

**ESTUDIO DE DIFERENTES TÉCNICAS DE REMOCIÓN DE ACEITES
EN AGUAS RESIDUALES PROVENIENTES DE LA INDUSTRIA
PETROLERA**

ANGÉLICA MARÍA POPAYÁN PÁEZ

**PROGRAMA DE INGENIERÍA QUÍMICA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA AMBIENTAL, CIVIL Y
QUÍMICA
FACULTAD DE INGENIERÍAS Y ARQUITECTURA**



**UNIVERSIDAD DE PAMPLONA
PAMPLONA, diciembre 17 de 2021**

**ESTUDIO DE DIFERENTES TÉCNICAS DE REMOCIÓN DE ACEITES
EN AGUAS RESIDUALES PROVENIENTES DE LA INDUSTRIA
PETROLERA**

ANGÉLICA MARÍA POPAYÁN PÁEZ

**Trabajo de monografía presentado como requisito para optar al título de
INGENIER(A)O QUÍMIC(A)O**

Directora: PhD(C). JENIFFER KATERINE CARRILLO GÓMEZ

**PROGRAMA DE INGENIERÍA QUÍMICA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA AMBIENTAL, CIVIL Y
QUÍMICA
FACULTAD DE INGENIERÍAS Y ARQUITECTURA
UNIVERSIDAD DE PAMPLONA
Pamplona, diciembre 17 de 2021**

Dedicatoria

Cada día que vivo tengo certeza plena que es por la gracia de Dios, en su infinitud dedico este proyecto, como los demás proyectos y metas alcanzadas; a mi padre Saulo Popayan y madre Maria Sacramento Paez por su eterno amor, sabiduría, entendimiento y confianza, a mis hermanos Yeimy Liliana y Saulo Arbey por su apoyo incondicional a pesar de mis tropiezos, a mi esposo Juan Carlos Garcia por su acompañamiento en este proceso y la fortaleza que siempre me ha brindado y en especial a mi hija Sara Valeria mi motor de vida, la luz de mis ojos, quien me llena de fuerza y valor para afrontar cada reto en el camino de la vida.

AGRADECIMIENTOS

En primera instancia a Dios quien me permitido esta etapa de formación profesional, a mis padres por confiar, por los valores y principios que me han inculcado, a mi esposo e hija por su apoyo y comprensión, a todos los docentes que me acompañaron durante este proceso y me guiaron para obtener mi título universitario, entre los que destaco a Jacqueline, Yanza, Manuel, Daisy y Marlon, por su excelente labor vocacional, su integridad y humanidad con sus alumnos, finalmente a mi familia universitaria, por su colaboración, enseñanzas, disposición y apoyo, gracias a Nathalia, Marlon, Mildred, Leidy, Jesús, Christian, Anat y Gabriela.

Gracia a todos, este logro es tanto mío como de ustedes.

TABLA DE CONTENIDO

| | | |
|--------------|---|-----------|
| 1. | INTRODUCCIÓN | 11 |
| 2. | PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA Y JUSTIFICACIÓN..... | 12 |
| 3. | OBJETIVOS | 14 |
| 3.1 | OBJETIVO GENERAL | 14 |
| 3.2 | OBJETIVOS ESPECÍFICOS | 14 |
| 4. | GENERALIDADES | 15 |
| 4.1 | HISTORÍA DEL PETRÓLEO EN COLOMBIA..... | 15 |
| 4.2 | AGUAS RESIDUALES..... | 16 |
| 4.2.1 | Aguas Residuales Urbanas..... | 18 |
| 4.2.2 | Aguas Residuales Industriales..... | 18 |
| 4.3 | AGUAS RESIDUALES PETROLERAS | 19 |
| 4.3.1 | Etapas que producen Agua Residual Aceitosa..... | 19 |
| 4.3.2 | Manejo de Aguas Residuales | 20 |
| 4.4 | NORMATIVA COLOMBIANA..... | 20 |
| 4.5 | PLANTAS DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES | 25 |
| 4.6 | MÉTODOS DE REMOCIÓN DE ACEITES EN AGUAS RESIDUALES PETROLERAS..... | 26 |
| 4.6.1 | Coagulación-Floculación..... | 26 |
| 4.6.2 | Sedimentación | 27 |
| 4.6.3 | Flotación por Aire Disuelto (DAF) | 27 |
| 4.6.4 | Separador API | 28 |
| 4.6.5 | Separador CPI | 29 |
| 4.6.6 | Electrocoagulación..... | 29 |

