento donde ocurrió el tratamiento.

Figura 16. Celda de electrocoagulación.



Fuente: Elaboración propia.

Los materiales que se utilizaron para la construcción de la celda fueron:

- Acrílico recuperado.

- Tubos y válvulas CPVC.

Como se aprecia en la Figura 16, la celda tiene un acceso frontal y una salida lateral. Las válvulas frontales sirvieron para cerrar el paso de agua y realizar un retorno para regular el caudal de entrada a la celda y así el caudal de agua a tratar el cual fue de un litro por minuto. Por otro lado, la función de la válvula lateral fue permitir la recolección de muestras para el análisis.

3.1.1 Tipo de celda de electrocoagulación. Para la realización del proceso de electrocoagulación se diseñó y construyó una celda de tipo Bach. La celda se diseñó de tal manera que el tratamiento se pudiera realizar a medida que el agua fluía de manera ascendente a través de la misma. Las dimensiones de la celda se determinaron de tal forma que la zona húmeda, es decir, en donde ocurriría el tratamiento tuviera la capacidad de alojar un litro de agua, sin importar el volumen que ocuparan los electrodos.

La conexión de la celda con la fuente de poder fue de tipo monopolar tanto en el cátodo como en el ánodo, sin conectar los demás electrodos entre sí. El espaciamiento entre los electrodos fue de cinco milímetros y en total se utilizaron 11 electrodos. Más adelante se explicará con detalle la geometría de los electrodos y la determinación del número óptimo según las dimensiones de la celda.

3.1.2 Geometría de los electrodos. La geometría de los electrodos es importante ya que entre mayor sea el área de contacto entre la superficie del electrodo y el agua a tratar, mayor será la eficiencia en el tratamiento. Para esta evaluación utilizaron láminas rectangulares con dimensiones de 80 mm de ancho y 110 mm de alto, lo que brinda un área de contacto de 8.800 mm², con un espesor de 3 mm.

Adicionalmente, cada lámina tenía una extensión en la parte superior para poder conectarse a la fuente de poder fuera del agua, las dimensiones de la extensión de los electrodos fueron: 20 mm de ancho y 40 mm de largo. Gracias a que la conexión fue de tipo monopolar para el cátodo y el ánodo; los electrodos ubicados en los extremos fueron perforados para poderlos conectar al rectificador de corriente.

En la Figura 17 se pueden observar los electrodos de aluminio que se utilizaron para el tratamiento.

Figura 17. Electrodo de aluminio utilizados.



Fuente: Elaboración propia.

3.1.3 Materiales de los electrodos. Los materiales de los electrodos en un proceso de electrocoagulación juegan un papel importante ya que será el electrodo quien brinde los agentes coagulantes para llevar a cabo el proceso de neutralización de los contaminantes presentes en el agua. Como se ha explicado durante el documento, la eficiencia del tratamiento se puede ver modificada dependiendo del material utilizado para los electrodos y la naturaleza del mismo. La decisión del metal a utilizar va a depender de las condiciones que presente el agua que se desea tratar y del factor económico que juega un papel importante. Para la elección de los materiales en los electrodos, primó el factor económico y la facilidad en la obtención de los mismos.

Los materiales más utilizados son el hierro y el aluminio, además cada uno de ellos presentará reacciones diferentes durante el proceso, como se mostraron en el capítulo anterior. Para esta evaluación se utilizaron hierro y aluminio como materiales para los electrodos.

A continuación, se presentarán las características más relevantes de los elementos que se utilizaron como electrodos para esta investigación.

3.1.3.1 Aluminio. “Es un elemento químico metálico, número atómico 13, peso atómico 26,9815 y pertenece al grupo IIIA del sistema periódico. Es el elemento metálico más abundante en la tierra y en la luna, pero no se encuentra de forma libre en la naturaleza, se encuentra distribuido en plantas y casi todas las rocas en su mayoría ígneas que contienen silicatos”¹⁰⁵.

3.1.3.2 Hierro. “Elemento químico de símbolo Fe, número atómico 26 y peso atómico 55,847, es el cuarto elemento más abundante en la corteza terrestre. Es un metal maleable, de color gris plateado y magnético. Su presencia en el agua provoca precipitación y coloraciones. El hierro es un buen agente reductor y puede oxidarse hasta el estado +2 y+3”¹⁰⁶.

La Tabla 2 resume las características más relevantes de ambos elementos.

Tabla 2. Características del hierro y del aluminio.

Características	Elementos	
	Aluminio	Hierro
Número atómico	13	26
Valencia	3	2,3
Estado de oxidación	3	3
Electronegatividad	1,5	1,8
Radio covalente (Å)	1,18	1,25
Radio iónico (Å)	0,50	0,64
Radio atómico (Å)	1,43	1,26
Configuración electrónica	[Ne]3s ² 3p ¹	[Ar]3d ⁶ 4s ²
Masa atómica (g/mol)	269,815	55,847
Densidad (g/ml)	2,70	7,86
Punto de ebullición (°C)	2450	3000
Punto de fusión (°C)	660	1536

Fuente: LENNETECH. Elementos [en línea]. 2018- [citado el 7 de marzo de 2018]. Disponible en: <https://www.lenntech.es/periodica/elementos>

¹⁰⁵ LENNETECH. Aluminio [en línea]. 2018- [citado el 7 de marzo de 2018]. Disponible en: <https://www.lenntech.es/periodica/elementos/al.htm#ixzz5G5ZxAZes>

¹⁰⁶ LENNETECH. Hierro [en línea]. 2018- [citado el 7 de marzo de 2018]. Disponible en: <https://www.lenntech.es/periodica/elementos/fe.htm#ixzz5G5cPehUw>

3.1.4 Número de electrodos. Según Kobya, *et al.*¹⁰⁷, es muy importante tener disolución óptima de iones que permitan llevar a cabo el tratamiento de la mejor manera y teniendo en cuenta el volumen a tratar. Para tal fin se debe controlar el área superficial de los electrodos o calcular el número adecuado de electrodos requeridos para abarcar la totalidad del volumen.

Teniendo en cuenta las dimensiones de la sección en donde se llevó a cabo el tratamiento, fue posible determinar el número de electrodos óptimo para la celda previamente diseñada. La Ecuación 1 sirvió para determinar el número de electrodos requeridos para el tratamiento.

Ecuación 1. Número de electrodos.

$$N_E = \frac{A_c - (2 * D_{E-P})}{D_{maxE} + E_E}$$

Fuente: ARANGO RUIZ, A. y GARCÉS GIRALDO, Luis Fernando. Diseño de una celda de electrocoagulación para el tratamiento de aguas residuales de la industria láctea. En: Revista Universidad EAFIT. Julio-agosto-septiembre, 2007. vol. 43, no. 147, p. 64. Modificado por autores.

Donde,

N_E : Número de electrodos.

A_c : Ancho de la celda, mm.

D_{E-P} : Distancia de los electrodos a la pared lateral de la celda, mm.

D_{maxE} : Distancia máxima entre electrodos, mm.

E_E : Espesor del electrodo, mm.

Aplicando los datos de la celda y de los electrodos de esta investigación, se determinó el número de electrodos como se muestra en la Ecuación 2.

¹⁰⁷ KOBYA, Mehmet; TANER CAN, Orhan y BAYRAMOGLU, Mahmut. Treatment of textile wastewaters by electrocoagulation using iron and aluminum electrodes. En: Journal of Hazardous Materials. Marzo, 2003. vol. 100, p. 163-178.

Ecuación 2. Determinación del número óptimo de electrodos.

$$N_E = \frac{126mm - (2 * 21mm)}{5mm + 3mm}$$
$$N_E = 10,5 \approx 11 \text{ Electrodos}$$

Basados en lo anterior se hizo el diseño de la celda de modo que tuviera capacidad para soportar 11 láminas que actuarían como electrodos.

3.2 EQUIPOS ADICIONALES

Además de la celda y los electrodos, el montaje final se completó con un rectificador de corriente que sirvió como fuente de poder para llevar a cabo el proceso y poder variar la densidad de corriente durante los tratamientos. Además del rectificador, se utilizó una bomba de agua sumergible, que se encargó de succionar el agua sin tratar y hacerla llegar hasta la celda donde se llevó a cabo el tratamiento.

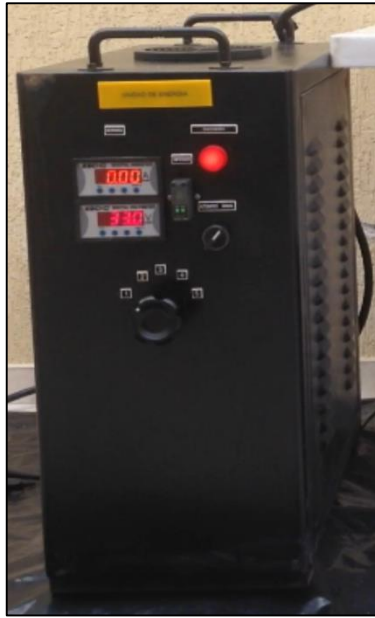
3.2.1 Rectificador de corriente. Para el desarrollo de este proyecto se utilizó un rectificador de la marca PROYECTOS E INGENIERÍA CYC S.A.S. Es un rectificador estático que suministra voltaje DC constante con bajo rizado, está diseñado bajo normas de ejecución NTC, con una capacidad de corriente suficiente para alimentar a la carga requerida. Algunas de las características acerca del rectificador de corriente son:

- Por su diseño se adecúa a servicio pesado y a las condiciones eléctricas complejas de Colombia.
- Posee señalización con elementos digitales, leds y alarmas con contactos secos.
- Construido a modo de gabinete metálico de construcción robusta, con acabado en pintura electrostática negra, ésta pintura es epóxica en polvo y horneada con el fin de prevenir corrosión.
- Características para aplicación en subestaciones eléctricas, sistemas de telecomunicaciones y telemetría.
- Posee ventilación con potencias de entre uno KW y dos KW.

Otras características del rectificador se relacionan el Anexo A, donde se exponen características para tres tipos de rectificadores, sin embargo, el rectificador de interés para este proyecto es el ubicado en la tercera columna con potencia de cinco KW.

En la Figura 18 se puede observar el rectificador de corriente que se utilizó como fuente de poder para los diferentes tratamientos realizados durante esta evaluación.

Figura 18. Rectificador de corriente utilizado para los tratamientos.



Fuente: Elaboración propia.

3.2.2 Bomba de agua. La bomba de agua que se utilizó para el tratamiento, fue una bomba sumergible de la marca HT, referencia HJ-531. Los parámetros de operación de la bomba son mostrados en la Tabla 3.

Tabla 3. Parámetros de operación de la bomba de agua.

Parámetro	Valor
Voltaje (V)	220-240V/50-60Hz 110-120V/60Hz
Potencia (W)	5
Elevación máxima (cm)	60
Caudal de salida (L/h)	350
Peso (kg)	0.18

Fuente: Manual de especificaciones de la bomba.

La Figura 19 ilustra la bomba que se utilizó para los tratamientos.

Figura 19. Bomba HJ-531 utilizada en el procedimiento.



Fuente: PINTEREST. Bomba sumergible [en línea]. 2018- [citado el 29 de mayo de 2018]. Disponible en: <https://www.pinterest.com.mx/so ngjoy0008/songjoy-hj-531/>

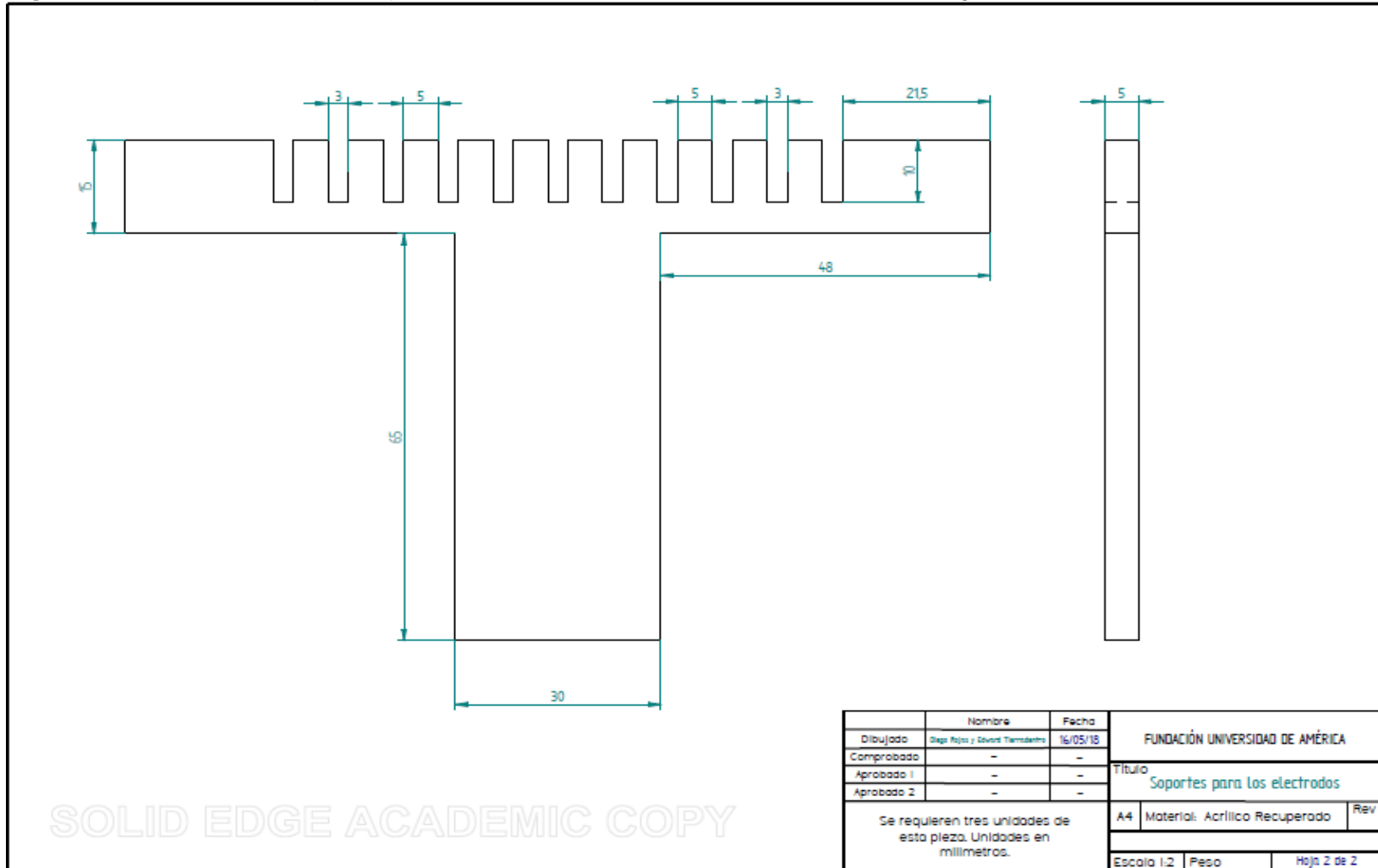
3.3 PLANOS DE LA CELDA ELECTROCOAGULACIÓN UTILIZADA EN EL TRATAMIENTO

Las partes del montaje que requirieron diseño por parte de los autores fueron la celda y los soportes de los electrodos, los cuales llevaban 11 espacios para ubicar el número de electrodos que previamente se calculó. Como se mencionó anteriormente, el espacio entre cada electrodo era de cinco milímetros.

La Figura 20 muestra los planos del diseño de los soportes para los electrodos, en total se necesitaron tres de estas unidades, dos para soportar la base de los electrodos y una en la parte superior para evitar el contacto entre los mismos. Los soportes para los electrodos alojaron los once electrodos con un espesor de tres milímetros cada uno y un espaciamiento de cinco milímetros; además contaban con una extensión de 65 mm, para separar los electrodos le fondo de la celda.

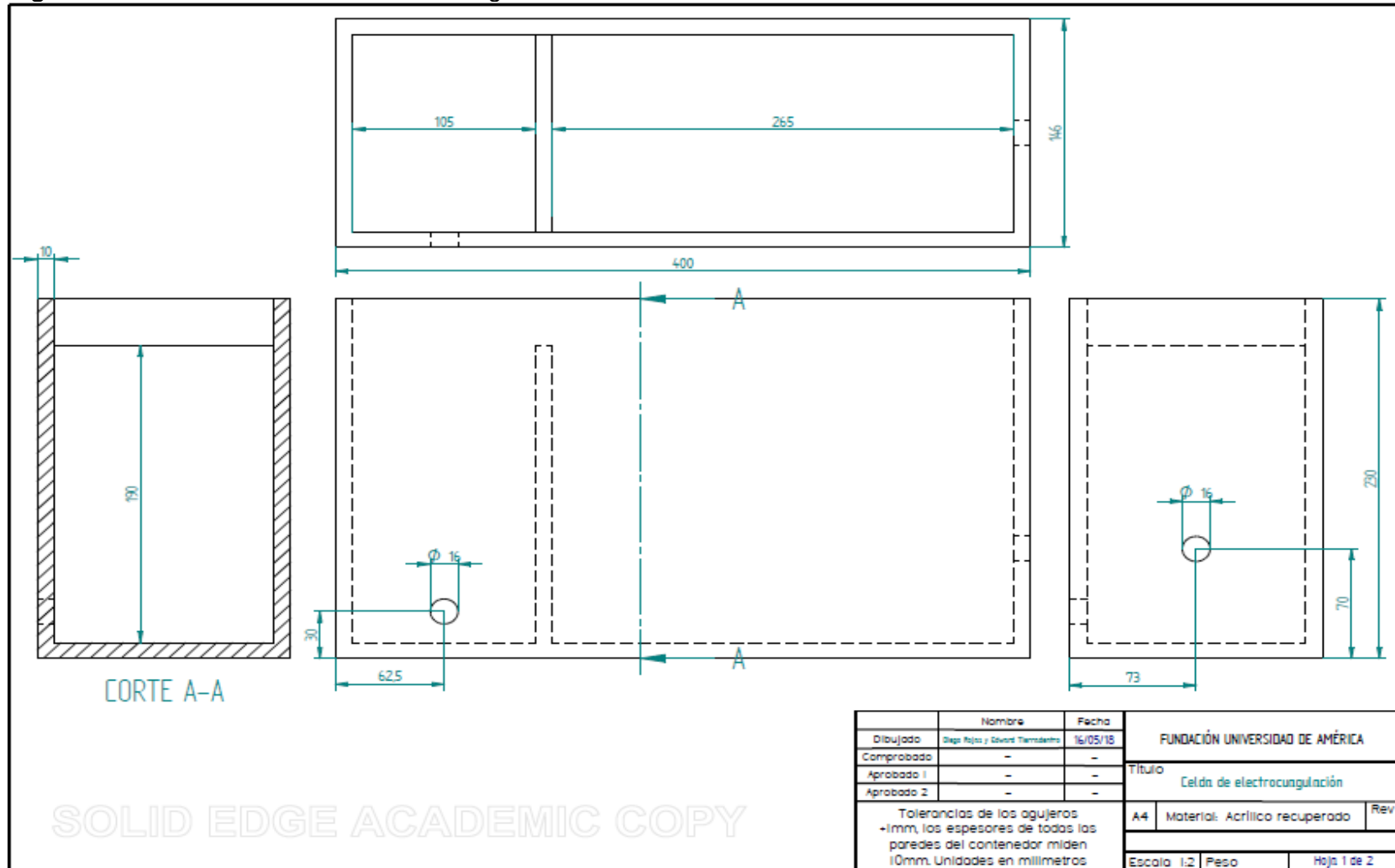
Por otro lado, en la Figura 21 se pueden apreciar los planos de la celda que posteriormente se construyó. En el gráfico se muestran todas las dimensiones de las dos secciones que componían la celda: la primera sección contaba con menor volumen y fue allí donde se alojaron los electrodos y en donde ocurrió el tratamiento. Por otro lado; la segunda sección contaba una mayor capacidad volumétrica y su función fue recibir el agua ya tratada y alojarla por un tiempo adecuado para lograr la separación de las fases por medio de flotación y sedimentación.