| | | |
|--------------|--------------------------------------|----|
| 4.6.7 | Hidrociclón | 31 |
| 4.6.8 | Filtración por Membrana | 31 |
| 4.6.9 | Tratamiento Biológico | 32 |
| 5. | RESULTADOS Y ANÁLISIS | 34 |
| 6. | CONCLUSIONES | 40 |
| 7. | RECOMENDACIONES | 41 |
| 8. | REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS..... | 42 |

LISTA DE TABLAS

| | |
|--|----|
| Tabla 1 Diferentes tipos de prueba para estimar los constituyentes presentes en el agua residual. | 16 |
| Tabla 2 Diferentes tipos de prueba para estimar las características inorgánicas. | 17 |
| Tabla 3 Diferentes tipos de prueba para estimar las características orgánicas. | 18 |
| Tabla 4 Parámetros Fisicoquímicos a monitorear y sus valores límites máximos permisibles en los vertimientos de aguas asociadas a los Hidrocarburos..... | 21 |
| Tabla 5 Ventajas y Desventajas de los métodos de separación de agua y aceite. | 34 |
| Tabla 6 Diferentes métodos y porcentajes de remoción de grasas y aceites de las aguas residuales procedentes de la industria petrolera. | 36 |

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura. 1 Diferentes Métodos para el Tratamiento de Agua Residual..... | 25 |
| Figura. 2 Proceso de coagulación | 26 |
| Figura. 3 Proceso de floculación..... | 26 |
| Figura. 4 Proceso de sedimentación..... | 27 |
| Figura. 5 Sistema de Flotación por Aire Disuelto..... | 28 |
| Figura. 6 Sistema de Separador API. | 28 |
| Figura. 7 Sistema de Separador de Placas Corrugadas. | 29 |
| Figura. 8 Sistemas de Electrocoagulación..... | 30 |
| Figura. 9 Sistema de Hidrociclón..... | 30 |
| Figura. 10 Proceso de Filtración de Membrana..... | 32 |
| Figura. 11 Tratamiento anaeróbico en estanque de oxidación. | 33 |

GLOSARIO

Aguas Residuales: Es cualquier tipo de agua cuya calidad está afectada negativamente por la influencia antropogénica.

Agua Superficial: es aquella que se encuentra circulando o en reposo sobre la superficie de la tierra.

Bacterias: Las bacterias son organismos procariotas unicelulares, que se encuentran en casi todas las partes de la Tierra. Son vitales para los ecosistemas del planeta.

Cosméticos: Es todo aquel producto o sustancia que se aplica de manera superficial sobre alguna parte del cuerpo con objeto de mejorar su apariencia.

DBO: Demanda Bioquímica de Oxígeno.

DBO₅: Demanda Bioquímica de Oxígeno después de los 5 días.

Ecosistemas: Es un conjunto de especies de un área determinada que interactúan entre ellas y con su ambiente abiótico.

Efluente: Cualquier líquido de desecho o subproducto que entra en el ambiente desde algún punto de origen.

FC: Polímero líquido, coagulante-floculante, con gravedad específica de 1,25-1,35 a 25 °C.

FCAPM: Polímero líquido, tipo Poliacrilamida de carga catiónica y de alto peso molecular, con una gravedad específica de 1,08-1,18 a 25°C.

Fenoles: Son compuestos orgánicos cuyas estructuras moleculares contienen al menos un anillo aromático unido a un grupo hidroxilo y un grupo fenol.

Heterociclos: Son estructuras cíclicas que contienen átomos distintos del carbono (O, S, N), que se denominan hetero-átomos.