Figura 20. Planos de los soportes para los electrodos dentro de la celda de electrocoagulación.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 21. Planos de la celda de electrocoagulación utilizada en la evaluación.



Fuente: Elaboración propia.

3.4 DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE ELECTROCOAGULACIÓN REALIZADO

Una vez se terminó la construcción de la celda de electrocoagulación se realizó el montaje apropiado para realizar los distintos tratamientos de agua de interés. El ensamblaje final para los procesos estaba constituido por:

- Celda de electrocoagulación.
- Electrodo de materiales metálicos.
- Regulador de corriente (fuente de poder).
- Bomba de agua.
- Elementos adicionales (contenedores del agua, válvulas y tubos, etc).

Mediante la Figura 22 se ilustra cómo quedó el montaje final listo para realizar los tratamientos.

Figura 22. Montaje final para realizar tratamiento de agua por electrocoagulación.



Fuente: Elaboración propia.

El agua que se trató durante el proceso, fue un agua de producción petrolera proveniente de un campo ubicado en la cuenta del Valle Superior del Magdalena en el departamento de Huila, Colombia.

En total se realizaron cuatro tratamientos, de los cuales dos fueron con electrodos de hierro y dos con electrodos de aluminio. Para los tratamientos, por decisión de la empresa, únicamente se alteraron dos variables del proceso: la densidad de corriente por medio del cambio de voltaje y los materiales de los electrodos.

La densidad de corriente depende de la intensidad de la misma y el área trasversal del conductor que en este caso es el electrodo. La Ecuación 3 representa la densidad de corriente.

Ecuación 3. Densidad de corriente.

$$J = \frac{I}{A}$$

Fuente: SERWAY, Raymond A. y JEWETT, John W., Jr. Física para ciencias e ingeniería con Física moderna. Traducido por Víctor Campos Olguín. 7 ed. México, D.F.: Cengage Learning, 2009. no. 2. 639 p. ISBN-13-978-607-481-358-6.

Donde,

J: Densidad de corriente, A/mm².

I: Intensidad de corriente, A.

A: Área trasversal del conductor, mm².

Las variaciones que se realizaron entre los tratamientos fueron:

- Para los electrodos: los materiales se variaron entre hierro y aluminio.
- Para la densidad de corriente: se varió el voltaje entre 30V y 60V.

En la Tabla 4 se resumen las variaciones que se realizaron en los cuatro tratamientos, los valores de amperaje para calcular la densidad de corriente se observaron en el tablero del rectificador dependiendo del voltaje de entrada que se le aplicaba a la celda.

Tabla 4. Variaciones durante los tratamientos.

Variable	Tratamiento			
	1	2	3	4
Material del electrodo	Aluminio	Aluminio	Hierro	Hierro
Voltaje (V)	30	60	30	60
Intensidad de corriente (A)	6	18	6	12
Área de contacto con el agua (mm ²)	8.800	8.800	8.800	4.400
Densidad de corriente (A/mm ²)	0,000681	0,00204	0,000681	0,0027

Fuente: Elaboración propia.

Al finalizar los cuatro tratamientos con la variación de algunas condiciones, se tomaron muestras de cada uno de los procesos para realizar un análisis de laboratorio de cada muestra y determinar el comportamiento de los parámetros que se definieron para esta evaluación.

4. DESCRIPCIÓN DE LAS PRUEBAS DE LABORATORIO

La realización de las pruebas de laboratorio es importante ya que mediante un análisis antes y después del tratamiento, se puede determinar la eficiencia del mismo en la remoción de algunos contaminantes. Para el caso de esta evaluación, los resultados de las pruebas de laboratorio sirvieron para determinar si el tratamiento de aguas por medio de electrocoagulación cumple o no, los límites de calidad establecidos por la resolución 0631 de 2015. A lo largo de este capítulo se describirán las pruebas de laboratorio que se le realizaron a las muestras de agua sin tratar y después del tratamiento; por otro lado, se explicarán los métodos utilizados para realizar la caracterización, y por último se mostrarán los resultados obtenidos, junto con los porcentajes de remoción que se alcanzaron en cada escenario de tratamiento evaluado.

4.1 CONSIDERACIONES PRELIMINARES

Para llevar a cabo la caracterización de cada una de las muestras de agua se realizaron pruebas de laboratorio para cada parámetro determinado, estas pruebas fueron realizadas por los autores, bajo la supervisión del personal coordinador del laboratorio y bajo toda la normatividad de seguridad y salud industrial requerida en dicho lugar, lo que incluyó una inducción en temas relacionados con el manejo de equipos, elementos, reactivos y demás implementos en el laboratorio. Además se exigió el uso de elementos de seguridad como bata, guantes, tapabocas y gafas de seguridad, lo anterior con el fin de preservar la integridad física de todo el personal y de los recursos físicos del laboratorio, y así obtener los resultados con la mayor veracidad y precisión posible.

4.2 MATRIZ DE PRUEBAS A REALIZAR

Los parámetros que se decidieron analizar están especificados en el Cuadro 5. Se tomaron estos parámetros ya que la mayoría son parámetros generales que están presentes en la Resolución 0631 de 2015. Además, fueron definidos según las disposiciones técnicas de la empresa.

Cuadro 5. Parámetros de interés para medir.

Caracterización Fisicoquímica				
Pruebas físicas		Unidades	Pruebas químicas	Unidades
Turbidez		NTU	pH	-
Color	Real	PCU	Demanda Química de Oxígeno (DQO)	mgO ₂ /L
	Aparente	PCU		
Contenido de Aceites y Grasas		mg/L	Conductividad	mS
Sólidos	Suspendidos	mg/L		
	Disueltos	mg/L		
	Totales	mg/L		

Fuente: Elaboración propia.

4.3 DESCRIPCIÓN DE LAS PRUEBAS DE LABORATORIO

Las pruebas de laboratorio se realizaron en los laboratorios de investigación de la Pontificia Universidad Javeriana, ya que así fue dispuesto por la empresa. Todas las determinaciones se realizaron siguiendo los procedimientos establecidos por el manual de microbiología ambiental de esta universidad. Cada parámetro se determinó cinco veces ya que en total eran cinco muestras de agua: la muestra sin tratar y las cuatro tratadas a diferentes condiciones.

4.3.1 pH. Para la medición de este parámetro se utilizó un pH-metro de la marca Hanna Instruments de referencia HI2221, que se puede observar en la Figura 23, con su respectivo electrodo calibrado con una solución Buffer pH siete. La determinación del pH se realizó en tres simples pasos: primero se limpió el electrodo, seguido a esto se introdujo en su totalidad en la muestra que se deseaba medir, y una vez se estabilizó la medición en el tablero, se tomó el valor de la medida.

Figura 23. Medición del pH.



Fuente: Elaboración propia.

4.3.2 Conductividad. Esta propiedad fue determinada con el medidor multiparámetro SensoDirect 150 de la marca Lovibond. Dicho medidor fue calibrado con una solución patrón de KCl 0,01M de 1.413 μ S. Esta determinación es similar a la implementada para medir el pH; se introduce el electrodo en su totalidad en la muestra de interés y una vez se establece el valor en el tablero, se toma la medida.

4.3.3 Turbidez. Para la medición de la turbidez se utilizó un turbidímetro de la marca Hanna Instruments de referencia HI88703. La determinación comenzó llenando la cubeta con 10 mL de muestra, hasta la marca; paso seguido, se limpió la cubeta con un paño y con aceite de silicona sin dejar ningún tipo de suciedad; se introdujo la cubeta con la muestra, en el instrumento y se gira hasta el tope para cerrar la tapa. Para tomar la medición se pulsa “LEER” y se toma el valor en el tablero de medición.

4.3.4 Color. La determinación del color se realizó por medio de un fotómetro multiparámetro de sobre mesa de la empresa Hanna Instruments de referencia HI83099. Vale la pena resaltar que para la medición del color, se hicieron dos determinaciones: color real y color aparente. El primer paso fue establecer el valor de referencia, llamado “blanco”, para las muestra a analizar. Este proceso se realizó llenando la cubeta del equipo con 10 mL de agua desionizada e introduciéndola en el porta-cubetas, una vez estuvo bien cerrado se pulsó “CERO” en el equipo y al aparecer el mensaje “-0.0-” en el tablero, el medidor quedó listo para la medición. Para la determinación del color aparente, se tomaron 10 mL de muestra en la cubeta del equipo y se tomó el valor de la medición pulsando “LEER”, una vez estuvo bien cerrado el porta-cubetas. El procedimiento para determinar el color verdadero fue el mismo antes de tomar la medida, la muestra se sometió a un proceso de centrifugación a 150 rpm por 15 minutos. El equipo utilizado para la medición de color se muestra en la Figura 24, ya que es el mismo que se utilizó para determinar el DQO.

4.3.5 Demanda Química de Oxígeno (DQO). El equipo que se utilizó para esta medición fue el fotómetro multiparámetro de sobremesa HI83099 de la marca Hanna Instruments. En el tablero del equipo se seleccionó el parámetro que se deseaba medir, es decir, DQO. Para realizar la medición de estas muestras se asumió que contaban con un alto porcentaje de materia orgánica, por lo cual se escogieron soluciones de rango alto para realizar la determinación. Tras seleccionar el parámetro de medida, se procedió a agregar dos mililitros de cada muestra al kit de reactivos para el rango escogido, incluyendo una muestras con agua desionizada.

Una vez realizadas las mezclas, se precalentó el reactor de digestión HI839300 de Hanna Instruments hasta una temperatura de 150°C y se introdujeron las mezclas

previamente realizadas, durante dos horas. Culminado este tiempo se dejaron enfriar los recipientes durante una hora, y se procedió a tomar las mediciones.

El primer paso fue determinar el valor del “blanco” con ayuda de la mezcla entre el reactivo y el agua desionizada, el proceso que se siguió fue: poner el recipiente en el equipo, presionar “CERO” en la pantalla y una vez apareció el valor “-0.0-“, el equipo estuvo listo para realizar las determinaciones de las muestras de interés. Para medir el DQO de la muestra sin tratar y las muestras tratadas se siguió el mismo procedimiento para todos los casos: se introdujo el recipiente con la mezcla muestra-reactivo, se oprimió “LEER” y finalmente se obtuvo el resultado en unidades mg/L.

La Figura 24 muestra el equipo junto con los reactivos rango alto que se utilizaron para la medición del parámetro.

Figura 24. Fotómetro multiparámetro de sobremesa HI83099 y kit de reactivos rango alto.



Fuente: Elaboración propia.

4.3.6 Contenido de aceites y grasas. “En la determinación de grasas y aceites no se mide una cantidad absoluta de una sustancia específica; se determinan grupos de sustancias con características físicas similares con base en su solubilidad en el solvente. Así, el término "grasas y aceites" comprende cualquier material recuperado como una sustancia soluble en el solvente (n-hexano). Esto incluye otros materiales extraídos por el solvente de la muestra acidificada, tales como compuestos azufrados, algunos colorantes orgánicos y clorofila, no volatilizados durante el ensayo”¹⁰⁸ .

4.3.7 Sólidos suspendidos, disueltos y totales. La determinación de los sólidos presentes en las muestras de agua tratada, se realizó por medio de evaporación del líquido y la comparación de los pesos de cada recipiente antes y después de la

¹⁰⁸ INSTITUTO DE HIDROLOGÍA, METEOROLOGÍA Y ESTUDIOS AMBIENTALES. Determinación de grasas y aceites en aguas por el método soxhlet. TP0150. Bogotá D.C.: IDEAM, 2007. p. 2.

evaporación. Para los sólidos suspendidos se filtraron 20 mL de muestra con ayuda de un papel filtro; para los sólidos disueltos se agregaron 20 mL de muestra en un beaker y por último se agregaron cinco mL de muestra a una caja petri. Los tres recipientes fueron pesados antes de agregar las muestras y después de someterse a una temperatura de 105°C durante 12 horas, tiempo durante el cual se evaporó el líquido. Finalmente para tener la medida, se dividió el diferencial de pesos en el volumen agregado.

5. CARACTERIZACIÓN DEL AGUA A TRATAR MEDIANTE PRUEBAS DE LABORATORIO

La caracterización de las aguas residuales industriales es de vital importancia para cualquier operación industrial, de esta forma es posible conocer la propiedades físicas, químicas y biológicas que posee un efluente y así tomar las acciones necesarias en cuanto al tratamiento del mismo con el fin de cumplir con la normatividad vigente o identificar otros usos potenciales que pueda tener el agua. Todo encaminado a la optimización de las operaciones y la reducción de costos ya sea por tratamientos o por el no pago de multas por infringir la normatividad. En este capítulo se hablará del tipo de agua que se utilizó en la evaluación del método, además se mostrarán los resultados que arrojaron las pruebas de laboratorio realizadas.

5.1 TIPO DE AGUA A TRATAR

Para el desarrollo de este proyecto se utilizó agua de producción petrolera de un campo petrolero de la cuenca del Valle Superior del Magdalena del departamento de Huila, Colombia. El petróleo crudo que se produce en el campo tiene una gravedad API de 23°. En la Figura 25, se observa la muestra de agua traída del campo para el tratamiento.

Figura 25. Muestra de agua de producción sin tratar.

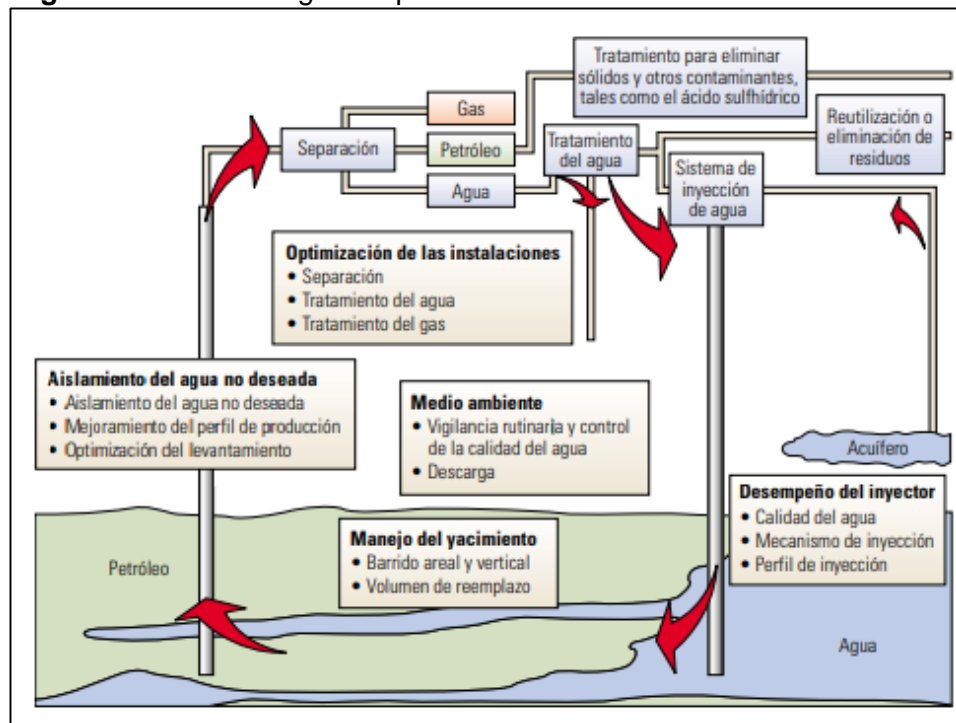


Fuente: Elaboración propia.

Es posible definir el agua de producción como agua obtenida en superficie, a través de pozos de petróleo y/o gas, desde una formación de interés, un acuífero o un proyecto de inyección de agua¹⁰⁹.

El agua indiscutiblemente hace parte del sistema petrolífero convencional, la mayoría de campos petroleros maduros tienen grandes cantidades de agua y por esto la producción de la misma en superficie tiene volúmenes importantes. En EUA, el agua producida representa un 98% de todos los residuos generados por la industria petrolera. Por esta magnitud tan importante se han generado esfuerzos para tratar de controlar su producción y aprovechar dicho recurso en superficie, por esta razón se utiliza el agua para estimular la recuperación del petróleo¹¹⁰. En la Figura 26 se muestra el esquema del ciclo que tiene el agua producida desde que está en el yacimiento, llega a superficie, pasa por métodos de tratamiento y cuando finalmente se decide su uso final.

Figura 26. Ciclo del agua de producción.



Fuente: ARNOLD, Richard, *et al.* Manejo de la producción de agua: De residuo a recurso. En: Oildfield Review. Septiembre-noviembre, 2004. vol. 16, no. 3, p. 32.

¹⁰⁹ EBRATTH SALGADO, Oscar Aressu. Análisis del agua de producción. Laboratorio de fluidos – Análisis de aguas de producción [en línea]. 2011- [citado el 28 de mayo de 2018]. Disponible en: <https://es.slideshare.net/oebratth/agua-de-produccion>

¹¹⁰ ARNOLD, Richard, *et al.* Manejo de la producción de agua: De residuo a recurso. En: Oildfield Review. Septiembre-noviembre, 2004. vol. 16, no. 3, p. 31.

De acuerdo con Méndez¹¹¹, el agua de producción se puede clasificar según su origen en:

- **Agua connata.** Dicho fluido es de origen sedimentario, y representa el agua que ha permanecido atrapada en los poros de la roca bajo el subsuelo por miles de años, estas rocas porosas se denominan mantos acuíferos y debido a cambios geológicos formaron sellos que impiden la migración del agua, convirtiéndola en agua fósil. A pesar de esto al construir un pozo se produce una diferencia de presión que permite que ésta agua llegue a la superficie, suelen ser aguas densas y con alto contenido salino.
- **Agua intrusiva.** También llamada agua de formación, es aquella que quedó atrapada en los intersticios de la roca que pudo o no estar presente cuando se depositó la formación. Puede ser parte de un acuífero activo lo cual favorecería la producción de hidrocarburos.
- **Agua inyectada.** Es la que se genera por las alternativas de recobro mejorado como inyección o reinyección de agua, con lo cual se busca el mantenimiento de la presión del reservorio o desplazar eficazmente el hidrocarburo.

Además de lo anterior Ebratth¹¹², afirma que el agua de producción también se clasifica en agua buena o agua mala dependiendo de su relación con el sistema petrolífero y el aporte a la rentabilidad del proyecto, dicha clasificación se resume en el Cuadro 6.

¹¹¹ MÉNDEZ GARCÍA, José David. Análisis de agua de producción [en línea]. 2011- [citado el 28 de mayo de 2018]. Disponible en: http://www.academia.edu/9254018/An%C3%A1lisis_de_agua_de_producci%C3%B3n

¹¹² EBRATTH SALGADO, Oscar Aressu. Análisis del agua de producción. Laboratorio de fluidos – Análisis de aguas de producción [en línea]. 2011- [citado el 28 de mayo de 2018]. Disponible en: <https://es.slideshare.net/oebratth/agua-de-produccion>

Cuadro 6. Clasificación del agua de producción según Ebratth.

Agua buena	Agua mala
<ul style="list-style-type: none">- El agua al ser inmisible con el petróleo, genera el desplazamiento del mismo permitiendo su flujo hacia el pozo.- El agua se mantiene separada del petróleo.- Es posible reinyectar una parte del agua producida para mantener o incrementar la producción de los hidrocarburos.- El volumen producido se encuentra por debajo del límite económico de WOR.	<ul style="list-style-type: none">- El agua afecta negativamente el flujo del petróleo, disminuyendo su producción y convirtiéndose en un problema operacional.- Sobrecarga los sistemas de tratamiento de agua.- El volumen de agua producida excede el volumen requerido para reinyección.- El volumen producido se encuentra por encima del límite económico de WOR.

Fuente: EBRATTH SALGADO, Oscar Aressu. Análisis del agua de producción. Laboratorio de fluidos – Análisis de aguas de producción [en línea]. 2011- [citado el 28 de mayo de 2018]. Disponible en: <https://es.slideshare.net/oebratth/agua-de-produccion>

5.2 CARACTERÍSTICAS FÍSICOQUÍMICAS DEL AGUA PRODUCIDA

Las propiedades y características del agua de producción petrolera no son uniformes para todo el mundo, dichos parámetros van a depender de factores como el punto geográfico del cual se esté produciendo el hidrocarburo y la litología de la formación en la cual se encuentre, este último es uno de los factores más determinantes. Además, las características del hidrocarburo que se produce asociado también inciden en las propiedades del agua producida¹¹³. Los principales constituyentes del agua de producción son:

- **Contenido de sal.** Este parámetro se puede expresar como salinidad, conductividad o sólidos totales disueltos (TDS). La mayoría del agua producida es más salada que el agua de mar con valores superiores a 300.000 mg/L¹¹⁴.
- **Aceites y Grasas.** Este parámetro mide varios compuestos orgánicos asociados con hidrocarburos, el aceite y grasa se pueden encontrar en distintas formas como se muestra en el Cuadro 7.

¹¹³ THE PRODUCED WATER SOCIETY. What is produced water [en línea]. 2017- [citado el 7 de mayo de 2018]. Disponible en: <http://www.producedwatersociety.com/produced-water-101/>

¹¹⁴ Ibid.

Cuadro 7. Compuestos orgánicos asociados con hidrocarburos.

Aceite libre	Aceite disperso	Aceite disuelto
Se aprecian gotas grandes, fácilmente extraíbles por métodos de separación por gravedad.	Se observan pequeñas gotitas y presenta cierta complejidad para su separación.	Hidrocarburos y otras sustancias similares disueltas en la corriente de agua, presentan una gran dificultad para su separación.

Fuente: THE PRODUCED WATER SOCIETY. What is produced water [en línea]. 2017- [citado el 7 de mayo de 2018]. Disponible en: <http://www.producedwatersociety.com/produced-water-101/>

- **Compuestos tóxicos inorgánicos y orgánicos.** Pueden ser aditivos usados en operaciones de perforación y producción que han viajado hasta la formación o pueden filtrarse en el agua producida por la formación¹¹⁵.
- **Material radioactivo de origen natural.** Algunas formaciones con contenido de hidrocarburos presentan niveles de radiación natural que se filtra al agua producida, su concentración y características dependerá de la formación¹¹⁶.
- **Metales pesados.** Generalmente se encuentran metales pesados en el agua de producción, comúnmente se encuentra mercurio, cadmio, zinc, níquel, arsénico, cobre, entre otros¹¹⁷.

5.3 PRESENTACIÓN DE RESULTADOS OBTENIDOS TRAS LAS PRUEBAS

La finalidad de esta evaluación es analizar el comportamiento de un nuevo método de tratamiento para aguas de producción petrolera. Después de realizar los tratamientos mediante electrocoagulación, visualmente se pudo evidenciar un cambio entre las muestras sin tratar y las muestras tratadas, lo que llevo a pensar que hubo un cambio significativo en las propiedades del agua. La Figura 27 ilustra las cinco muestras de agua, en donde se puede visualizar el cambio mencionado anteriormente.

¹¹⁵ Ibid.

¹¹⁶ Ibid.

¹¹⁷ TUV NEL Technology for life. Produced water composition [en línea]. 2017- [citado el 7 de mayo de 2018]. Disponible en: http://www.tuvnel.com/assets/content_images/Produced_water_composition.pdf

Figura 27. Muestras de agua sin tratar y tratada a diferentes condiciones.



Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 27 se puede apreciar, de izquierda a derecha, la muestra sin tratar, seguida de las muestras tratadas con aluminio a 30V y 60V, respectivamente; y por último las muestras tratadas con hierro a 30V y 60V.

A pesar de que visualmente se muestra una mejora en la composición del agua, son los resultados de las pruebas de laboratorio las que dictaminarán el comportamiento del método de tratamiento por electrocoagulación fue positivo o por el contrario mostró malos resultados.

En la Tabla 5 se presentan los resultados obtenidos de la caracterización del agua de producción sin tratar.

Tabla 5. Caracterización de agua sin tratar.

Parámetro	Unidades	Análisis de aguas
pH	-	7,16
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	mgO ₂ /L	740
Sólidos Suspendidos	mg/L	850
Sólidos Disueltos	mg/L	5.785
Sólidos Totales	mg/L	10.020
Color Real	PCU	111
Color Aparente	PCU	16
Grasa y Aceites	mg/L	6,88
Turbidez	NTU	11,8
Conductividad	mS	15,21

Fuente: Elaboración propia.

La caracterización del agua sin tratar, es el punto base para determinar la eficiencia de remoción de contaminantes del método. La Tabla 6 muestra los resultados de la caracterización de las muestras tratadas en los diferentes escenarios. Para mayor facilidad se nombraron según el material y el voltaje que se aplicó durante su respectivo tratamiento.

Tabla 6. Caracterización de las muestras de agua tratadas mediante electrocoagulación.

Parámetro	Unidades	Aluminio 30V	Aluminio 60V	Hierro 30V	Hierro 60V
pH	-	7,69	7,88	7,91	8,56
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	mgO ₂ /L	451	385	490	253
Sólidos Suspendidos	mg/L	815	950	750	795
Sólidos Disueltos	mg/L	5.550	4.700	5.570	5.250
Sólidos Totales	mg/L	9.640	9.080	8.920	8.640
Color Real	PCU	6	61	333	500
Color Aparente	PCU	1	14	184	122
Grasa y Aceites	mg/L	2,32	2,49	2,46	3,78
Turbidez	NTU	4,28	8,13	13,3	31,4
Conductividad	mS	14,77	14,79	14,48	14,25

Fuente: Elaboración propia.

Por último comparando las caracterizaciones del agua antes y después de los tratamientos, se determinaron los porcentajes de remoción para cada parámetro dependiendo de las condiciones del tratamiento. La Tabla 7 muestra los porcentajes de remoción.

Tabla 7. Porcentajes de remoción para cada parámetro.

Parámetro	Porcentaje de remoción (%)			
	Aluminio 30V	Aluminio 60V	Hierro 30V	Hierro 60V
Ph	-7,40	-10,06	-10,47	-19,55
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	39,05	47,97	33,78	65,81
Sólidos Suspendidos	4,12	-11,76	11,76	6,47
Sólidos Disueltos	4,06	18,76	3,72	9,25
Sólidos Totales	3,79	9,38	10,98	13,77
Color Real	94,59	45,05	-200,00	-350,45
Color Aparente	93,75	12,50	-1.050,00	-662,50
Grasa y Aceites	66,28	63,81	64,24	45,06
Turbidez	63,73	31,10	-12,71	-166,10
Conductividad	2,89	2,76	4,80	6,31

Fuente: Elaboración propia.

5.4 COMPARACIÓN DE RESULTADOS OBTENIDOS

Como se puede observar en la Tabla 7, existen parámetros en los que el porcentaje de remoción aporta valores negativos, esto quiere decir que el comportamiento del tratamiento fue desfavorable ya que no redujo el parámetro, por el contrario aumento el valor del mismo.

Según los datos recopilados en la Tabla 7, los porcentajes de reducción de pH fueron negativos, lo que se traduce en un aumento del pH para todos los escenarios del tratamiento, es decir, una tendencia alcalina del medio. Sin embargo, cabe resaltar que en las condiciones donde el voltaje aplicado fue de 30V utilizando electrodos de aluminio, se evidencio un menor aumento en este parámetro.

En los valores del DQO todos los tratamientos ofrecieron porcentajes de reducción mayores al 30%. Se evidenció que las mayores reducciones de este parámetro se dieron en los escenarios donde se aplicó un voltaje de 60V, sin embargo, el electrodo de hierro mostró el porcentaje de remoción más alto.

Para los sólidos suspendidos, la utilización de aluminio con voltaje de 60V mostró un aumento en el parámetro a diferencia de los demás escenarios, en donde los sólidos suspendidos se redujeron mostrando los mejores resultados con el electrodo de hierro aplicando 30V.

El tratamiento de electrocoagulación permitió reducciones de sólidos disueltos para todos los escenarios probados, según se aprecia en la Tabla 6. Sin embargo, según los resultados de la Tabla 7 se puede afirmar que el porcentaje de remoción es mayor en con voltajes de 60V, siendo el electrodo de aluminio el mayor porcentaje de remoción con un 18,75%.

La cantidad de sólidos totales se redujo considerablemente para todas las muestras ofreciendo porcentajes de reducción de entre 3,7% y 13,77%, este último porcentaje se presentó aplicando 60V a los electrodos de hierro.

Como se observa en la Tabla 6, para los parámetros de color real y aparente, se presentó un importante aumento en las experiencias con hierro, obteniendo aumentos de hasta el 1.000% según la Tabla 7, lo cual causa un grave inconveniente en el tratamiento de agua. Por otro lado, las experiencias realizadas con aluminio a 30V presentan los mayores porcentajes de reducción del color real y aparente con valores de remoción de 94,59% y 93,75%, respectivamente.

Para el análisis realizado en trazas de grasas y aceites se pudo observar una satisfactoria reducción de dicho parámetro después de realizar el tratamiento, todos los escenarios mostraron altos porcentajes de reducción, mayores al 45%. Sin embargo, el aluminio a 30V fue el que mayor eficiencia aportó para la reducción de

trazas de grasa y aceites con un porcentaje de 66,28% de acuerdo a lo que se establece en la Tabla 7.

Como pasó con el color, la turbidez presenta aumentos muy importantes (entre el 12% el 166%) para los tratamientos realizados con hierro, para aluminio la turbiedad presenta porcentajes de remoción de hasta el 63,72 % para el caso de un voltaje de 30V.

La conductividad es un parámetro muy importante, y presentó reducciones en todos los escenarios, aunque no hubo grandes reducciones, el hierro junto con un voltaje de 60V disminuyo un 6,31% este parámetro.

De acuerdo a lo anterior y con base en los resultados expuestos en la Tablas 6 y la Tabla 7, se puede afirmar que el escenario que presentó mayor eficiencia fue en el que se aplicó voltaje de 30V a los electrodos de aluminio. Estas condiciones mostraron altos porcentajes de reducción en la mayoría de los parámetros analizados, además en una comparación a excepción del pH en donde sufrió el menor aumento de todos los escenarios. A pesar de que la utilización de hierro con voltaje de 60V mostró la mayor reducción en parámetros importantes como el DQO, también presento aumento de varios parámetros principalmente en color real, aparente y turbidez.

6. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

En este capítulo se van a presentar los resultados obtenidos en la caracterización del agua de producción petrolera, después de ser aplicado el método de tratamiento por electrocoagulación. Se va a realizar un análisis del comportamiento de los parámetros medidos en el laboratorio, y basados en eso se determinará el escenario que ofreció mejores resultados gracias al material utilizado para electrodo y del voltaje aplicado. Posterior a esto se compararán las propiedades obtenidas con el elemento seleccionado con las propiedades obtenidas con el método químico convencionalmente utilizado en la empresa. Finalmente se hará una revisión de la norma 0631 para determinar si los parámetros obtenidos con el elemento seleccionado, cumplen con los límites establecidos por dicha norma.

6.1 ANÁLISIS DE LA VARIACIONES Y MAGNITUDES RESULTANTES DE LOS PARÁMETROS, CON EL MÉTODO DE TRATAMIENTO MEDIANTE ELECTROCOAGULACIÓN

6.1.1 pH. Como se mencionó anteriormente el pH es un parámetro que incide en la eficiencia del tratamiento, sin embargo, este parámetro presenta variaciones durante el proceso, tal como se observa en la Tabla 6.

Esta variación en el valor de pH puede adjudicarse, según Kobya, *et al.*¹¹⁸, al material de los electrodos y al pH inicial de la muestra. Para este caso se presentó aumento de dicha propiedad en todos los tratamientos, Arango¹¹⁹, explica que esto se debe a la producción de hidróxidos básicos que se dan por el desgaste de los electrodos de sacrificio. Para esta experiencia el tratamiento realizado con hierro fue el que mayor aumento de pH sufrió, con lo que se puede inferir que en el tratamiento con hierro la cantidad de hidróxidos formados es superior que en el tratamiento con aluminio.

6.1.2 Conductividad. Las sustancias orgánicas son malas conductoras ya que no se ionizan en el agua impidiendo la conducción eléctrica¹²⁰. Al tener agua producto de la industria de los hidrocarburos, es decir, con orígenes orgánicos se puede

¹¹⁸ KOBYA, Mehmet; TANER CAN, Orhan y BAYRAMOGLU, Mahmut. Treatment of textile wastewaters by electrocoagulation using iron and aluminum electrodes. En: Journal of Hazardous Materials. Marzo, 2003. vol. 100, p. 163-178.

¹¹⁹ ARANGO RUIZ, Álvaro. Efecto del pH y la conductividad en la electrocoagulación de aguas residuales de la industria láctea. En: Producción + Limpia. 2012. vol. 1, no. 2, p. 59-67.

¹²⁰ Ibid.

inferir que tendrá valores bajos de conductividad lo cual se ratifica con los resultados obtenidos en la Tabla 5 donde la conductividad de la muestra sin tratar tiene un valor de 15,21 mS, muy cercano al valor máximo admitido para el agua potable.

Cómo se puede evidenciar, los valores de conductividad en el agua posterior al tratamiento presentan una disminución que, aunque no es muy significativa ofrece una mejora en la calidad del agua.

El tratamiento con hierro presenta un mayor porcentaje de reducción de la conductividad con valores entre cuatro por ciento y siete por ciento, esto se relaciona con el aumento del pH. Con los datos obtenidos se evidencia que al obtener un pH más alcalino la conductividad tenderá a disminuir, y al tener pH más ácido el valor de dicho parámetro aumentará. Bárbaro, *et al.*¹²¹, explican este fenómeno afirmando que los óxidos metálicos se hacen más solubles en medios más ácidos, ya que la conductividad es una medida dependiente de la cantidad de sales disueltas.

De acuerdo a lo mencionado en el marco teórico la conductividad es un parámetro de alta incidencia en los procesos de coagulación por lo que al tener muestras con valores de conductividad bajos se podría esperar que la eficiencia del tratamiento no sea la mejor.

6.1.3 Demanda Química de Oxígeno (DQO). De acuerdo con la literatura encontrada, el método de electrocoagulación presenta alta eficiencia en la remoción de DQO, esto es posible evidenciarlo en los resultados obtenidos con la prueba de laboratorio donde se obtuvo hasta un 65,81% de remoción del DQO para la experiencia realizada con hierro a 60V. Además, se observa que hay un incremento en la remoción del DQO para cada uno de los elementos al aumentar el voltaje en el tratamiento, lo anterior es debido a que a mayor voltaje se genera mayor cantidad de iones. Por otro lado, Ghosh, *et al.*¹²², afirma que al aumentar el voltaje, los iones de hidróxido se pegan a las paredes de los electrodos generando una película que actúa como una resistencia adicional causando una disminución del área de contacto entre el agua y el electrodo, lo que genera que la remoción del DQO disminuya. Sin embargo, según los resultados obtenidos, en esta experiencia el disminuir el área de contacto no afecta negativamente la reducción de DQO.

¹²¹ BÁRBARO, Lorena A.; KARLANIAN, Monica A. y MATA, Diego A. Importancia del pH y la conductividad eléctrica (CE) en los sustratos para plantas. Argentina: Ministerio de agricultura, ganadería y pesca, 2014. p. 2.

¹²² GHOSH, D.; MEDHI, C. R. y PURKAIT, M. K. Treatment of fluoride containing drinking water by electrocoagulation using monopolar and bipolar electrode connections. En: Chemosphere. Noviembre, 2008. vol. 73, no. 9, p. 1393-1400.

6.1.4 Turbidez. Según los resultados obtenidos en la turbidez, se puede observar una disminución en dicho parámetro de 31% y 63% para el tratamiento realizado con aluminio. Por otro lado, la turbidez aumenta casi tres veces en el tratamiento con hierro.

Es importante resaltar que para ambos materiales la turbidez aumento a medida que se incrementó el voltaje aplicado, lo cual puede deberse a que con mayor densidad de corriente se observó una reacción más fuerte debido a mayor producción de iones, Orozco, *et al.*¹²³, recomiendan limitar este parámetro puesto que al tener altas densidades de corriente se incrementa la producción de oxígeno y esto conlleva a una mayor generación de espuma aumentando así la turbidez. En el escenario en que se utilizó hierro se observó un producción importante de partículas lo cual influiría en la turbiedad de las muestras ya que, “la turbidez es un parámetro relacionado con la presencia de algunas partículas en suspensión o coloides”¹²⁴.

6.1.5 Grasas y aceites. Como se puede observar en la Tabla 7, los porcentajes de remoción que ofreció la electrocoagulación para éste parámetro son muy significativos para los escenarios realizados, lo cual lleva a pensar que éste método es altamente eficaz en remoción de grasas y aceites, concordando con Morante¹²⁵, quien afirma que la corriente eléctrica tiene gran poder para desestabilizar el equilibrio eléctrico que tienen las grasas y emulsiones.

Cenkin, *et al.*¹²⁶, afirman que esta gran capacidad se debe a que en los electrodos se generan microburbujas de hidrógeno y oxígeno que chocan y se adhieren a los flóculos para llevarlos hacia la superficie del líquido formando espumas, pero además dichas burbujas también pueden arrastrar el aceite y grasas para que floten y sean removidas mecánicamente. Sin embargo Morante¹²⁷, afirma que al desestabilizar las grasas se generan precipitados que aumentaría la cantidad de sólidos, lo cual es posible relacionar con la Tabla 6, donde se ve que entre más se redujo la cantidad de grasas y aceites, mayor fue la cantidad de sólidos totales.

¹²³ OROZCO, Ana Lucia y CASTRO, Sandra Patricia. Remoción de color en aguas residuales del proceso de tinturado de una curtiembre mediante electrocoagulación. En: Ingenium. Mayo, 2012. vol. 6, no. 12, p. 51-58.

¹²⁴ LENNETECH. Turbidez [en línea]. 2015- [citado el 16 de mayo de 2018]. Disponible en: <http://www.lenntech.es/turbidez.htm>

¹²⁵ MORANTE, Gonzalo. Electrocoagulación de Aguas Residuales. En: Revista Colombiana de Física. 2002, vol. 6, no. 2, p. 484-487.

¹²⁶ CENKIN, V. E. y BELEVTSSEV, A. N. Electrochemical Treatment of Industrial Wastewater. En: Effluent and Water Treatment Journal. Julio, 1985. vol. 25, no. 7, p. 243-247.

¹²⁷ MORANTE, Op. Cit. p. 484-487.

Según los resultados de la Tabla 7 se observa que tanto para aluminio como para hierro se obtuvo mayor remoción en la experiencia realizada a 30V, además se puede afirmar que la experiencia con aluminio a 30V fue la que proporcionó un mejor escenario para la remoción de grasas y aceites.

6.1.6 Sólidos totales. Según los datos obtenidos en el laboratorio la cantidad de sólidos totales se relaciona de manera inversa con el valor del pH, se observa que a medida que el pH se hace más básico, es decir aumenta su valor, la cantidad de sólidos totales disminuye. Lo anterior, se debería según Dávila. *et al.*¹²⁸, a que en condiciones básicas se fomenta la formación de hidróxidos de aluminio que ayudan a desestabilizar partículas coloidales para que sea sencillo eliminarlas por flotación o sedimentación. Por otro lado, de acuerdo a los datos observados en la Tabla 6 vemos que la cantidad de sólidos totales es menor cuando se aumenta el voltaje. Esto concuerda con la investigación realizada por Dávila, *et al.*¹²⁹, quien afirma que la densidad de corriente es más efectiva para remoción de sólidos totales cuando se tienen valores más bajos, además afirma que los valores de densidad de corriente intermedia y bajos presentaron las mayores remociones de sólidos totales.