Hidrocarburos: Son un grupo de compuestos orgánicos que contienen principalmente carbono e hidrógeno.

Hidrocarburos Polinuclear Aromáticos: Es un hidrocarburo formado por moléculas de anillos aromáticos fusionados. Estos anillos comparten uno o más lados y contienen electrones deslocalizados.

Insecticidas: Es una solución química utilizada para matar insectos.

Materia Inorgánica: Es aquella que no está hecha de carbono y no son fabricadas por los seres vivos, sino por la naturaleza en reacciones químicas. Son moléculas pequeñas como las sales, los minerales, los cloruros, metales, etcétera.

Materias Orgánicas: Es la capa superficial del suelo, compuesta por restos en descomposición de seres vivos, como plantas, animales y residuos que brindan diversos nutrientes a los organismos productores como la vegetación.

Medio Ambiente: Conjunto de elementos equilibrados que engloban la naturaleza, la vida, los elementos artificiales, la sociedad y la cultura.

Metales Pesados: Son un grupo de elementos químicos que presentan una densidad alta. Son generalmente tóxicos para los seres humanos.

Microorganismos: Es un ser vivo diminuto que solo puede ser visto a través de un microscopio.

N: Elemento químico conocido como Nitrógeno. Es un gas incoloro, inodoro e inerte,

NaCl: Cloruro de Sodio, conocida como sal de mesa.

Operaciones Intermitentes: Es un proceso que no tiene definida una secuencia fija de operación.

Operaciones Unitarias: Son los cambios físicos (transformación de la materia) que se producen en los procesos de la industria química.

P: Elemento químico conocido como Fósforo, es un no metal sólido, amarillento, ceroso de olor desagradable, muy combustible y venenoso, que emite luz en la oscuridad.

PA: Polímero sólido tipo Poliacrilamida de alta carga catiónica y de alto peso molecular, con una viscosidad de 100-200 cps a 25°C con una concentración de 0,1%.

PAC: Policloruro de Aluminio ($Al_2(OH)_3 \bullet Cl_3$)

PAPM: Ayudante de coagulación, polímero líquido con alta densidad de carga catiónica, con gravedad específica de 1,25-1,35 a 25 °C.

Patógenos: Son agentes infecciosos que pueden provocar enfermedades a su huésped.

Petróleo: Es un aceite mineral de color muy oscuro o negro, menos denso que el agua y de un olor acre característico. Está formado por una mezcla de hidrocarburos.

PFS: Sulfato de Hierro Polimérico

Plomo: Elemento químico de número atómico 82. Metal sólido de color gris azulado, blando, maleable, dúctil, de elevada densidad y mal conductor de la electricidad.

Procesos Unitarios: Son cambios químicos de los materiales, como resultado de una reacción química.

PTAR: Siglas en español de Planta de Tratamiento de Agua Residual

1. INTRODUCCIÓN

La industria del petróleo durante años ha generado grandes volúmenes de aguas residuales con un contenido alto de aceites, convirtiéndose en un problema y a la vez un desafío que debe ser estudiado y explorado con más intensidad debido a los impactos negativos que puede generar a la salud, ecosistemas y medio ambiente en general.

En las últimas 4 décadas, el consumo de energía a nivel mundial ha ido aumentando de forma exponencial (5,6%) y esto a su vez genera grandes cambios desfavorables en el medio ambiente (S. Kumar et al., 2019). Para producir y extraer petróleo es necesario utilizar una suma bastante grande de agua (Neder et al., 2020), se estima que a nivel mundial se producen unos 75 millones de barriles de petróleo por día y a su vez unos 210 millones de barriles de agua residual, concluyendo que, por cada barril de petróleo producido, se contaminan de 3 a 4 barriles de agua (Prada R, 2021).

La monografía pretende realizar un análisis a través de la recolección de datos proporcionados por diferentes investigaciones, sobre los procesos de remoción de aceite en las aguas producidas por la industria petrolera y los coagulantes-floculante más efectivo en el proceso; con el fin de determinar cuál es el método más adecuado con respecto al porcentaje de remoción.