6.1.7 Sólidos suspendidos. Según estudios previos de Solak *et al.*¹³⁰, se obtiene una mayor remoción de sólidos suspendidos con electrodos de aluminio, sin embargo la remoción obtenida con electrodos de hierro también es muy significativa. Al observar los resultados obtenidos en esta experiencia se determina que aunque el aluminio ofrece mayor remoción, la diferencia en los porcentajes de remoción no es muy amplia. Dicho parámetro se relaciona con la turbiedad y como se aprecia en la Tabla 6, a mayor turbiedad en el aluminio, será mayor la cantidad de sólidos suspendidos, lo mismo sucede en el caso del hierro.

6.1.8 Sólidos disueltos. Los resultados observados en la Tabla 6 indican que para cada uno de los elementos, la cantidad de sólidos disueltos fue menor conforme se aumentó el voltaje, lo cual es posible relacionar con la turbidez que siguió el mismo comportamiento, además la cantidad de sólidos totales se comportó de manera semejante. Por lo anterior, se puede inferir que a mayor producción de burbujas

¹²⁸ DÁVILA RINCÓN, Javier; MARRIAGA CABRALES, Nilson y MACHUCA MARTÍNEZ, Fiderman. Remoción de sólidos totales de vinazas por electrocoagulación-electroflotación. En: Revista DYNA. 2009. vol. 76, no. 158, p. 41-47.

¹²⁹ Ibid.

¹³⁰ SOLAK Murat, *et al.* Removal of suspended solids and turbidity from marble processing wastewaters by electrocoagulation: Comparison of electrode materials and electrode connection systems. En: Journal of Hazardous Materials. Julio, 2009. vol. 172, no. 1, p. 345-352.

causadas por los altos voltajes también se logran desestabilizar los sólidos disueltos y obtener algún porcentaje de remoción.

6.1.9 Color aparente. De acuerdo a los resultados obtenidos y las experiencias realizadas, se puede afirmar que la remoción de color aparente tuvo mayor éxito en los escenarios donde se utilizó aluminio. Para la experiencia con hierro se observó que en el momento de empezar la reacción el agua tomó un color naranja y posteriormente verde causado por los óxidos de hierro generados. Como afirma Mejía, *et al.*¹³¹, la decoloración de aguas residuales es más rápida con electrodos de aluminio ya que el aluminio las vuelve incoloras directamente, mientras que el hierro la torna color azul y posteriormente verde. La Figura 28 muestra la coloración del agua debido a la utilización del hierro.

Figura 28. Muestra de agua tratada con hierro.



Fuente: Elaboración propia.

6.1.10 Color real. Como se observó en el color aparente, el color real también aumenta a medida que aumenta el voltaje aplicado, lo cual nos lleva a inferir que a mayor voltaje será mayor el porcentaje de remoción. Según los resultados obtenidos, los electrodos de aluminio ofrecieron porcentajes de remoción satisfactorios, pero los de hierro incrementaron el valor original de dicho parámetro, produciendo mayor coloración en el agua.

¹³¹ MEJIA ZAPATA, Claudia Isabel y OSORIO ECHEVERRI, Víctor Manuel. Decoloración de las aguas residuales con alto contenido de índigo por el método de electrocoagulación. En: Revista Facultad de Ingeniería de la Universidad de Antioquia. Junio, 2003. vol. 1, no. 29, p. 115-118.

6.2 DIAGNÓSTICO DEL COMPORTAMIENTO DE LOS PARÁMETROS MEDIDOS CON RESPECTO A LA VARIACIÓN DE LOS MATERIALES UTILIZADOS PARA EL PROCESO DE ELECTROCOAGULACIÓN

En la Tabla 8 se muestran los porcentajes de remoción que presentaron los parámetros medidos, se presentan los resultados para hierro y aluminio manteniendo el voltaje constante. Los recuadros resaltados en color verde indican que en ese elemento se presentó el mejor porcentaje de remoción, en el caso del pH se resaltó el que sufrió la menor variación.

Tabla 8. Porcentaje de remoción de Fe y Al a 30V.

Parámetro	Porcentaje de remoción (%)	
	Aluminio 30V	Hierro 30V
pH	-7,40	-10,47
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	39,05	33,78
Sólidos Suspendidos	4,12	11,76
Sólidos Disueltos	4,06	3,72
Sólidos Totales	3,79	10,98
Color Real	94,59	-200,00
Color Aparente	93,75	-1.050,00
Grasa y Aceites	66,28	64,24
Turbidez	63,73	-12,71
Conductividad	2,89	4,80

Fuente: Elaboración propia.

Como es posible observar en la Tabla 8, la experiencia realizada con aluminio presentó remoción en una mayor cantidad de parámetros en comparación con el hierro con el mismo valor de voltaje (30V). Lo que lleva a concluir que el aluminio es el elemento más eficiente cuando se aplican 30V.

La Tabla 9 muestran los porcentajes de remoción obtenidos con hierro y aluminio manteniendo un voltaje constante de 60V. Esta comparación se realiza con el fin de determinar a las mismas condiciones de voltaje, cuál de los dos elementos se comportó mejor y dio mejores resultados.

Tabla 9. Porcentaje de remoción para Fe y Al a 60V.

Parámetro	Porcentaje de remoción (%)	
	Aluminio 60V	Hierro 60V
pH	-10,06	-19,55
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	47,97	65,81
Sólidos Suspendidos	-11,76	6,47
Sólidos Disueltos	18,76	9,25
Sólidos Totales	9,38	13,77
Color Real	45,05	-350,45
Color Aparente	12,50	-662,50
Grasa y Aceites	63,81	45,06
Turbidez	31,10	-166,10
Conductividad	2,76	6,31

Fuente: Elaboración propia.

De igual manera que en la Tabla 9, los recuadros verdes indican que en ese elemento se presentó el mejor porcentaje de remoción para el parámetro correspondiente. Como se observa, para el aluminio se tienen seis parámetros en los que se tuvo mayor porcentaje de remoción, por otro lado, el hierro presenta cuatro parámetros con mayor porcentaje de remoción, por lo que se puede afirmar que a 60V el elemento con mejor comportamiento y que ofrece mayores beneficios es el aluminio.

Con la intención de determinar el material que mejor se comporta, a cierto valor de voltaje, en la Tabla 10 se presentan los porcentajes de remoción que obtuvo el aluminio tanto a 30V como a 60V.

Tabla 10. Porcentaje de remoción para Al a 30V y 60V.

Parámetro	Porcentaje de remoción (%)	
	Aluminio 30V	Aluminio 60V
pH	-7,40	-10,06
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	39,05	47,97
Sólidos Suspendidos	4,12	-11,76
Sólidos Disueltos	4,06	18,76
Sólidos Totales	3,79	9,38
Color Real	94,59	45,05
Color Aparente	93,75	12,50
Grasa y Aceites	66,28	63,81
Turbidez	63,73	31,10
Conductividad	2,89	2,76

Fuente: Elaboración propia.

Según los datos observados, el aluminio a 30V presenta mayor porcentaje de remoción, en una mayor cantidad de parámetros, por lo cual se deduce que el mejor escenario probado es aquel en el que se utiliza aluminio en los electrodos y un voltaje de 30V.

6.3 COMPARACIÓN DE LAS PROPIEDADES OFRECIDAS POR EL TRATAMIENTO POR ELECTROCOAGULACIÓN CON RESPECTO AL MÉTODO DE UTILIZADO CONVENCIONALMENTE

Como se planteó al inicio de esta evaluación técnica, uno de los objetivos es brindar a la empresa una alternativa de tratamiento de aguas diferente a la que se está utilizando actualmente, para que de esta forma pueda ampliar su portafolio de servicios en su línea de tratamiento y disposición de residuos para la industria petrolera.

6.3.1 Descripción del método de tratamiento actual. Cuando se habla de métodos de tratamiento de aguas residuales existen gran variedad de alternativas. Sin embargo, la mayoría de las industrias, incluyendo la de hidrocarburos, opta por la adición de químicos para tratar los residuos líquidos generados. Dicho panorama se ve reflejado en la empresa TSP Energy, en donde actualmente se llevan a cabo procesos de tratamiento por medio de coagulación química.

La coagulación química, según Younker, J., *et al.*¹³², es un proceso en donde se utilizan sales de metales inorgánicos (generalmente basadas en hierro o aluminio) para desestabilizar los contaminantes presentes en el agua. Lo anterior se logra ya que la mayoría de los contaminantes presentan una superficie con carga negativa lo que genera repulsión entre ellos. Al disolver las sales metálicas en el agua, estas forman iones cargados positivamente los cuales logran la desestabilización de los contaminantes, mejorando la interacción entre ellos y así la formación de flóculos más grandes, los cuales son más fáciles de retirar del agua mediante flotación o sedimentación.

Como se mencionó anteriormente, los coagulantes más utilizados son basados en hierro y aluminio, el coagulante utilizado actualmente en la empresa es el sulfato de

¹³² YOUNKER, J., *et al.* Atlantic Canada Offshore R&D: Treatment of Oilfield Produced Water by Chemical Coagulation and Electrocoagulation. En: Offshore Technology Conference (2-5, Mayo: Houston, Texas, USA). Offshore Technology Conference, 2011. p. 2.

aluminio ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$). Cogollo¹³³ afirma que la selección del coagulante se da dependiendo del tipo de agua que se desea tratar, además para evitar la disminución del pH muchas veces es necesario agregar un álcali como cal, soda ash o soda cáustica.

En la Tabla 11 se muestran un ejemplo de la variación de algunas propiedades fisicoquímicas en un proceso de clarificación de agua utilizando sulfato de aluminio como coagulante y cal para controlar el pH.

Tabla 11. Comportamiento de algunas variables fisicoquímicas utilizando $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ como coagulante.

Variable	Valor
Variación pH (%)	2,4
Remoción turbiedad (%)	59,5
Variación alcalinidad total (%)	13,7
Variación dureza total (%)	18,8
Variación aluminio residual (%)	8,3

Fuente: COGOLLO FLÓREZ, Juan Miguel. Clarificación de aguas usando coagulantes polimerizados: caso del hidroxiclورو de aluminio. En: Revista DYNA. Octubre, 2010. vol. 78, no. 165. p. 18-27. ISSN-234-6218-3.

A pesar de que la coagulación química es uno de los tratamientos más utilizados, presenta varias desventajas, como la gran concentración de residuos químicos en el agua tras el tratamiento y el alto consumo de aditivos, lo que se traduce en altos costos de materia prima. Basados en lo anterior, la empresa TSP Energy tiene como objetivo implementar nuevas alternativas de tratamiento, entre ellas la electrocoagulación.

6.3.2 Comparación de los métodos de tratamiento. Con el fin de evaluar nuevos métodos de tratamiento, en esta evaluación se decidió comparar el comportamiento del método actual que implementa la empresa (coagulación química) con el tratamiento por medio de electrocoagulación. Esto para determinar, técnicamente, cuál de las dos alternativas presenta mejores resultados.

En la Tabla 12 se presentan las magnitudes de los parámetros obtenidos con el método de coagulación química utilizado en la empresa TSP Energy; mientras que en la Tabla 13 se presentan los parámetros obtenidos mediante el método de electrocoagulación utilizando electrodos de aluminio y un voltaje de 30V, se escogieron estas condiciones ya que fueron las que mostraron mejores resultados en la remoción de contaminantes.

¹³³ COGOLLO FLÓREZ, Juan Miguel. Clarificación de aguas usando coagulantes polimerizados: caso del hidroxiclورو de aluminio. En: Revista DYNA. Octubre, 2010. vol. 78, no. 165. p. 18-27. ISSN-234-6218-3.

Tabla 12. Caracterización y % de reducción para tratamiento con Al a 30V.

Parámetro	Unidades	Análisis de aguas	% de reducción
pH	-	7,69	-7,40
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	mgO ₂ /L	451	39,05
Sólidos Suspendidos	mg/L	815	4,12
Sólidos Disueltos	mg/L	5.550	4,06
Sólidos Totales	mg/L	9.640	3,79
Color Real	PCU	6	94,59
Color Aparente	PCU	1	93,75
Grasa y Aceites	mg/L	2,32	66,28
Turbidez	NTU	4,28	63,73
Conductividad	mS	14,77	2.89

Fuente: Elaboración propia.

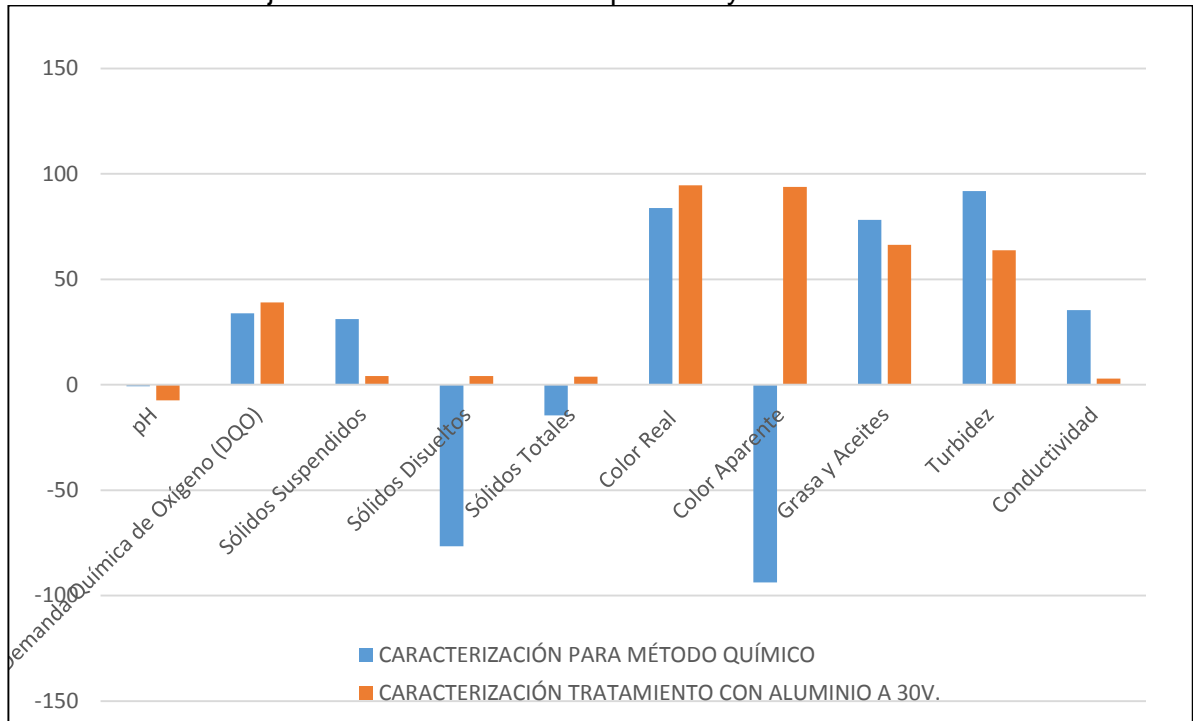
Tabla 13. Caracterización y % de reducción para el tratamiento mediante coagulación química.

Parámetro	Unidades	Análisis de aguas	% de reducción
pH	-	7,21	-0,70
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	mgO ₂ /L	489	33,92
Sólidos Suspendidos	mg/L	585	31,18
Sólidos Disueltos	mg/L	10215	-76,58
Sólidos Totales	mg/L	11480	-14,57
Color Real	PCU	18	83,78
Color Aparente	PCU	31	-93,75
Grasa y Aceites	mg/L	1,5	78,20
Turbidez	NTU	0,97	91,78
Conductividad	mS	9,82	35,44

Fuente: Elaboración propia.

Adicionalmente se presenta la Gráfica 1 donde se relacionan los porcentajes de remoción para cada parámetro en los métodos de tratamiento mencionados.

Gráfica 1. Porcentajes de Remoción método químicos y tratamiento con aluminio a 30V.



Fuente: Elaboración propia.

Como se aprecia en la Gráfica 1 ambos métodos generan una alteración en el pH, sin embargo, la alteración generada por el método químico es mucho menor que la generada por el tratamiento de electrocoagulación con aluminio a 30V.

En cuanto a reducción de DQO ambos métodos ofrecieron mejoras sin embargo como se aprecia en la Gráfica 1 y la Tabla 10, el tratamiento de electrocoagulación con aluminio a 30V ofrece un mayor porcentaje de remoción.

En cuanto a remoción de sólidos se observa en la Gráfica 1 y la Tabla 9 que el método químico hace un aporte importante a la remoción de sólidos suspendidos, pero para sólidos disueltos y totales genera un aumento muy grande que generará incremento de costos en tratamientos posteriores. Por otro lado el método de electrocoagulación con aluminio a 30V mostrado en la Tabla 10 entrega porcentajes de remoción significativos para sólidos totales, disueltos y suspendidos.

El gráfico de barras para el porcentaje de remoción de color real relacionado en la Gráfica 1, muestra que el tratamiento con aluminio generó mayor porcentaje de remoción que el generado por método químico, sin embargo ambos métodos muestran porcentajes muy satisfactorios para la remoción de color real. Para el color aparente, el porcentaje de remoción ofrecido por el método químico muestra en la Gráfica 1, un aumento en la magnitud de dicho parámetro, por lo que se puede afirmar que dicho método más que una solución es una problemática para el control

de éste parámetro, mientras que con el método de electrocoagulación con aluminio a 30V se observa un porcentaje de remoción de más del 90%.

En el parámetro de grasas y aceites mostrado en la Gráfica 1 se puede observar que ambos métodos ofrecieron porcentajes de remoción superiores al 60%, el método químico muestra mayor eficiencia en la remoción de grasas y aceites con respecto a la ofrecida por el método de electrocoagulación.

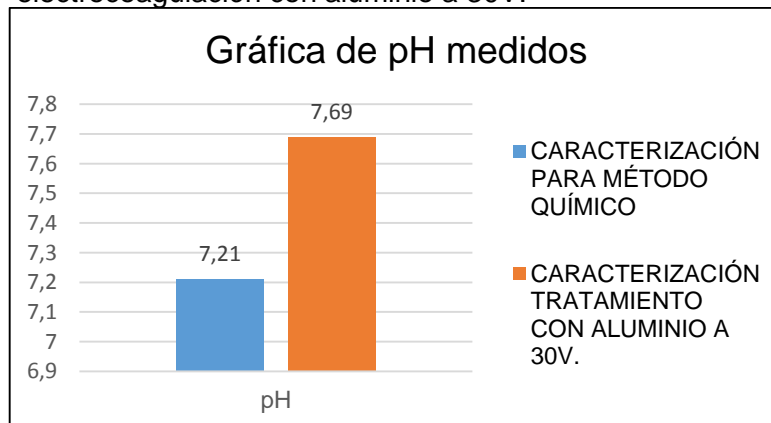
De acuerdo a la Gráfica 1 es posible afirmar que ambos métodos ofrecieron eficiencia en la reducción de la turbiedad, el método químico muestra un porcentaje de reducción de turbiedad del 91,78%, mientras que el método de electrocoagulación ofrece un 62,73% de reducción de éste parámetro.

Según lo observado en la Gráfica 1, la conductividad presenta una mayor reducción aplicando el método químico con porcentajes de 35,44%, mientras que el método de electrocoagulación registra un porcentaje de reducción del 2,89%.

A continuación se muestran las magnitudes de los diferentes parámetros obtenidas luego de aplicar el tratamiento por el método químico y el método de electrocoagulación con aluminio a 30V, respectivamente, lo anterior con el fin de obtener una mayor claridad y entendimiento de las diferencias.

En la Gráfica 2 es posible observar que el pH sufre menor alteración cuando se realiza el tratamiento mediante el método químico y con el método de electrocoagulación con aluminio a 30V tiene un aumento hasta 7,69.

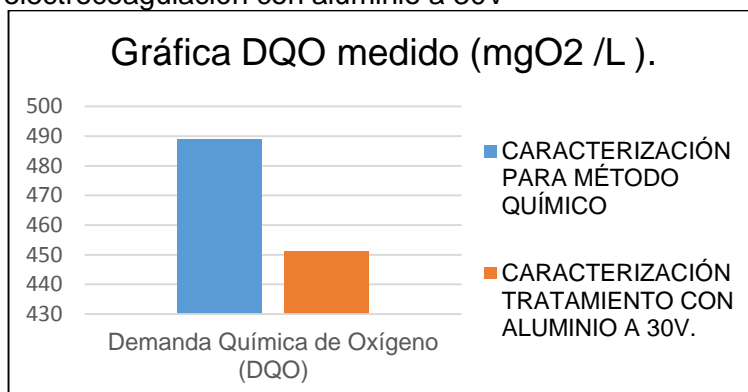
Gráfica 2. pH obtenido con método químico y electrocoagulación con aluminio a 30V.



Fuente: Elaboración propia.

Según se observa en la Gráfica 3, el método de electrocoagulación con aluminio a 30V ofrece un valor de DQO menor a la mitad del valor ofrecido por el método químico.

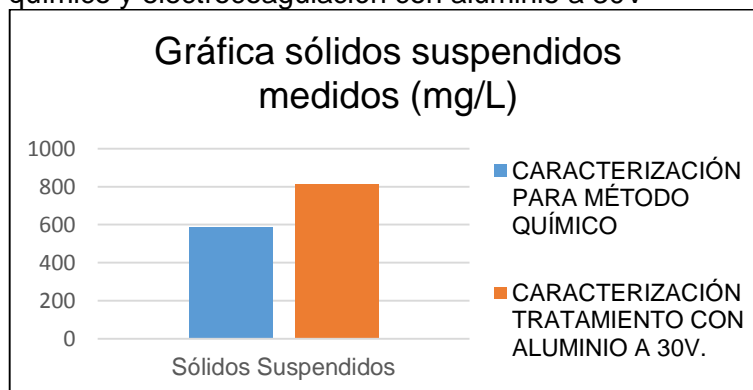
Gráfica 3. DQO obtenido con método químico y electrocoagulación con aluminio a 30V



Fuente: Elaboración propia.

Como se aprecia en la Gráfica 4, la cantidad de sólidos suspendidos obtenidos con el método de electrocoagulación con aluminio a 30V es mayor que los sólidos suspendidos en la muestra de agua tratada mediante el método químico.

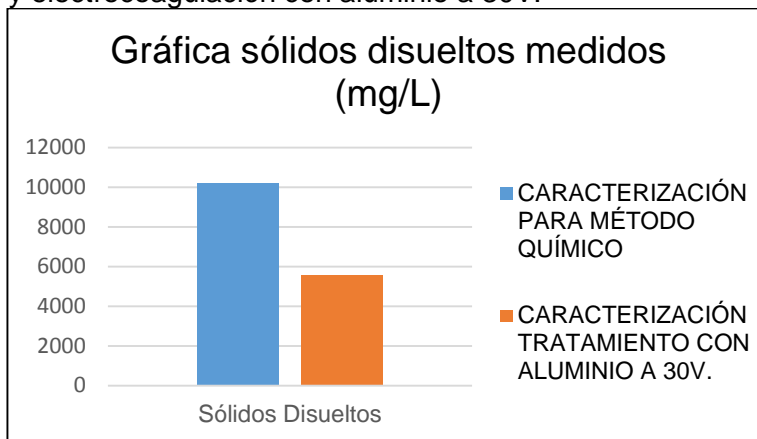
Gráfica 4. Sólidos suspendidos obtenidos con método químico y electrocoagulación con aluminio a 30V



Fuente: Elaboración propia.

El método químico entrega agua con mayor cantidad de sólidos disueltos con respecto a la cantidad de sólidos disueltos presentes en la muestra tratada por electrocoagulación con aluminio a 30V según se observa en la Gráfica 5.

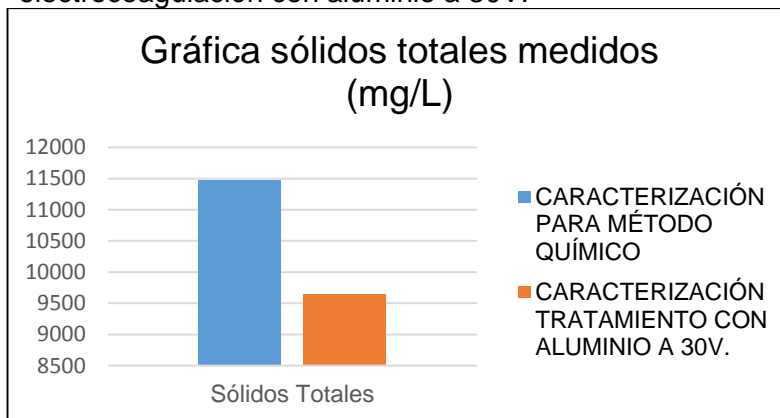
Gráfica 5. Sólidos disueltos obtenidos con método químico y electrocoagulación con aluminio a 30V.



Fuente: Elaboración propia.

En la Gráfica 6 es posible apreciar una cantidad de sólidos totales en el agua tratada mediante el método químico muy superior con respecto a la cantidad de sólidos totales encontrada en la muestra tratada mediante electrocoagulación con aluminio a 30V.

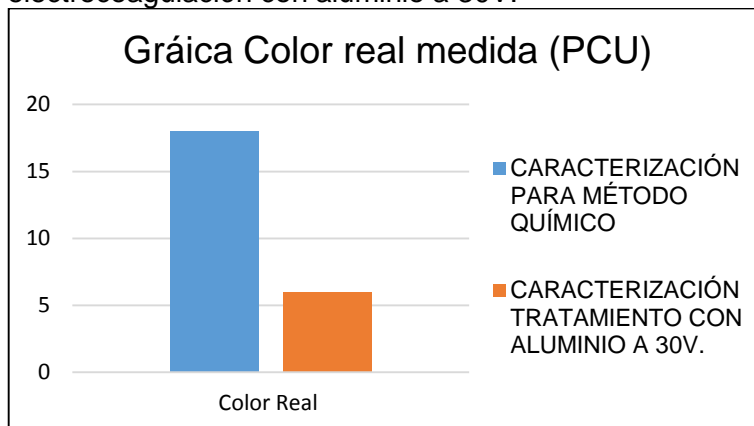
Gráfica 6. Sólidos totales obtenidos con método químico y electrocoagulación con aluminio a 30V.



Fuente: Elaboración propia.

El color real que se determinó en la muestra de agua tratada mediante el método químico es muy superior al que se midió en la muestra de agua tratada por electrocoagulación con aluminio a 30V, como se puede observar en la Gráfica 7.

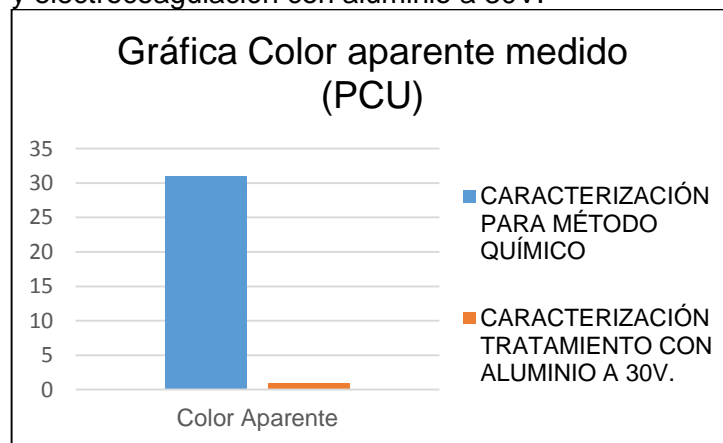
Gráfica 7. Color real obtenido con método químico y electrocoagulación con aluminio a 30V.



Fuente: Elaboración propia.

De acuerdo a lo observado en la Gráfica 8, es posible afirmar que el color aparente de la muestra tratada por el método químico es mucho más notorio que el color aparente de la muestra que se trató por electrocoagulación con aluminio a 30V.

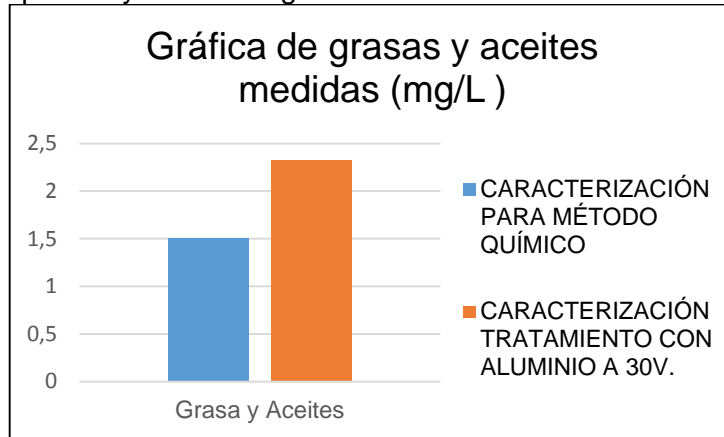
Gráfica 8. Color aparente obtenido con método químico y electrocoagulación con aluminio a 30V.



Fuente: Elaboración propia.

El comportamiento de las grasas y aceites después de realizar los respectivos tratamientos se muestra en la Gráfica 9, donde se evidencian valores de 1,5 mg/L y 2,32 mg/L para la coagulación química y la electrocoagulación, respectivamente. Como se puede evidenciar, el método actual mostro valores más bajo, sin embargo, los resultados por parte de la electrocoagulación fueron favorables.

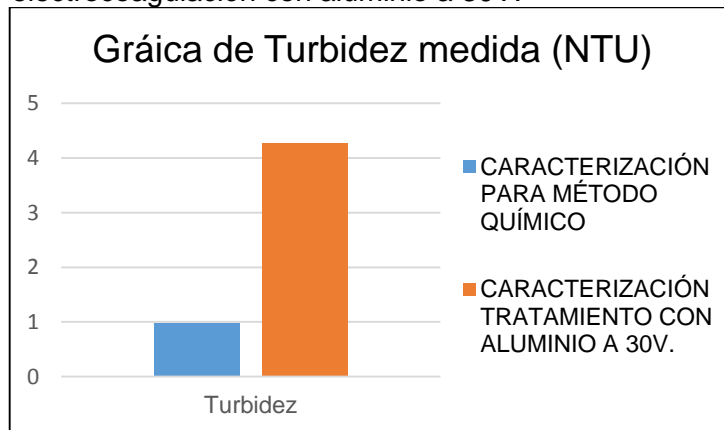
Gráfica 9. Grasas y aceites obtenidos con método químico y electrocoagulación con aluminio a 30V.



Fuente: Elaboración propia.

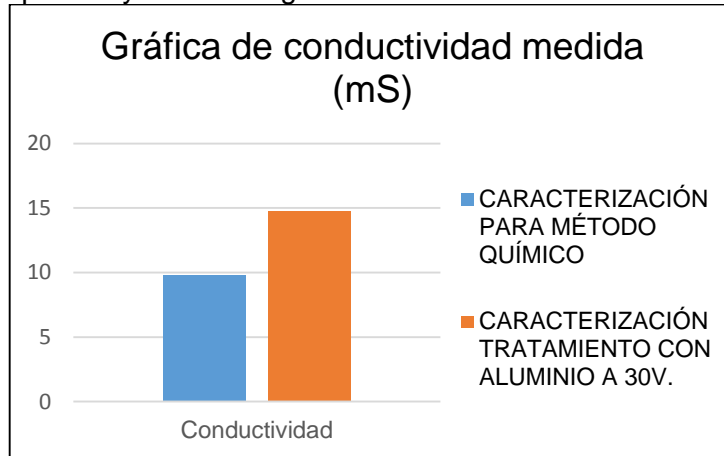
Para los parámetros de turbidez y conductividad mostrados en la Gráfica 10 y 11, respectivamente, se puede observar que el comportamiento del tratamiento por medio de coagulación química mostró mejores resultados. Lo anterior se puede explicar gracias a la gran dependencia que tiene el método de electrocoagulación con la energía eléctrica. Al aplicar la energía directamente a los electrodos, es mayor el consumo del metal y la disolución de iones en el agua, lo que aumenta la generación de espumas, incrementando la turbidez. Por otro lado, la ionización del agua hace que se aumente la conductividad en la misma, que para este caso de evaluación se evidenció en mayor proporción para el caso de la electrocoagulación.

Gráfica 10. Turbidez obtenida con método químico y electrocoagulación con aluminio a 30V.



Fuente: Elaboración propia.

Gráfica 11. Conductividad obtenida con método químico y electrocoagulación con aluminio a 30V.



Fuente: Elaboración propia.

Según lo presentado anteriormente, junto con la información representada en las gráficas, donde se observa que el tratamiento realizado con electrocoagulación mediante aluminio a 30V ofrece menores magnitudes en mayor cantidad de parámetros (DQO, Sólidos disueltos, Sólidos totales, Color real y Color aparente) aportando mejor calidad con respecto al método químico que ofrece menor magnitud en cuatro parámetros (Sólidos suspendidos, grasas y aceites, turbidez, conductividad) y además causa afectaciones negativas en tres parámetros (Sólidos suspendidos, Sólidos totales, Color aparente).

Se puede concluir que el método de electrocoagulación con electrodos de aluminio a 30V ofrece mayores ventajas y técnicamente es más productivo que el método químico utilizado por la empresa TSP Energy.

6.4 ANÁLISIS DEL CUMPLIMIENTO DE LOS PARÁMETROS EXIGIDOS POR LA NOMATIVIDAD PARA LA CALIDAD DE AGUA QUE SE TRATÓ

A continuación se presentan las Tablas 14,15, 16 y 17 de cada uno de los escenarios de prueba, junto con las magnitudes obtenidas para los parámetros evaluados y los límites establecidos por la resolución 0631 de 2015, determinando si mediante las metodologías utilizadas se cumple o no con los límites de dicha resolución.

Tabla 14. Cumplimiento resolución 0631 del tratamiento de electrocoagulación realizado con aluminio a 30V.

PARÁMETRO	ALUMINIO A 30V			
	UNIDADES	ANÁLISIS DE AGUAS	LÍMITES RES. 0632	CUMPLIMIENTO
pH	-	7,69	6,00 a 9,00	SI CUMPLE
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	mgO ₂ /L	451	180	NO CUMPLE
Sólidos Suspendidos	mg/L	815	1	NO CUMPLE
Sólidos Disueltos	mg/L	5550	N/A	-
Sólidos Totales	mg/L	9640	50	NO CUMPLE
Color Real	PCU	6	ANÁLISIS Y REPORTE	BUENA APARIENCIA
Color Aparente	PCU	1	N/A	-
Grasa y Aceites	mg/L	2,32	15	SI CUMPLE
Turbidez	NTU	4,28	N/A	-
Conductividad	mS	14,77	N/A	-

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 15. Cumplimiento resolución 0631 del tratamiento de electrocoagulación realizado con aluminio a 60V.

PARÁMETRO	ALUMINIO A 60V			
	UNIDADES	ANÁLISIS DE AGUAS	LÍMITES RES. 0632	CUMPLIMIENTO
pH	-	7,88	6,00 a 9,00	SI CUMPLE
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	mgO ₂ /L	385	180	NO CUMPLE
Sólidos Suspendidos	mg/L	950	1	NO CUMPLE
Sólidos Disueltos	mg/L	4700	N/A	-
Sólidos Totales	mg/L	9080	50	NO CUMPLE
Color Real	PCU	61	ANÁLISIS Y REPORTE	BUENA APARIENCIA
Color Aparente	PCU	14	N/A	-
Grasa y Aceites	mg/L	2,49	15	SI CUMPLE
Turbidez	NTU	8,13	N/A	-
Conductividad	mS	14,79	N/A	-

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 16. Cumplimiento resolución 0631 del tratamiento de electrocoagulación realizado con hierro a 30V.

PARÁMETRO	HIERRO A 30V			
	UNIDADES	ANÁLISIS DE AGUAS	LÍMITES RES. 0632	CUMPLIMIENTO
pH	-	7,91	6,00 a 9,00	SI CUMPLE
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	mgO ₂ /L	490	180	NO CUMPLE
Sólidos Suspendidos	mg/L	750	1	NO CUMPLE
Sólidos Disueltos	mg/L	5570	N/A	-
Sólidos Totales	mg/L	8920	50	NO CUMPLE
Color Real	PCU	333	ANÁLISIS Y REPORTE	BUENA APARIENCIA
Color Aparente	PCU	183	N/A	-
Grasa y Aceites	mg/L	2,46	15	SI CUMPLE
Turbidez	NTU	13,3	N/A	-
Conductividad	mS	14,48	N/A	-

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 17. Cumplimiento resolución 0631 del tratamiento de electrocoagulación realizado con hierro a 60V.

PARÁMETRO	HIERRO A 60V			
	UNIDADES	ANÁLISIS DE AGUAS	LÍMITES RES. 0632	CUMPLIMIENTO
pH	-	8,56	6,00 a 9,00	SI CUMPLE
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	mgO ₂ /L	253	180	NO CUMPLE
Sólidos Suspendidos	mg/L	795	1	NO CUMPLE
Sólidos Disueltos	mg/L	5250	N/A	-
Sólidos Totales	mg/L	8640	50	NO CUMPLE
Color Real	PCU	500	ANÁLISIS Y REPORTE	BUENA APARIENCIA
Color Aparente	PCU	122	N/A	-
Grasa y Aceites	mg/L	3,78	15	SI CUMPLE
Turbidez	NTU	31,4	N/A	-
Conductividad	mS	14,25	N/A	-

Fuente: Elaboración propia.

De acuerdo a la información encontrada en las Tablas 14, 15, 16 y 17 es posible afirmar que para los cuatro escenarios de tratamiento evaluados en esta investigación, predomina el no cumplimiento de los límites establecidos en la resolución 0631 de 2015. Sin embargo, es importante mencionar que el comportamiento es similar para los cuatro escenarios; de las diez propiedades que fueron escogidas para la evaluación, seis se encuentran en la resolución y dos de estas lograron cumplir los límites establecidos en la misma.

Vale la pena recalcar que para la industria de los hidrocarburos es importa lograr la reducción del porcentaje de aceites y grasas, por tal razón es bastante favorable que uno de los resultados positivos de las pruebas haya sido este parámetro, mostrando reducción de hasta un 66,28% en el escenario de aluminio a 30V.

Por último, a pesar de que la mayoría de los parámetros no cumplieron con los límites requeridos, estos sufrieron variaciones importantes durante el tratamiento por medio de electrocoagulación, dichas variaciones en la mayoría de los casos fueron reducciones en los contaminantes, lo cual es beneficioso para mejorar la calidad del agua. Cabe resaltar que el tratamiento de aguas residuales es un proceso que se lleva a cabo en varias etapas, la electrocoagulación hace parte de la etapa primaria en donde el objetivo es retirar los contaminantes más gruesos. Basado en lo anterior, se puede afirmar que el no cumplimiento de algunos de los límites establecidos en la resolución 0631 de 2015 no es del todo negativo, ya que probablemente al evaluar los mismos parámetros en el agua tras pasar por todas las etapas de tratamiento, estos estarán dentro de los límites reglamentados, y parte de este resultado habrá sido gracias a la implementación de algún método de tratamiento primario, en este caso la electrocoagulación.

7. EVALUACIÓN FINANCIERA

TSP Energy S.A.S es una empresa proveedora de servicios petroleros que tiene presencia en México y Latinoamérica, se enfoca principalmente en las operaciones de perforación bajo balance, equipos de medición y limpieza, áreas en donde tiene gran experiencia y capacidad para el desarrollo y soporte de este tipo de proyectos.

Como es de conocimiento general, la industrial del petróleo se caracteriza por su dependencia del precio del barril en el mercado, el cual tiene tendencias variables, lo que muchas veces no permite la realización de proyectos nuevos, o en su defecto el detenimiento de proyectos en desarrollo. Lo anterior ha llevado a la industria a migrar en búsqueda de nuevas fuentes de ingresos. TSP Energy es consciente que la preservación del medio ambiente y las tecnologías relacionadas con este tema han tomado mayor peso en el mercado en los últimos años, por tal razón ha desarrollado una línea de tratamiento y disposición de residuos para la industria petrolera, donde se incluye la línea de tratamiento de aguas asociadas a procesos petroleros.