Inicialmente se presentará información relacionada con la historia del petróleo en Colombia, los diferentes tipos de aguas residuales, las aguas residuales petroleras y las normativas colombianas que establecen los parámetros máximos de los contaminantes en las aguas vertidas en los ecosistemas. Posteriormente de forma resumida se encuentra en qué consisten las plantas de Tratamiento de Agua Residual Petrolera y los diferentes tipos de procesos o métodos de remoción de grasas y aceites producidos por la industria petrolera. Finalmente se encontrará una comparación de los diferentes métodos para determinar el proceso más factible con relación al porcentaje de remoción de grasas y aceites.

2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA Y JUSTIFICACIÓN

La industria del petróleo a nivel mundial es uno de los sectores que trabaja con mayores volúmenes de agua. Según la CNBC para el año 2020 los pozos petroleros a nivel mundial producirían alrededor de 12,7 mil millones de galones diarios de agua (*Five Barrels of Water for One Barrel of Oil*, 2020). Ecopetrol generó la producción 697 mil barriles de petróleo por día en el año 2020, con un consumo total de 147,6 Mm³ de agua (Ecopetrol S.A, 2020). Corficolombiana estimó la producción de 800 mil barriles de petróleo para el año 2021, relacionando así el aumento de consumo de agua para su producción actual (Mojica & Romero, 2021).

El agua de la industria del petróleo en Colombia se usa y/o se genera en las fases de Extracción, Producción, Transporte, Almacenamiento y Procesos Petroquímicos, esta es considerada una de las mayores fuentes de contaminación ambiental. Dentro del plan de riesgo medioambiental que presenta el manejo inadecuado de las aguas residuales producidas por la industria petrolera, se manifiestan principalmente en los recursos de agua potable (subterránea o superficial), en la atmósfera, los cultivos agrícolas, el paisaje natural y a su vez repercute en la salud humana; esto se debe a la gran cantidad de sustancias tóxicas que contiene, tales como, grasas, aceites, metales pesados (estroncio, bario, cadmio, cromo, plomo y mercurio), gases (oxígeno, cloro y ácido sulfúrico), aniones (sulfatos, carbonatos y bicarbonatos), cationes (magnesio, sodio y hierro) y microorganismos (Mesa et al., 2018; Yu & Han, 2017a).

En el año 2018 los vertimientos de las aguas residuales se distribuyen de la siguiente manera; un 1,3 % se inyecta por disposición, el 58,2 % en reinyección por recobro o inyección subterráneas, el 0,3 % al riego agroindustrial y el 40,2 % a vertimientos a cuerpos de agua, teniendo como resultado más de 59 ríos afectados (Magdalena, Cauca, César, Bogotá, San Juan, Baudó, Guapí, Putumayo, Caquetá, Vaupés, Guainía, Arauca, Meta, Vichada, Ariari, Catatumbo, Zulia, Río de Oro, entre otros) y finalizando en el océano (Mesa et al., 2018).

El aumento de la población, el cambio climático y la contaminación, generan presiones sobre los sistemas de agua, es así como la escasez de agua se ha convertido en un problema importante para el mundo (El-nwsany et al., 2019; Vasistha & Ganguly, 2020).

Debido al problema ambiental mencionado anteriormente, se decidió realizar una monografía sobre los métodos más eficientes en la remoción de aceites y grasas en los tratamientos de las aguas residuales procedentes de la industria petrolera.

El documento se realizó a través de la revisión bibliográfica, con la finalidad de conocer y analizar los diferentes procesos que se emplean en las plantas de tratamiento de agua residual petrolera para la remoción de grasas y aceites. Las metodologías que se decidieron comparar, fueron tomadas como referencia de los procesos utilizados para la remoción de aceites y grasas por Ecopetrol en Colombia.

El enfoque del trabajo busca beneficiar de forma directa a la investigación sobre el tratamiento de las aguas residuales producidas en la industria petrolera, exactamente en el tema de la remoción de las grasas y aceites presentes en las aguas que se reintegra en el medio ambiente, con el objetivo final de determinar cuál o cuáles son los métodos más eficientes para dicha problemática y así contribuir a la disminución del impacto ambiental generado por la industria petrolera y sus derivados.

3. OBJETIVOS

3.1 OBJETIVO GENERAL

Analizar y comparar los diferentes métodos para el proceso de remoción de aceite en las aguas residuales de la industria petrolera.

3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Mostrar los procesos de remoción de aceite en las aguas residuales producidas en la industria petrolera más efectivos.
- Analizar cada uno de los métodos de remoción de aceite en las aguas residuales producidas en la industria petrolera.
- Comparar los métodos de remoción de aceite en las aguas residuales producidas en la industria petrolera en función del porcentaje de remoción.

4. GENERALIDADES

El agua siempre ha presentado un papel muy importante en el desarrollo de la vida humana y en el medio ambiente; si no se garantiza la seguridad del agua, el planeta puede quedar expuesto al riesgo de enfermedades y daños en los ecosistemas (Lenntech, 2018; OMS, 2006). Debido al deterioro de las masas de agua superficial, en los últimos años se han implementado regulaciones, normas y monitoreo de las mismas (Cooper, 2018; Vasistha & Ganguly, 2020). Las practicas industriales están dirigiendo al medio ambiente a un nivel de contaminación impresionante (Saleh et al., 2020), entre los contaminantes encontramos productos farmacéuticos, tintes, pesticidas, cosméticos y los derivados del petróleo (siendo estos los más preocupantes) (Gomes et al., 2018).

La industrialización y el alto consumo de productos petroquímicos, es responsable de las altas producciones de aguas residuales contaminadas que poseen una gran cantidad de compuestos tóxicos (aceite, grasas, fenoles, benceno, tolueno, xileno e hidrocarburos) (Tetteh & Rathilal, 2020) y si estas son tratadas de forma incorrecta, pueden bloquear el intercambio de gases en las fuentes hídricas, afectando los procesos de fotosíntesis y así destruyendo el equilibrio ecológico; además de contaminar el suelo, los animales y posiblemente a los humana. Estas aguas deben tratarse a fondo y de manera económica, con un proceso eficiente (You et al., 2018). Debido a la importancia que posee el agua para la vida, cada año se generan nuevas tecnologías y procesos combinados para el mejoramiento de la calidad del agua residual antes de ser vertida a una fuente fluvial y así generar una sustentabilidad ambiental y energética (Olajire, 2020)

4.1 HISTORÍA DEL PETRÓLEO EN COLOMBIA

Inicia en el siglo XVII con la expedición de Gonzalo Jiménez de Quesada, en el lugar que hoy se conoce como Barrancabermeja. El señor Jiménez vio como el líquido negrozco brotaba del suelo y desconociendo que este ya era utilizado como producto medicinal por la comunidad indígena de los Yarigués. En la década de los 70 la producción era insuficiente para el país, llevando a una modificación en las políticas petroleras y provocando unas regulaciones técnicas muy pobres y ajenas a la realidad del potencial del daño que sus procesos pueden provocar al medio ambiente.

En la actualidad ya existen mayores restricciones, autorizaciones y normativas que son beneficiosas y disminuyen el riesgo ambiental (Gutiérrez Rico, 2018).

4.2 AGUAS RESIDUALES

Las aguas residuales son aquellas que presentan una composición variada y alterada químicamente, estas son provenientes de las diferentes descargas, como lo son las municipales, industriales, comerciales, de servicios agrícolas, pecuarios, domésticos y en general cualquier tipo de agua que haya tenido degradación en su calidad. Su composición es de origen orgánico o inorgánico y esto se puede resumir como componentes suspendidos (gruesos y finos) y componentes disueltos.

Para el conocimiento adecuado de las características físicas y químicas del agua residual, se realizan pruebas de los constituyentes (Tabla 1), características químicas inorgánicas (Tabla 2) y orgánicas (Tabla 3) (Bermeo Garay, 2016).

Tabla 1 Diferentes tipos de prueba para estimar los constituyentes presentes en el agua residual.