En consecuencia, de ello ha decidido innovar en el tratamiento de aguas, implementando diferentes tecnologías entre ellas la electrocoagulación, la cual consiste en la neutralización de los contaminantes presentes en el agua mediante la inducción de un ánodo sacrificio, lo que facilita la floculación de dichas partículas y así su futura remoción. Sin embargo, es importante tener en cuenta que el principal factor a la hora de tomar una decisión para la ejecución de un proyecto es el factor financiero, si las cifras no muestran resultados prometedores la determinación más sensata sería la de no llevar a cabo el proyecto. En este capítulo se realizará la evaluación financiera del tratamiento de agua por medio de electrocoagulación, en donde se analizan los costos de implementación de esta tecnología, comparados con los del método utilizado convencionalmente en la empresa (adición de químicos coagulantes). Por un lado, se analiza la electrocoagulación utilizando aluminio como material en los electrodos con un voltaje de 30V, ya que, basados en las pruebas de laboratorio, estas condiciones muestran los mejores resultados y, por otro lado, el tratamiento del agua mediante sulfato de aluminio servirá como comparación.

Para ambos casos se expondrán y analizarán los costos de inversión y de operación para el tratamiento de un volumen determinado de agua y se tomará como periodo de evaluación del proyecto tres (3) años. Se utilizará el peso colombiano (COP) como unidad monetaria, una tasa de interés de oportunidad prevista por la empresa de 11% efectivo anual y el indicador financiero Costo Anual Uniforme Equivalente (CAUE).

7.1 ANÁLISIS DE COSTOS DE INVERSIÓN

Los costos de inversión de un proyecto son denominados en el ámbito financiero como CAPEX; este término es una abreviatura del término en inglés *Capital Expenditure*, que se define como los fondos gastados o las inversiones realizadas por parte de una compañía, tanto en la adquisición como en la mejora de los bienes o activos físicos, con el fin de que estos generen beneficios a la compañía¹³⁴.

Lo que concierne a esta evaluación financiera se realizó la comparación de dos métodos para el tratamiento de aguas petroleras; por tal razón es importante exponer los costos de inversión en los que incurrió la empresa para la realización de cada método de tratamiento.

7.1.1 Costos de inversión para el tratamiento actual. El método actual de tratamiento por parte de la empresa es la adición de químicos al agua de producción. Para esta comparación se tomó como base la adición del coagulante sulfato de aluminio para tratar un litro de agua. Los costos de inversión en los que incurrió la empresa para poder realizar el tratamiento químico se muestran en la Tabla 18.

Tabla 18. Costos de inversión para el tratamiento con sulfato de aluminio.

Concepto	Costo (COP)
Mezclador eléctrico	6.589.990
Recipiente de acrílico capacidad 1L	80.000
Total	6.669.990

Fuente: Elaboración propia.

7.1.2 Costos de inversión para el tratamiento por electrocoagulación. El método de tratamiento por electrocoagulación escogido para la comparación de esta evaluación financiera fue el realizado con electrodos de aluminio. Sin embargo, los costos de inversión no varían con el cambio de material, esto ya que el montaje para realizar el tratamiento es el mismo sin importar el tipo de electrodo. En la Tabla 19 se enlistan los costos de inversión incurridos por la empresa para realizar el tratamiento por electrocoagulación.

¹³⁴ AMENDOLA, Luis. Impacto de los CAPEX y OPEX en la gestión de los activos. [en línea]. 2016- [citado el 1 de junio de 2018]. Disponible en: <https://es.linkedin.com/pulse/impacto-de-los-capex-y-opex-en-la-gesti%C3%B3n-activos-amendola>

Tabla 19. Costos de inversión para el tratamiento por electrocoagulación.

Concepto	Costo (COP)
Celda Electrocoagulación	218.108
Rectificador de corriente	5.355.000
Bomba de agua	33.000
Total	5.606.108

Fuente: Elaboración propia.

7.2 ANÁLISIS DE COSTOS DE OPERACIÓN

Los costos de operación de un proyecto denominados OPEX, en inglés *Operational Expenditure*, se definen como los costos asociados al funcionamiento de un producto, negocio o sistema y mantenimiento de los equipos, incluyendo tanto gastos de consumibles y otros gastos necesarios para llevar a cabo la actividad, así como otras partidas a las que la empresa debe hacer referencia al margen de su producción, como puede ser nóminas o los impuestos¹³⁵.

Para la evaluación financiera de los dos métodos de tratamiento y su posterior comparación se tomaron como base los siguientes costos: costos por consumo de energía eléctrica, costos de la materia prima, costos por mantenimiento de equipos, costos del talento humano. La información requerida para calcular los costos operacionales se resume en la Tabla 20.

Tabla 20. Información para el cálculo de los costos operacionales.

Parámetro	Costo (COP)
Electricidad (COP/kWh)*	532,258
Electrodo de Aluminio (COP/kg)	106,905
Sulfato de Aluminio tipo A líquido (COP/kg)	1.300
Talento humano (COP/mes)	800.000

Fuente: Elaboración propia.

Teniendo en cuenta la información presentada en la Tabla 20, se pudo determinar los costos de operación para cada tratamiento. En la Tabla 21, se muestran las condiciones de los parámetros asociados a cada método para así poder determinar los respectivos costos.

¹³⁵ AMENDOLA, Luis. Impacto de los CAPEX y OPEX en la gestión de los activos. [en línea]. 2016- [citado el 1 de junio de 2018]. Disponible en: <https://es.linkedin.com/pulse/impacto-de-los-capex-y-opex-en-la-gesti%C3%B3n-activos-amendola>

* Tarifa establecida por la empresa de energía CODENSA S.A. ESP para el sector industrial y comercial.

Tabla 21. Condiciones durante los tratamientos.

Parámetro	Tratamiento	Valor durante el tratamiento
Potencia eléctrica del mezclador (W)	Químico	810
Potencia eléctrica de la bomba de agua (W)	Electrocoagulación	5
Voltaje (V)	Electrocoagulación	30
Intensidad de corriente (A)	Electrocoagulación	6
Tiempo de tratamiento (h)	Químico	0,333
	Electrocoagulación	0,017
Volumen de agua tratada (L)	Químico	1
	Electrocoagulación	1

Fuente: Elaboración propia.

7.2.1 Costos de operación para el tratamiento actual. La determinación de los costos de operación del tratamiento por medio de la adición de sulfato de aluminio se realizó teniendo en cuenta las condiciones durante el tratamiento presentadas en la Tabla 20.

- **Costos por consumo de energía eléctrica.** El consumo de energía eléctrica para este procedimiento fue a causa de la utilización del mezclador eléctrico. Tal consumo se determinó mediante la Ecuación 4.

Ecuación 4. Consumo de energía durante el tratamiento.

$$C_{Energía(x)} = \frac{W * t}{Vol * 1.000}$$

Fuente: BAYRAMOGLU, Mahmut, *et al.* Operating cost analysis of electrocoagulation of textile dye wastewater. En: Separation and Purification Technology. 2004. no. 37, p. 117-125. Modificado por autores.

Donde,

$C_{Energía(x)}$: Consumo de energía del equipo “x” durante el tratamiento, kWh/L.

W: Potencia eléctrica del equipo “x”, W.

t: Tiempo de duración del tratamiento, h.

Vol: Volumen de agua a tratar, L.

Finalmente, el costo del consumo por energía eléctrica se determinó con la Ecuación 5, teniendo en cuenta la tarifa de energía eléctrica impuesta para el sector en donde se realizó el tratamiento.

Ecuación 5. Costos por consumo de energía eléctrica.

$$C_{EE(x)} = a * C_{Energía(x)}$$

Fuente: BAYRAMOGLU, Mahmut, *et al.* Operating cost analysis of electrocoagulation of textile dye wastewater. *En:* Separation and Purification Technology. 2004. no. 37, p. 117-125. Modificado por autores.

Donde,

$C_{EE(x)}$: Costo del consumo de energía eléctrica por el equipo “x”, COP/L.

a : Tarifa de consumo de energía, 532,258COP/kWh.

$C_{Energía(x)}$: Consumo de energía del equipo “x” durante el tratamiento, kWh/L.

A partir de la información brindada por la Tabla 6 y 7, se determinaron los costos por consumo de energía eléctrica debido a la utilización del mezclador para el tratamiento químico. Los cálculos se muestran en la Ecuación 6 y Ecuación 7.

Ecuación 6. Cálculo del consumo eléctrico del mezclador.

$$C_{Energía(M)} = \frac{810W * 0,333h}{1L * 1.000}$$

$$C_{Energía(M)} = 0,270 \frac{kWh}{L}$$

Ecuación 7. Cálculo de los costos de por consumo de energía eléctrica del mezclador.

$$C_{EE(M)} = 532,258 \frac{COP}{kWh} * 0,270 \frac{kWh}{L}$$

$$C_{EE(M)} = 143,710 \frac{COP}{L}$$

- **Costos por consumo de la materia prima.** Se traduce en el costo de la cantidad de sulfato de aluminio utilizado para realizar el tratamiento a un 1 litro de agua. La cantidad de coagulante que se utilizó para el tratamiento fue de 15mL que a una concentración del 8% se traduce en 0,020kg de sulfato de aluminio, con base a esa información y con el precio del químico brindado en la Tabla 6, se puede calcular el costo de la materia prima mediante la Ecuación 8.

Ecuación 8. Costo de la materia prima para el tratamiento.

$$C_{MP(x)} = b_{(x)} * C_{(x)}$$

Fuente: BAYRAMOGLU, Mahmut, *et al.* Operating cost analysis of electrocoagulation of textile dye wastewater. En: Separation and Purification Technology. 2004. no. 37, p. 117-125. Modificado por autores.

Donde,

$C_{MP(x)}$: Costo por consumo del material "x", COP/L.

b : Costo del material "x", COP/kg.

$C_{(x)}$: Consumo del material "x" durante el tratamiento, kg/L.

Por último, la determinación del costo por el consumo de la materia prima para el tratamiento con sulfato de aluminio se realizó como muestra la Ecuación 6.

Ecuación 9. Determinación de los costos de la materia prima para el tratamiento químico.

$$C_{MP(AlSO_4)} = 1.300 \frac{COP}{kg} * \frac{0,020kg}{1L}$$
$$C_{MP(AlSO_4)} = 26 \frac{COP}{L}$$

- **Costos por mantenimiento de equipos.** Para el tratamiento químico, el mezclador es el equipo principal y al cual se le debe realizar mantenimiento preventivo para garantizar su funcionamiento en óptimas condiciones. Dicho mantenimiento se debe realizar cada tres meses y tiene un valor de 190.400 COP.
- **Costos por talento humano.** Durante la realización del tratamiento se requiere un operario que supervise el proceso y que maneje equipos presentes en el mismo. El salario provisto por la empresa para el operario es de 800.000 COP mensuales. Vale la pena resaltar que el salario del operario no depende del volumen de agua a tratar ya que es un valor fijo mensual.

Tras realizar todo el análisis, se determinó que los costos operacionales para realizar el tratamiento mediante la adición de sulfato de aluminio, son los mostrados en la Tabla 22.

Tabla 22. Costos operacionales del tratamiento actual.

Costo	Periodicidad	Valor
Costos por consumo de energía eléctrica (COP/L)	Depende del volumen a tratar	143,710
Costos por consumo de la materia prima (COP/L)	Depende del volumen a tratar	26
Costos por mantenimiento de equipos (COP/trimestre)	Trimestral	190.400
Costos por talento humano (COP/mes)	Mensual	800.000

Fuente: Elaboración propia.

7.2.2 Costos de operación para el tratamiento por electrocoagulación. Para determinar los costos de operación del tratamiento por medio de electrocoagulación hay que tener en cuenta el material de los electrodos (aluminio) y las condiciones durante el tratamiento, las cuales se enlistan en la Tabla 20.

- **Costos por consumo de energía eléctrica.** El consumo de energía eléctrica para la realización de este tratamiento fue principalmente por la utilización del rectificador de corriente y la bomba de agua. Para determinar el consumo de energía con respecto al volumen de agua tratada, se empleó la Ecuación 1. Sin embargo, para el caso del rectificador se tuvo en cuenta el voltaje y la intensidad de corriente para calcular la potencia eléctrica, como se muestra en la Ecuación 10.

Ecuación 10. Potencia eléctrica del rectificador de corriente durante el tratamiento.

$$W = V * I$$

Fuente: SERWAY, Raymond A. y JEWETT, John W., Jr. Física para ciencias e ingeniería con Física moderna. Traducido por Víctor Campos Olguín. 7 ed. México, D.F.: Cengage Learning, 2009. no. 2. 639 p. ISBN-13-978-607-481-358-6.

Donde,

W: Potencia eléctrica, W.

V: Voltaje durante el tratamiento, V.

I: Intensidad de corriente durante el tratamiento, A.

Teniendo en cuenta la ecuación mencionada, se determinó la potencia del rectificador durante el tratamiento por electrocoagulación, la Ecuación 11 representa este cálculo.

Ecuación 11. Cálculo de la potencia eléctrica del rectificador de corriente.

$$W = 30V * 6A$$

$$W = 180W$$

Finalmente, con el dato de la potencia eléctrica de ambos equipos (el rectificador de corriente y la bomba de agua) se determinaron sus respectivos consumos como muestran las Ecuaciones 12 y 13.

Ecuación 12. Cálculo del consumo eléctrico del rectificador de corriente.

$$C_{Energía (R)} = \frac{180W * 0,017h}{1L * 1.000}$$

$$C_{Energía (R)} = 0,003 \frac{kWh}{L}$$

Ecuación 13. Cálculo del consumo eléctrico de la bomba de agua.

$$C_{Energía (B)} = \frac{5W * 0,017h}{1L * 1.000}$$

$$C_{Energía (B)} = 0,850 * 10^{-4} \frac{kWh}{L}$$

Teniendo en cuenta los valores presentados en la Tabla 18, el cálculo de los costos por consumo de energía por parte del rectificador de corriente y de la bomba de agua se realizó mediante la Ecuación 15. La demostración de los valores mencionados se presenta en la Ecuación 14 y 15.

Ecuación 14. Cálculo de los costos de por consumo de energía eléctrica del rectificador de corriente.

$$C_{EE(R)} = 532,258 \frac{COP}{kWh} * 0,003 \frac{kWh}{L}$$

$$C_{EE(R)} = 1,597 \frac{COP}{L}$$

Ecuación 15. Cálculo de los costos de por consumo de energía eléctrica de la bomba de agua.

$$C_{EE(B)} = 532,258 \frac{COP}{kWh} * 0,850 * 10^{-4} \frac{kWh}{L}$$

$$C_{EE(B)} = 0,045 \frac{COP}{L}$$

Por último, el costo total por consumo de energía eléctrica para el tratamiento por electrocoagulación es la suma del costo del rectificador y de la bomba. Este cálculo se muestra en la Ecuación 16.

Ecuación 16. Cálculo del costo total por consumo de energía eléctrica para el tratamiento por electrocoagulación.

$$C_{EE(T)} = 0,045 \frac{COP}{L} + 1,597 \frac{COP}{L}$$

$$C_{EE(T)} = 1,642 \frac{COP}{L}$$

- **Costos por el consumo de la materia prima.** Se traduce en el costo de la cantidad de electrodo que se consumió para tratar un litro de agua. Para determinar el consumo de aluminio, se pesó un electrodo antes y después del tratamiento. Hay que tener en cuenta que el consumo de electrodo se presentó en las 11 láminas que se utilizaron para el tratamiento. La Tabla 23 muestra el consumo total de electrones durante el proceso.

Tabla 23. Consumo del electrodo de aluminio durante el tratamiento.

Peso antes del tratamiento (kg)	Peso después del tratamiento (kg)	Consumo de electrodo (kg/L)	Consumo de los 11 electrodos (kg/L)
0,078	0,076	0,002	0,022

Fuente: Elaboración propia.

Para la determinación del costo por consumo de la materia prima en el tratamiento por electrocoagulación se implementó la Ecuación 17, en donde el costo del electrodo de aluminio incluido en la Tabla 3. El cálculo se puede apreciar en la Ecuación 17.

Ecuación 17. Cálculo del costo por consumo de materia la materia prima para el tratamiento por electrocoagulación.

$$C_{MP(Al)} = 106,905 \frac{COP}{kg} * \frac{0,022kg}{1L}$$

$$C_{MP(Al)} = 2,352 \frac{COP}{L}$$

- **Costos por mantenimiento de equipos.** Para el tratamiento por electrocoagulación, el equipo principal al que se le debe realizar mantenimiento preventivo periódico es el rectificador de corriente. Dicho mantenimiento se debe realizar cada 6 meses y tiene un costo de 350.000 COP.
- **Costos por talento humano.** Al igual que en el tratamiento convencional, durante la realización del tratamiento por electrocoagulación se requiere un operario que supervise el proceso y que maneje equipos presentes en el mismo. El salario provisto por la empresa para el operario es el mismo, 800.000 COP mensuales. Vale la pena resaltar que el salario del operario no depende del volumen de agua a tratar ya que es un valor fijo mensual.

Tras realizar todo el análisis, se determinó que los costos operacionales para realizar el tratamiento mediante electrocoagulación, son los mostrados en la Tabla 24.

Tabla 24. Costos operacionales del tratamiento por electrocoagulación.

Costo	Periodicidad	Valor
Costos por consumo de energía eléctrica (COP/L)	Depende del volumen a tratar	1,642
Costos por consumo de la materia prima (COP/L)	Depende del volumen a tratar	2,352
Costos por mantenimiento de equipos (COP/semestral)	Semestral	350.000
Costos del talento humano (COP/mes)	Mensual	800.000

Fuente: Elaboración propia.

7.3 EVALUACIÓN FINANCIERA

La evaluación financiera compara la viabilidad financiera del método químico frente al tratamiento por electrocoagulación. Al final se concluye cuál de los dos métodos presenta menores costos para empresa. La comparación de los métodos se realiza mediante la herramienta financiera del Costo Anual Uniforme Equivalente (CAUE). Para la realización de la evaluación se planteó un escenario en el que la empresa requería tratar un barril, es decir, 159 litros de agua mensual; el horizonte de evaluación de las dos alternativas fue de tres años, en donde el incremento de los costos de la materia prima y del mantenimiento, para los años dos y tres, se tomó como 3,2%¹³⁶. Por otro lado, el incremento de la energía para los mismos periodos, se tomó como 7%, basado en el incremento presentado entre mayo del 2017 y mayo del 2018¹³⁷. Finalmente, para los costos de talento humano, se definió un incremento promedio de 6,50%, basado en el incremento del salario mínimo para el 2017 (7%) y el incremento para el 2018 (5,90%)¹³⁸.

7.3.1 Definición del indicador financiero. Debido a que la evaluación financiera parte de la comparación de dos procesos que realiza la empresa, se desea saber cuál de los dos representa menores costos para la misma. Partiendo de esa información se determinó que el indicador financiero que más se ajusta al proyecto es el Costo Anual Uniforme Equivalente (CAUE), el cual brinda un punto base para la toma de decisión del método que más se ajusta a las necesidades financieras de la empresa.

El Costo Anual Uniforme Equivalente depende principalmente de dos variables: el valor presente mostrado en la Ecuación 18, que se basa en el concepto del valor equivalente de todos los flujos de efectivo al presente o a algún punto que se toma

¹³⁶ BANCO DE LA REPUBLICA DE COLOMBIA. Informe sobre inflación. Informe del departamento de programación e inflación de la subgerencia de política monetaria e información económica del Banco de la Republica de Colombia. Bogotá: Banco de la Republica; 2018. ISSN-1667-7973.

¹³⁷ CODENSA. Tarifas de energía Codensa. [en línea]. 2018- [citado el 6 de junio de 2018]. Disponible en: <https://www.codensa.com.co/hogar/tarifas>

¹³⁸ BANCO DE LA REPUBLICA DE COLOMBIA. Salario mínimo legal en Colombia. [en línea]. 2018- [citado el 5 de junio de 2018]. Disponible en: http://obieebr.banrep.gov.co/analytics/saw.dll?Go&Action=prompt&lang=es&NQUser=publico&NQPassword=publico&path=%2Fshared%2fSeries%20Estad%C3%ADsticas_T%2F1.%20Salarios%2F1.1%20Salario%20m%C3%ADnimo%20legal%20en%20Colombia%2F1.1.1.SLR_Serie%20hist%C3%B3rica&Options=rdf

como base de inicio del tiempo¹³⁹; y, la tasa de interés de oportunidad (TIO) que es la tasa de interés más alta que un inversionista sacrifica con el objeto de realizar un proyecto¹⁴⁰, para este caso la TIO provista por la empresa equivale al 10% efectivo anual.

Ecuación 18. Valor Presente.

$$VP_{(i)} = \sum_{t=1}^n \frac{V_t}{(1+i)^t} - I_0$$

Fuente: LÓPEZ DUMRAUF, Guillermo. Cálculo financiero aplicado (Un enfoque profesional). 2 ed. Buenos Aires: La Ley. 2006. 657 p.

Donde,

VP_(i): Valor presente en función de la tasa de interés de oportunidad.

V_t: Flujos de caja en cada periodo t.

i: Tasa de interés de oportunidad.

I₀: Costo de la inversión inicial.

n: Número de periodos considerados para la evaluación del proyecto.

El CAUE es una anualidad que se determina mediante la conversión de todos los egresos de un proyecto en una serie uniforme equivalente de pagos; de esta manera se hace posible comparar los costos durante varios periodos de una alternativa con los costos generados durante los mismos periodos de otra alternativa¹⁴¹. El cálculo del CAUE se muestra mediante la Ecuación 19.

Ecuación 19. Costo Anual Uniforme Equivalente.

$$A = CAUE = VP * \frac{(1+i)^n * i}{(1+i)^n - 1}$$

Fuente: LÓPEZ DUMRAUF, Guillermo. Cálculo financiero aplicado (Un enfoque profesional). 2 ed. Buenos Aires: La Ley. 2006. 657 p.

Donde,

A: Anualidad.

CAUE: Costo Anual Uniforme Equivalente.

¹³⁹ SULLIVAN, William G.; WICKS, Elin M. y LUXHOJ, James T. Traducido por Javier Enríquez Brito. Ingeniería económica de DeGarmo. 12 ed. México: Pearson Education, Inc., 2004. p. 154.

¹⁴⁰ BACA CURREA, Guillermo. Ingeniería económica. 8 ed. Bogotá D.C.: Fondo Educativo Panamericano, 2002. p. 197.

¹⁴¹ Ibid., p. 223.

VP: Valor presente de los flujos de caja al final de cada periodo.

i: Tasa de interés de oportunidad.

n: Número de periodos considerados para la evaluación del proyecto.

7.3.2 Flujo de caja. El flujo de caja es una herramienta gráfica que sirve para facilitar la comprensión de problemas financieros. La representación se realiza mediante una línea horizontal en donde se escriben las fechas y periodos de tiempo de evaluación; de esta línea horizontal salen hacia arriba los ingresos que tenga la empresa en cada periodo, mientras que los egresos se representan mediante líneas hacia abajo¹⁴². Para este caso de evaluación vale la pena tener en cuenta que solo se representarán egresos, es decir, líneas hacia abajo ya que se evalúan los costos operativos de los dos tratamientos que se están comparando. Antes de representar el flujo de caja para cada periodo de evaluación, es importante tener claridad del origen de los valores en a cada periodo. La Tabla 25 y la Tabla 26 muestran los valores anuales de los costos operacionales para el tratamiento químico y el tratamiento por electrocoagulación, respectivamente.

¹⁴² Ibid., p. 4.

Tabla 25. Costos anuales, expresados en COP, para el tratamiento de 159L de agua mediante la adición de sulfato de aluminio.

Costo	Periodicidad al año	Valor por periodo	Años de evaluación					
			1		2		3	
			Incremento (%)	Costo Anual	Incremento (%)	Costo Anual	Incremento (%)	Costo Anual
Por consumo de energía eléctrica	12	22.850	0	274.199	7	293.393	7	313.930
Por consumo de la materia prima	12	4.134	0	49.608	3,2	51.195	3,2	52.834
Por mantenimiento de equipos	4	190.400	0	761.600	3,2	785.971	3,2	811.122
Por talento humano	12	800.000	0	9.600.000	6,5	10.224.000	6,5	10.888.560
Total				10.685.407		11.354.559		12.066.446

Fuente: Elaboración propia.

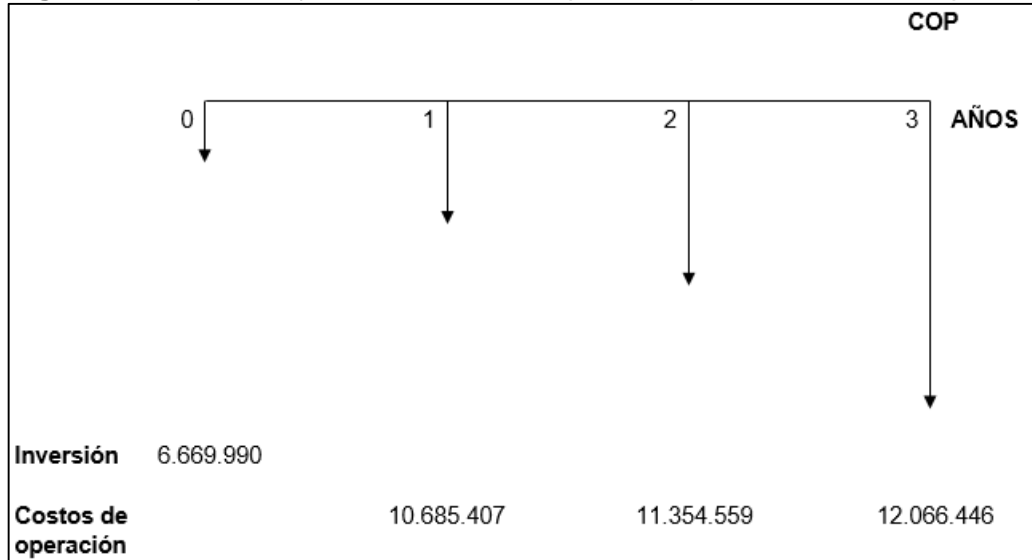
Tabla 26. Costos anuales, expresados en COP, para el tratamiento de 159L de agua mediante electrocoagulación.

Costo	Periodicidad al año	Valor por periodo	Años de evaluación					
			1		2		3	
			Incremento (%)	Costo Anual	Incremento (%)	Costo Anual	Incremento (%)	Costo Anual
Por consumo de energía eléctrica	12	261	0	3.133	7	3.352	7	3.587
Por consumo de la materia prima	12	374	0	4.488	3,2	4.631	3,2	4.779
Por mantenimiento de equipos	2	350.000	0	700.000	3,2	722.400	3,2	745.517
Por talento humano	12	800.000	0	9.600.000	6,5	10.224.000	6,5	10.888.560
Total				10.307.621		10.954.383		11.642.443

Fuente: Elaboración propia.

A partir del análisis de costos operacionales, se pueden desarrollar los diagramas de flujo de caja para cada tratamiento. En la Figura 29 se observa el flujo de egresos del tratamiento químico

Figura 29. Flujo de caja de los costos de operación para el tratamiento químico.



Fuente: Elaboración propia.

Partiendo del flujo de caja observado en la Figura 29 y mediante la Ecuación 20 se determina el valor presente de los egresos para el tratamiento implementado actualmente por la empresa, como se muestra en la Ecuación 20.

Ecuación 20. Cálculo del Valor Presente para el tratamiento químico.

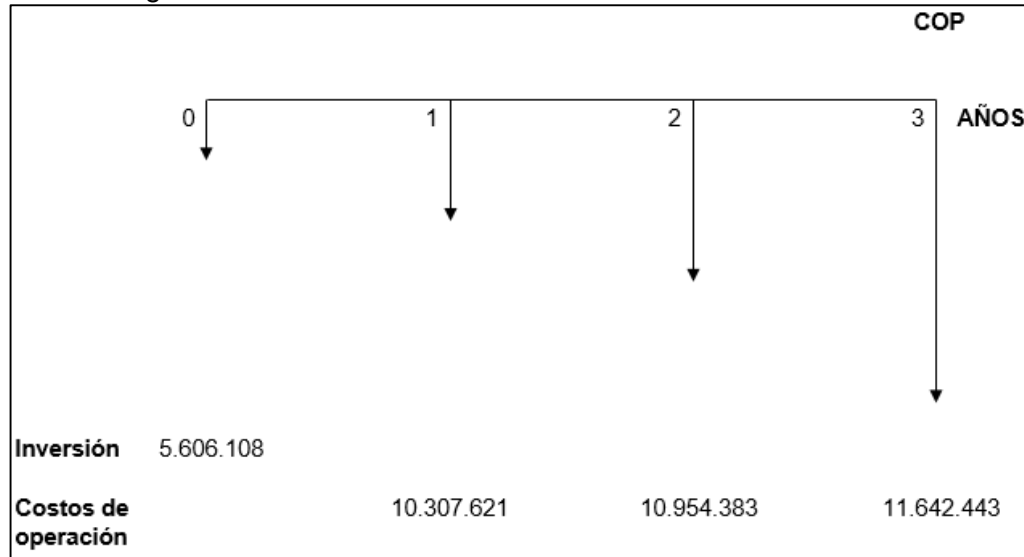
$$VP = -\frac{6.669.990}{(1 + 0,10)^0} - \frac{10.685.407}{(1 + 0,10)^1} - \frac{11.354.559}{(1 + 0,10)^2} - \frac{12.066.446}{(1 + 0,10)^3}$$

$$VP = -6.669.990 - 9.714.006 - 9.383.933 - 9.065.699$$

$$VP = -34.833.629$$

Por otro lado, la Figura 30 muestra el flujo de egresos del tratamiento por electrocoagulación.

Figura 30. Flujo de caja de los costos de operación para el tratamiento por electrocoagulación.



Fuente: Elaboración propia.

Del mismo modo como se calculó el valor presente para el método químico, en la Ecuación 21 se observa el cálculo del valor presente de los costos correspondientes al tratamiento por electrocoagulación.

Ecuación 21. Cálculo de Valor Presente para el tratamiento por electrocoagulación.

$$VP = -\frac{5.606.108}{(1 + 0,10)^0} - \frac{10.307.621}{(1 + 0,10)^1} - \frac{10.954.383}{(1 + 0,10)^2} - \frac{11.642.443}{(1 + 0,10)^3}$$

$$VP = -5.606.108 - 9.370.565 - 9.053.209 - 8.747.140$$

$$VP = -32.777.021$$

7.3.3 Cálculo del Costo Anual Uniforme Equivalente (CAUE). A partir de los flujos de caja mostrados anteriormente y teniendo en cuenta la TIO impuesta por la empresa, se puede calcular el CAUE. Para realizar la determinación del CAUE de cada tratamiento se utiliza la Ecuación 22 junto con los valores de valor presente ya determinados. La determinación del CAUE para el método actual mediante la adición de sulfato de aluminio se muestra en la Ecuación 23.

Ecuación 22. Cálculo del Costo Anual Uniforme Equivalente para el tratamiento actual.

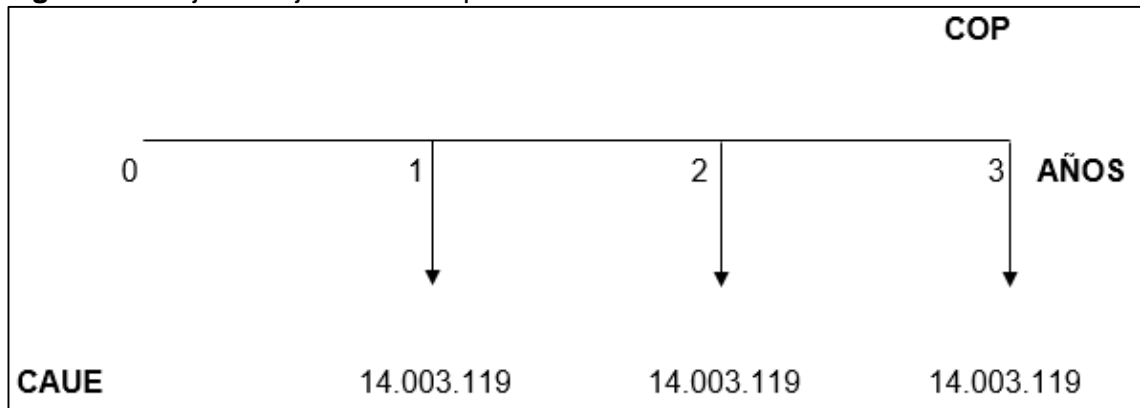
$$A = CAUE = -34.833.629 * \frac{(1 + 0,10)^3 * 0,10}{(1 + 0,10)^3 - 1}$$

$$A = CAUE = -34.833.629 * 0,402$$

$$A = CAUE = -14.003.119$$

A partir del cálculo del Costo Anual Uniforme Equivalente, la Figura 31 muestra los valores de la anualidad que expresan los costos operativos del método que realiza la empresa actualmente.

Figura 31. Flujo de caja del CAUE para el tratamiento actual.



Fuente: Elaboración propia.

Para realizar la comparación poder brindarla una conclusión a la evaluación financiera, se determina el CAUE para el método de tratamiento por electrocoagulación, el cálculo se puede observar en la Ecuación 23.

Ecuación 23. Cálculo del Costo Anual Uniforme Equivalente para el tratamiento por electrocoagulación.

$$A = CAUE = -32.777.021 * \frac{(1 + 0,10)^3 * 0,10}{(1 + 0,10)^3 - 1}$$

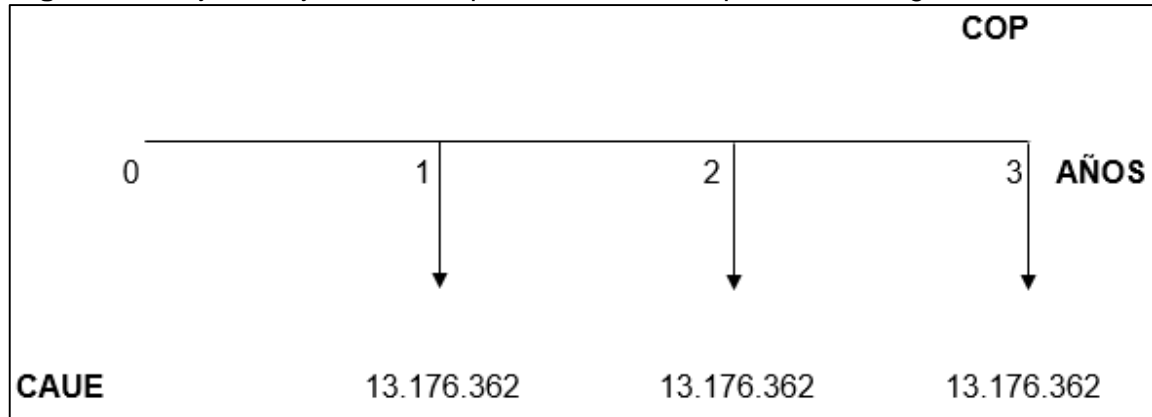
$$A = CAUE = -32.777.021 * 0,402$$

$$A = CAUE = -13.176.362$$

Finalmente, en la Figura 32 se puede observar el flujo de caja de la anualidad calculada para tratamiento por electrocoagulación, que representa los costos

operativos en los que incurriría la empresa al implementar este proceso durante tres años.

Figura 32. Flujo de caja del CAUE para el tratamiento por electrocoagulación.



Fuente: Elaboración propia.

7.4 CONCLUSIÓN FINANCIERA

Tras realizar todo el proceso de evaluación de los costos de inversión y operación, tanto para el método de tratamiento de coagulación química (proceso actual) como para el método de tratamiento por medio de electrocoagulación (proceso propuesto), desde el punto de vista financiero, para la empresa TSP Energy S.A.S., el método que genera menores costos al momento de tratar un mismo volumen de agua es el tratamiento por medio de electrocoagulación. Se llega a esta conclusión ya que determinado el Costo Anual Uniforme Equivalente para ambos tratamientos, la electrocoagulación representa menores costos al momento de implementarse. La diferencia entre los procesos analizados es de 826.757 COP a favor del método de electrocoagulación, lo que indica que el proyecto es viable.

8. CONCLUSIONES

- Durante el desarrollo de ésta investigación se logró realizar la descripción de las generalidades de los métodos de tratamiento de agua asociada a procesos petroleros, determinando que el tratamiento de agua se realiza mediante cuatro etapas. Al describir las cuatro etapas se logró dar claridad a la función y el tipo de contaminantes que se retiran en cada una de ellas. Por otro lado, se identificó la electrocoagulación como un método de tratamiento primario, donde se retira la materia sedimentable y flotante presente en el agua.
- En ésta investigación se describieron las generalidades del método de electrocoagulación, que incluyen las variables que afectan el proceso como lo son la densidad de corriente, el pH, el material de los electrodos y el tiempo de retención, además los tipos de reactores en que se puede ejecutar un proceso de electrocoagulación como lo son tipo batch, tipo filtro prensa, tipo fluidizado entre otros y demás parámetros técnicos que se deben tener en cuenta para la implementación de dicho método.
- Con la realización de las pruebas de laboratorio se logró caracterizar las muestras de agua, tanto antes como después de los tratamientos realizados, lo cual permitió realizar comparaciones en parámetros como: DQO, Conductividad, Turbidez, pH, Sólidos totales, suspendidos y disueltos, trazas de grasas y aceites, color real y color aparente, con los cuales se pudo determinar las mejores condiciones de operación.
- Luego de realizar comparaciones en los parámetros obtenidos para los escenarios de electrocoagulación realizados, se logró determinar que el elemento más apropiado para realizar el tratamiento de electrocoagulación es el aluminio, ya que ofrece mayor cantidad de parámetros con porcentajes de remoción superiores al hierro como lo son a 30V el DQO con 39,05%, el color real con 94,50%, el color aparente con 93,5%, trazas de grasa y aceites con 66,28% y turbidez con 63,73%; a 60V las trazas de grasa y aceites con 63,81%, sólidos totales con 45,05%, entre otros. Además el tratamiento con aluminio no genera afectaciones negativas en ninguno de los parámetros.
- Para los tratamientos realizados con hierro se evidenció que aunque el aluminio ofrece más parámetros con porcentaje de remoción superiores, el tratamiento con hierro puede ser muy efectivo para la remoción de sólidos suspendidos y sólidos totales con un voltaje de 30V y alta eficiencia de remoción de DQO para

un voltaje de 60V, pero debe realizarse un tratamiento adicional para remoción de color ya que al usar hierro, este parámetro sufre afectaciones de hasta 1000%.