Fuente: (Bermeo Garay, 2016)

| PRUEBA | ABREVIATURA / DEFINICIÓN | USO O SIGNIFICADOS DEL RESULTADO |
|---------------------------------------|--------------------------|--|
| | CARACTERÍSTICAS FÍSICAS | |
| Sólidos Totales | ST | Determinar la clase de proceso y operación más apropiada para su tratamiento |
| Sólidos Volátiles Totales | SVT | |
| Sólidos Fijos Totales | SFT | |
| Sólidos Suspendidos Totales | SST | |
| Sólidos Suspendidos Volátiles | SSV | |
| Sólidos Suspendidos Fijos | SSF | |
| Sólidos Disueltos Totales | SDT (ST-SST) | Estimar la reutilización potencial del agua residual |
| Sólidos Disueltos Volátiles | SDV | |
| Sólidos Disueltos Fijos | SDF | |
| Sólidos Sedimentables | - | Determinar aquellos sólidos que se sedimentan por gravedad en un tiempo específico |
| Distribución de partículas por tamaño | DPT | Evaluar el desempeño de los procesos de tratamiento |
| Turbiedad | UNT | Evaluar la calidad del agua residual tratada |
| Color | Café claro, gris, negro | Estimar la condición del agua residual |

| | | |
|---------------|---------|---|
| Transmitancia | %T | Estimar si el efluente tratado es apropiado para desinfección con radiación UV |
| Olor | NUO | Determinar si el olor puede ser un problema |
| Temperatura | °C o °F | Importante en el diseño y operación de instalaciones de tratamiento con procesos biológicos |
| Densidad | ρ | - |
| Conductividad | CE | Estimar si el efluente tratado es apto para su uso agrícola |

Tabla 2 Diferentes tipos de prueba para estimar las características inorgánicas.

Fuente: (Bermeo Garay, 2016)

| PRUEBA | ABREVIATURA / DEFINICIÓN | USO O SIGNIFICADOS DEL RESULTADO |
|--|---|---|
| | CARACTERÍSTICAS FÍSICAS | |
| Amonio libre | NH_4^+ | Usado como medida de nutrientes y para establecer el grado de descomposición del agua residual; las formas oxidadas pueden tomarse como una medida del grado de oxidación. Usado como medida de nutrientes. |
| Nitrógeno orgánico | N-org | |
| Nitrógeno total Kjeldahl | NTK ($\text{N org} + \text{NH}_4^+$) | |
| Nitritos | NO_2^- | |
| Nitratos | NO_3^- | |
| Fósforo inorgánico | P inorg | |
| Fósforo total | FT | |
| Fósforo orgánico | P org | |
| pH | $\text{pH} = \log 1/[\text{H}^+]$ | Medida de la acidez o basicidad de una solución acuosa |
| Alcalinidad | $\Sigma \text{HCO}_3^- + \text{CO}_3^{2-} + \text{OH}^- - \text{H}^+$ | Medida de la capacidad amortiguadora del agua residual |
| Cloruro | Cl^- | Evaluar la posibilidad de ser empleada en el uso agrícola |
| Sulfatos | SO_4^{2-} | Estimar la formación potencial de olores y de tratamiento apropiado de los lodos residuales |
| Metales | As, Cd, Ca, Cr, Co, Cu, Pb, Mg, Hg, Mo, Ni, Se, Na, Zn | Estimar la posibilidad de reutilizar el agua residual y los posibles efectos tóxicos en el tratamiento. Las cantidades de metales son importantes en el tratamiento biológico |
| Compuestos y elementos inorgánicos específicos | - | - |

| | | |
|-------|--|---|
| Gases | O ₂ , CO ₂ , NH ₃ , H ₂ S, CH ₄ | Presencia o ausencia de un gas específico |
|-------|--|---|

Tabla 3 Diferentes tipos de prueba para estimar las características orgánicas.

Fuente: (Bermeo Garay, 2016)

| PRUEBA | ABREVIATURA / DEFINICIÓN | USO O SIGNIFICADOS DEL RESULTADO |
|---|-----------------------------|--|
| | CARACTERÍSTICAS FÍSICAS | |
| Demanda bioquímica carbonácea de oxígeno a cinco días | DBOC ₅ | Medida de la cantidad de oxígeno requerido para estabilizar biológicamente un residuo |
| Demanda bioquímica carbonácea de oxígeno última | DBOU (DBO _u , L) | |
| Demanda bioquímica carbonácea de oxígeno nitrogenácea | DON | Medida de la cantidad de oxígeno requerido para oxidar biológicamente el nitrógeno amoniacal de un agua residual a nitratos |
| Demanda química de oxígeno | DQO | Usada con frecuencia como sustituto de la prueba de DBO |
| Carbono orgánico total | COT | |
| Compuestos y clases de compuestos orgánicos específicos | - | Determinar la presencia de compuestos orgánicos específicos y estimar la necesidad de medidas especiales en el diseño para su remoción |

4.2.1 Aguas Residuales Urbanas.

Son aguas procedentes del servicio doméstico, público, universidades, limpieza de locales, actividades humanas y drenaje (Bokova, 2017); entre los compuestos que se encuentran en ella, tenemos: materia orgánica en suspensión y disuelta, compuestos químicos como N, P, NaCl y otras sales minerales, materia sólida inorgánica en suspensión, fenoles, plomo, insecticidas, aceites de motores, jabones, detergentes, entre muchos más. Una de sus características físico-químicas es que su temperatura oscila entre 10 y 20 °C, biológicamente posee números microorganismos, patógenos y bacterias.

4.2.2 Aguas Residuales Industriales.

Son aguas generadas en la fabricación de una amplia gama de procesos que pueden ser definidos de acuerdo a la materia prima y al tipo de contaminantes que contiene (orgánicos, inorgánicos y complejos), siendo determinados a través de diferentes caracterizaciones como la demanda bioquímica de oxígeno (DBO), demanda química de oxígeno (DQO), cloro libre e

residual total, coliforme totales, sólidos disueltos totales (TSD), dureza total, nitrógeno total, carbono orgánico total, sólidos totales, turbiedad, entre otras (Arockiam JeyaSundar et al., 2020; ISO 22447, 2019; João et al., 2018).

4.3 AGUAS RESIDUALES PETROLERAS

El efluente de las Refinerías Petroleras, es agua residual (también conocida como salmuera) es generada en la extracción del crudo y durante la producción de otros productos petroquímicos (Singh & Kumar, 2020). Las grandes cantidades de agua residual están contaminadas por compuestos químicos como: fenoles, hidrocarburos, hidrocarburos polinuclear aromáticos, heterociclos y metales pesados (Ghosh & Mukherji, 2020). En ningún lugar del planeta se encuentran plantas de tratamiento de agua residual idéntica, esto se debe a que las características del petróleo que se trata son diferentes, además de las regulaciones ambientales que presente cada país (Torres & Gutiérrez, 2017).

4.3.1 Etapas que producen Agua Residual Aceitosa

Durante diferentes procesos en la producción del petróleo se utilizan grandes cantidades de agua, dando como resultado fuentes de agua residuales oleosas. Las diferentes etapas que producen dichas fuentes son: Extracción, Refinación, Almacenamiento, Transporte y Procesos Petroquímicos (Yu & Han, 2017a).

En la fase de Extracción es donde se genera la mayor contaminación, el agua residual puede llegar a ser el 50% del volumen producido en pozos on-shore, teniendo en cuenta que la cantidad de agua generada va de la mano con el tipo de pozo, su vida productiva y la época del año; obteniendo que al final de vida útil del pozo puede generarse casi un 100% de agua residual oleosa. En los pozos off-shore se estima que la cantidad de agua residuales oleosa producida equivale entre 75 y 80%, siendo una relación entre agua residual y petróleo de 3:1 a 4:1, registrando una producción de casi 100.000.000 barriles de agua residual por día para el año 2015 (Liu et al., 2021). Para el año 2016, Ecopetrol reportó que la fase de producción generaba un 91,72% de agua residual (Mesa et al., 2018).