- Se determinó que la electrocoagulación, teniendo aluminio como electrodo es mucho más eficaz cuando se trabaja a un voltaje de 30 voltios ya que como se determinó en el documento, a dicho voltaje se presenta un 94,59% de remoción de color real, un 93,75% de remoción de color aparente, un 66,28% de remoción de grasas y aceites y un 63,73% de remoción de turbidez.
- Al realizar la comparación de los valores de los parámetros obtenidos por el método químico realizado por la empresa TSP Energy, con los valores de los parámetros obtenidos mediante el tratamiento de electrocoagulación con electrodos de aluminio a un voltaje de 30V, se determinó que el método de electrocoagulación con electrodos de aluminio a 30V ofrece mayores ventajas y técnicamente es más productivo que el método químico utilizado por la empresa TSP Energy, ya que ofrece menores magnitudes en mayor cantidad de parámetros (DQO, Sólidos disueltos, Sólidos totales, Color real y Color aparente) aportando mejor calidad con respecto al método químico que ofrece menor magnitud en cuatro parámetros (Sólidos suspendidos, grasas y aceites, turbidez, conductividad) y además causa afectaciones negativas en tres parámetros (Sólidos suspendidos, Sólidos totales, Color aparente).
- Mediante la electrocoagulación se logró el cumplimiento de dos de los parámetros seleccionados de la resolución 0631 de 2015, estos fueron: pH y la cantidad de grasas y aceites. Para el pH los rangos permitidos por la resolución están que son entre siete y nueve, mientras que para el porcentaje de aceites y grasas la concentración debe ser menor o igual a 15 mg/L. Dichos límites se lograron alcanzar en los cuatro escenarios de tratamiento que se evaluaron durante esta investigación. A pesar de que los demás parámetros seleccionados no lograron los límites requeridos, la electrocoagulación como método primario, logró disminuciones importantes que contribuyen en el proceso de tratamiento de aguas, las cuales, para lograr la calidad requerida en dicha resolución, deben ser sometidas a procesos de tratamiento secundarios y terciarios.
- Se calcularon los costos de inversión y operación del método actualmente implementado por la empresa (coagulación química) y el método propuesto en esta investigación (electrocoagulación); y con ayuda del indicador financiero Costo Anual Uniforme Equivalente para un horizonte de evaluación de tres años, se determinó que el tratamiento por medio de electrocoagulación trae mayores beneficios para la empresa ya que bajo las mismas condiciones representa menores costos al momento de tratar el mismo volumen de agua residual. La

diferencia en costos de operación se traduce en 826.757 COP a favor de la electrocoagulación.

9. RECOMENDACIONES

- Realizar el tratamiento de electrocoagulación con muestras agua de diferentes campos petroleros, esto para evaluar el comportamiento del tratamiento frente aguas residuales con diferentes tipos de contaminantes, que como se explicó en el documento pueden variar según la procedencia del agua.
- Probar electrodos compuestos de materiales distintos al hierro y el aluminio, como por ejemplo: grafito, titanio y acero inoxidable. De esta manera se podrá evaluar el comportamiento de materiales poco comunes en los procesos de electrocoagulación.
- Realizar los tratamientos modificando variables como: pH, tiempo, temperatura y conductividad; que afectan la electrocoagulación. De esta manera se podría determinar a qué condiciones se obtendría la eficiencia máxima del tratamiento.
- Acompañar el tratamiento de electrocoagulación con procedimientos de tratamiento secundario como filtrado, con el fin de obtener muestras con mejores condiciones fisicoquímicas.
- Diseñar una celda de electrocoagulación que en su parte superior tenga un dispositivo mecánico que permita remover las espumas producidas.

BIBLIOGRAFÍA

AMENDOLA, Luis. Impacto de los CAPEX y OPEX en la gestión de los activos. [en línea]. 2016- [citado el 1 de junio de 2018]. Disponible en: <https://es.linkedin.com/pulse/impacto-de-los-capex-y-opex-en-la-gesti%C3%B3n-activos-amendola>

ANDÍA CÁRDENAS, Yolanda. Tratamiento de agua: Coagulación y floculación. Lima: SEDAPAL, 2000.

ARANGO RUIZ, Álvaro. Efecto del pH y la conductividad en la electrocoagulación de aguas residuales de la industria láctea. En: Producción + Limpia. 2012. vol. 1, no. 2, p. 59-67.

ARNOLD, Ken y STEWART, Maurice. Surface Production Operations. 3 ed. Burlington: Gulf Professional Publishing, 2008. 701 p.

ARNOLD, Richard, *et al.* Manejo de la producción de agua: De residuo a recurso. En: Oilfield Review. Septiembre-noviembre, 2004. vol. 16, no. 3, p. 30-45.

BACA CURREA, Guillermo. Ingeniería económica. 8 ed. Bogotá D.C.: Fondo Educativo Panamericano, 2002. 398 p.

BANCO DE LA REPUBLICA DE COLOMBIA. Informe sobre inflación. Informe del departamento de programación e inflación de la subgerencia de política monetaria e información económica del Banco de la Republica de Colombia. Bogotá: Banco de la Republica; 2018. ISSN-1667-7973.

BANCO DE LA REPUBLICA DE COLOMBIA. Salario mínimo legal en Colombia. [en línea]. 2018- [citado el 5 de junio de 2018]. Disponible en: http://obieebr.banrep.gov.co/analytics/saw.dll?Go&Action=prompt&lang=es&NQUser=publico&NQPassword=publico&path=%2Fshared%2fSeries%20Estad%C3%A9sticas_T%2F1.%20Salarios%2F1.1%20Salario%20m%C3%ADnimo%20legal%20en%20Colombia%2F1.1.1.SLR_Serie%20hist%C3%B3rica&Options=rdf

BÁRBARO, Lorena A.; KARLANIAN, Monica A. y MATA, Diego A. Importancia del pH y la conductividad eléctrica (CE) en los sustratos para plantas. Argentina: Ministerio de agricultura, ganadería y pesca, 2014. 10 p.

CAO, Jiasheng y MONROE, Steve. Efficient Si Removal from Recycled Water for Steam Injection Using Unique Electrocoagulation Process. En: SPE International Symposium on Oilfield Chemistry (13-15, abril: Woodlands, Texas, USA). Memorias. Woodlands. Society of Petroleum Engineers, 2015. 9 p.

CARRASCO MARÍN, Francisco y MENÉNDEZ DÍAZ, J. Ángel. Nuevos materiales y tecnologías para el tratamiento del agua. Andalucía: Universidad Internacional de Andalucía, 2010. 312 p. ISBN-978-84-7993-202-2.

CENKIN, V. E. y BELEVTSSEV, A. N. Electrochemical Treatment of Industrial Wastewater. En: Effluent and Water Treatment Journal. Julio, 1985. vol. 25, no. 7, p. 243-247.

CHÁVARRO ROA, M. R. Drilling Wastewater Post-Treatment by Reverse Osmosis Method. Discussion and Practical Results. En: SPE Latin American and Caribbean Health, Safety, Environment and Sustainability Conference (7-8, julio: Bogotá, Colombia). Society of Petroleum Engineers, 2015. 7 p.

CHEN, Guohua. Electrochemical technologies in wastewater treatment. En: Separation and Purification Technology. Octubre, 2004. vol. 38, no. 1, p. 11-14.

CODENSA. Tarifas de energía Codensa. [en línea]. 2018- [citado el 6 de junio de 2018]. Disponible en: <https://www.codensa.com.co/hogar/tarifas>

COGOLLO FLÓREZ, Juan Miguel. Clarificación de aguas usando coagulantes polimerizados: caso del hidroxiclورو de aluminio. En: Revista DYNA. Octubre, 2010. vol. 78, no. 165. p. 18-27. ISSN-234-6218-3.

COLOMBIA. MINISTERIO DE AMBIENTE Y DESARROLLO SOSTENIBLE. Resolución 1207. (25, julio, 2014). Por la cual se adoptan disposiciones relacionadas con el uso de aguas residuales tratadas. Diario Oficial. Bogotá D.C.: El Ministerio, 1996. 9 p.

COLOMBIA. MINISTERIO DE AMBIENTE Y DESARROLLO SOSTENIBLE. Resolución 0631. (17, marzo, 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.: El Ministerio, 2015. 62 p.

CRUZ ANDRADE, Aura María y SIERRA PARRA, Claudia Marcela. Propuesta de una alternativa de tratamiento de aguas residuales en la salsamentaria el Bohemio. Tesis de grado Ing. Química. Bogotá D.C.: Fundación Universidad de América. 2016. 198 p.

DANIEL ARTHUR, J., *et al.* Technical Summary of Oil & Gas Produced Water Treatment Technologies. ALL Consulting, LLC, 2005. 53 p.

DÁVILA RINCÓN, Javier; MARRIAGA CABRALES, Nilson y MACHUCA MARTÍNEZ, Fiderman. Remoción de sólidos totales de vinazas por

electrocoagulación-electroflotación. En: Revista DYNA. 2009. vol. 76, no. 158, p. 41-47.

DENG, Shubo, *et al.* Produced water from polymer flooding process in crude oil extraction: characterization and treatment by a novel crossflow oil–water separator. En: Separation and Purification Technology. Diciembre, 2002. vol. 29, no. 3, p. 207-216.

DORES, Raul, *et al.* Using advanced water treatment technologies to treat produced water from the petroleum industry. En: SPE International Production and Operation Conference and Exhibition (14-16, mayo: Doha, Qatar). Memorias. Doha. Society of Petroleum Engineers, 2012. 11 p.

DURAISAMY, Rangarajan T.; HEYDARI BENI, Ali y HENNI, Amr. State of the Art Treatment of Produced Water. En: Water Treatment. Regina, InTech, 2013. p. 200-222.

EBRATTH SALGADO, Oscar Aressu. Análisis del agua de producción. Laboratorio de fluidos – Análisis de aguas de producción [en línea]. 2011- [citado el 28 de mayo de 2018]. Disponible en: <https://es.slideshare.net/oebratth/agua-de-produccion>

EL TIEMPO. A controlar los vertimientos. Editorial [en línea], marzo de 2015- [citado el 24 de febrero de 2018]. Disponible en: <http://www.eltiempo.com/archivo/documento/CMS-15437637>

ESMAEILIRAD, Nasim, *et al.* Optimizing Metal-Removal Processes for Produced Water with Electrocoagulation. En: Oil and Gas Facilities. Abril, 2015. vol. 4, no. 2, p. 87-96.

FAKHUR'L-RAZI, Ahmadun, *et al.* Review of technologies for oil and gas produced water treatment. En: Journal of Hazardous Materials. vol. 170, no. 2, p. 530-551.

FAKSNESS, Liv-Guri; GRINI, Per Gerhard y DALING, Per S. Partitioning of Semi-Soluble Organic Compounds between the Water Phase and Oil Droplets in Produced Water. En: Marine Pollution Bulletin. 2004. vol. 48, no. 7, p. 731-742.

FORERO, J. E.; DÍAZ, J. y BLANDÓN, V. R. Diseño de un nuevo sistema de flotación para tratamiento de aguas industriales. En: Revista Ciencia, tecnología y futuro. Diciembre, 1999. vol. 1, no. 5, p. 67-75.

GHOSH, D.; MEDHI, C. R. y PURKAIT, M. K. Treatment of fluoride containing drinking water by electrocoagulation using monopolar and bipolar electrode connections. En: Chemosphere. Noviembre, 2008. vol. 73, no. 9, p. 1393-1400.

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN. Documentación, presentación de tesis, trabajos de grado y otros trabajos de investigación. NTC 1486. Bogotá: ICONTEC, 2008. 36 p.

_____. Referencias bibliográficas. Contenido, forma y estructura. NTC 5613. Bogotá: ICONTEC, 2008. 33 p.

_____. Referencias documentales para fuentes de información electrónicas. NTC 4490. Bogotá: ICONTEC, 1998. 23 p.

INSTITUTO DE HIDROLOGÍA, METEOROLOGÍA Y ESTUDIOS AMBIENTALES. Determinación de grasas y aceites en aguas por el método soxhlet. TP0150. Bogotá D.C.: IDEAM, 2007. 8 p.

JIMÉNEZ, S., *et al.* State of the art of produced water treatment. En: Chemosphere. 2017. vol. 192, p. 186-208.

KNUDSEN, B. L., *et al.* Meeting the Zero Discharge Challenge for Produced Water. En: SPE International Conference on Health, Safety, and Environment in Oil and Gas Exploration and Production (7: 29-31, marzo: Calgary, Alberta, Canadá). Society of Petroleum Engineers, 2004. 6 p.

KOBYA, Mehmet; TANER CAN, Orhan y BAYRAMOGLU, Mahmut. Treatment of textile wastewaters by electrocoagulation using iron and aluminum electrodes. En: Journal of Hazardous Materials. Marzo, 2003. vol. 100, p. 163-178.

LENNETECH. Aluminio [en línea]. 2018- [citado el 7 de marzo de 2018]. Disponible en: <https://www.lenntech.es/periodica/elementos/al.htm#ixzz5G5ZxAZes>

LENNETECH. Hierro [en línea]. 2018- [citado el 7 de marzo de 2018]. Disponible en: <https://www.lenntech.es/periodica/elementos/fe.htm#ixzz5G5cPehUw>

LENNETECH. Turbidez [en línea]. 2015- [citado el 16 de mayo de 2018]. Disponible en: <http://www.lenntech.es/turbidez.htm>

LIU, Shumeng, *et al.* Treatment of Produced Water from Polymer Flooding Process Using a New Type of Air Sparged Hydrocyclone. En: SPE Asia Pacific Health, Safety and Environment Conference and Exhibition (19-20, septiembre: Kuala Lumpur, Malaysia). Society of Petroleum Engineers, 2005. 4 p.

MARATHON OIL COMPANY. Water treatment process for reducing the hardness of an oilfield produced water. Inventor: CHARLES F. GARBUTT. Int. CL.:C02F 1/52. Fecha de solicitud: 15, abril, 1997. Estados Unidos. US005879562A. 09, marzo, 1999.

MEJIA ZAPATA, Claudia Isabel y OSORIO ECHEVERRI, Víctor Manuel. Decoloración de las aguas residuales con alto contenido de índigo por el método de electrocoagulación. En: Revista Facultad de Ingeniería de la Universidad de Antioquia. Junio, 2003. vol. 1, no. 29, p. 115-118.

MÉNDEZ GARCÍA, José David. Análisis de agua de producción [en línea]. 2011- [citado el 28 de mayo de 2018]. Disponible en: http://www.academia.edu/9254018/An%C3%A1lisis_de_agua_de_producci%C3%B3n

MOLLAH, M. Y., *et al.* Electrocoagulation (EC) - science and applications. En: Journal of Hazardous Materials. 2001. vol. 84, no. 1, p. 29-41.

MORANTE, Gonzalo. Electrocoagulación de Aguas Residuales. En: Revista Colombiana de Física. 2002, vol. 6, no. 2, p. 484-487.

MOTA, A. L. N., *et al.* Advanced oxidation processes and their application in the petroleum industry: A review. En: Brazilian journal of petroleum and gas. 2008. vol. 2, no. 3, p. 122-142.

OROZCO, Ana Lucia y CASTRO, Sandra Patricia. Remoción de color en aguas residuales del proceso de tinturado de una curtiembre mediante electrocoagulación. En: Ingenium. Mayo, 2012. vol. 6, no. 12, p. 51-58.

PITRE, R. L. Produced Water Discharges into Marine Ecosystems. En: Annual Offshore Technology Conference (16: 7-9, mayo: Houston, Texas, USA). Offshore Technology Conference, 1984. p. 129-134.

PRIETO GARCÍA, Francisco, *et al.* Electrocoagulación: Una Alternativa para Depuración de Lactosuero Residual. En: Revista AIDIS de Ingeniería y Ciencias Ambientales: Investigación, Desarrollo y Práctica. vol. 5, no. 3, 77 p.

RENOU, S., *et al.* Landfill leachate treatment: Review and opportunity. En: Journal of Hazardous Materials. 2008. vol. 150, no. 3, p. 468-493.

RESTREPO MEJÍA, Ana Patricia, *et al.* La Electrocoagulación: retos y oportunidades en el tratamiento de aguas. En: Producción + Limpia. 2006. vol. 1, no. 2, p. 58-77.

RIGOLA LAPEÑA, Miguel. Tratamiento de aguas industriales: aguas de proceso y residuales). Barcelona: Marcombo Boixareu Editores. 1990. 160 p. ISBN-84-267-0740-8.

SAIEN, J. y NEJATI, H. Enhanced photocatalytic degradation of pollutants in petroleum refinery wastewater under mild conditions. En: Journal of Hazardous Materials. 2007. vol. 148. p. 491-495.

SANS FONFRÍA, Ramón y RIBAS, Joan de Pablo. Ingeniería ambiental: Contaminación y tratamientos. Barcelona: Marcombo Boixareu Editores, 1989. 148 p. ISBN-84-267-0742-4.

Sedimentación [en línea]. Madrid: IMAGUA Water Technologies S.L., 2018- [citado el 24 febrero de 2018]. Disponible en: <http://www.imagua.es/pages/index/sedimentacion>.

SEVERICHE SIERRA, Carlos Alberto; CASTILLO BERTEL, Marlon Enrique y ACEVEDO BARRIOS, Rosa Leonor. Manual de métodos analíticos para la determinación de parámetros fisicoquímicos básico en Aguas. Cartagena de Indias: Fundación Universitaria Andaluza Inca Garcilaso, 2013. 95 p.

SHEIKH ZEINEDDIN, Taher. Water Treatment on the Tempa Rossa Project. En: Offshore Mediterranean Conference and Exhibition (13: 29-31, marzo: Ravenna, Italia). Offshore Mediterranean Conference, 2017. 11 p.

SOLAK Murat, *et al.* Removal of suspended solids and turbidity from marble processing wastewaters by electrocoagulation: Comparison of electrode materials and electrode connection systems. En: Journal of Hazardous Materials. Julio, 2009. vol. 172, no. 1, p. 345-352.

SULLIVAN, William G.; WICKS, Elin M. y LUXHOJ, James T. Traducido por Javier Enríquez Brito. Ingeniería económica de DeGarmo. 12 ed. México: Pearson Education, Inc., 2004. 708 p.

TECHNOLOGY SUBGROUP OF THE OPERATIONS & ENVIRONMENT TASK GROUP. Management of produced water from oil and gas wells. United States, The National Petroleum Council (NPC), 2011. Paper #2-17. 32 p.

THE PRODUCED WATER SOCIETY. What is produced water [en línea]. 2017- [citado el 7 de mayo de 2018]. Disponible en: <http://www.producedwatersociety.com/produced-water-101/>

TUV NEL Technology for life. Produced water composition [en línea]. 2017- [citado el 7 de mayo 7 de 2018]. Disponible en: http://www.tuvnel.com/assets/content_images/Produced_water_composition.pdf

VAN DEN BROEK, Wim M.G.T.; PLAT, Robert y VAN DER ZANDE, Mark J. Comparison of Plate Separator, Centrifuge and Hydrocyclone. En: SPE International

Conference and Exhibition (2-6, noviembre: Beijing, China). Society of Petroleum Engineers, 1998. p. 391-198.

VEIL, J. A., *et al.* A white paper describing produced water from production of crude oil, natural gas, and coal bed methane. United States, US Department of Energy (US), 2004. 79 p. DOI: 10.2172/821666.

YOUNKER, J., *et al.* Atlantic Canada Offshore R&D: Treatment of Oilfield Produced Water by Chemical Coagulation and Electrocoagulation. En: Offshore Technology Conference (2-5, Mayo: Houston, Texas, USA). Offshore Technology Conference, 2011. 5 p.

ANEXOS

ANEXO A

FICHA TÉCNICA DEL RECTIFICADOR DE CORRIENTE UTILIZADO



Ficha Técnica: Rectificadores

1. Potencia KVA	100	10	5
2. Tipo	Seco	Seco	Seco Regulado
3. Fases	3	3	1
4. Tensión primaria nominal VAC	440	220	110
5. Tensión secundaria nominal VDC	560	280	140
6. Regulación en alta tensión %			6 pasos
7. Gabinete	SI	SI	SI
8. Corriente primaria nominal AAC	131,2	26,2	45,4
9. Corriente secundaria nominal ADC	178,5	35,7	35,7
10. Aumento de temperatura sobre el ambiente promedio de 30°C en el:	N/A	N/A	N/A
a. Aceite superior °C	N/A	N/A	N/A
b. Promedio del conductor °C	45	45	45
11. Medidores			
a. Voltímetro digital DC	SI	SI	SI
b. Amperímetro digital	SI	SI	SI
12. Protección			
a. Breaker	SI	SI	SI
b. Fusibles	SI	SI	SI
c. Ventilación	Forzada	Forzada	Forzada
13. Regulación			
a. Manual	NO	NO	SI
b. Automática	NO	NO	NO
Tiempo de entrega	40	15	7