En las etapas de Refinación, Almacenamiento, Transporte y Procesos Petroquímicos se generan aguas residuales a través del drenaje, de la limpieza, depuración de las calderas, procesamiento de agua contaminada o condensada, alcantarillados y agua lluvia accidentalmente contaminada (PSC, 2021). En estas etapas se produce un rango aproximado en volumen de 0,1 a 2 % de agua residual oleosa, en comparación con el crudo obtenido (Torres & Gutiérrez, 2017).

4.3.2 Manejo de Aguas Residuales

En Colombia las autoridades ambientales tienen diferentes opciones para manejar las aguas residuales producidas de hidrocarburos, entre estas están: el vertimiento en corrientes de afluentes (ríos), la evaporación, la reinyección en el mismo campo (para generar recuperación del petróleo (Guerra-Santiesteban & Yparraguirre-Peña, 2020)), el reúso en riego (utilizada en cultivos y reforestación silvopastoril) y el Disposal (Ecopetrol S.A, 2020)

4.4 NORMATIVA COLOMBIANA

La resolución 631 del 17 de mayo del 2015, establece los parámetros y valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales a cuerpos de aguas superficiales y a los sistemas de alcantarillado público y se dictan otras disposiciones. A través del Artículo 11, proporcionan los valores límites de los parámetros para vertimiento de aguas relacionadas con los Hidrocarburos (Petróleo Crudo, Gas Natural y Derivados) (Tabla 4) (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2015).

Tabla 4 Parámetros Físicoquímicos a monitorear y sus valores límites máximos permisibles en los vertimientos de aguas asociadas a los Hidrocarburos.

Fuente: Tabla tomada de (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2015)

| | PARÁMETRO | UNIDADES | EXPLORACIÓN (UPSTREAM) | PRODUCCIÓN (UPSTREAM) | REFINO | VENTA Y DISTRIBUCIÓN (DOWNSTREAM) | TRANSPORTE Y ALMACENAMIENTO (MIDSTREAM) |
|----------------------|---|---------------------|-----------------------------------|----------------------------------|--------------------|--|--|
| Generales | pH | Unidades de pH | 6 a 9 | 6 a 9 | 6 a 9 | 6 a 9 | 6 a 9 |
| | Demanda Química de Oxígeno (DQO) | mg/L O ₂ | 400 | 180 | 400 | 180 | 180 |
| | Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO ₅) | mg/L O ₂ | 200 | 60 | 200 | 60 | 60 |
| | Sólidos Suspendedos Totales (SST) | mg/L | 50 | 50 | 50 | 50 | 50 |
| | Sólidos Sedimentables (SSED) | mL/L | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| | Grasas y Aceites | mg/L | 15 | 15 | 15 | 15 | 15 |
| | Fenoles | mg/L | 0,2 | 0,2 | 0,2 | 0,2 | 0,2 |
| | Sustancias Activas al Azul de Metileno (SAAM) | mg/L | Análisis y Reporte | Análisis y Reporte | Análisis y Reporte | Análisis y Reporte | Análisis y Reporte |
| Hidrocarburos | Hidrocarburos Totales (HTP) | mg/L | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 |

| | | | | | | | |
|-------------------------------|--|------|--------------------|--------------------|--|--------------------|--------------------|
| | Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos (HAP) | mg/L | Análisis y Reporte | Análisis y Reporte | Análisis y Reporte | Análisis y Reporte | |
| | BTEX (Benceno, Tolueno, Etilbenceno y Xileno) | mg/L | Análisis y Reporte | Análisis y Reporte | Análisis y Reporte | Análisis y Reporte | |
| | Compuestos Orgánicos Halogenados Absorbibles (AOX) | mg/L | Análisis y Reporte | Análisis y Reporte | Análisis y Reporte | Análisis y Reporte | |
| Compuestos de Fósforo | Fósforo Total (P) | mg/L | Análisis y Reporte | Análisis y Reporte | Análisis y Reporte | Análisis y Reporte | Análisis y Reporte |
| | Ortofosfatos (P-PO ₄ ³⁻) | mg/L | Análisis y Reporte | Análisis y Reporte | Análisis y Reporte | Análisis y Reporte | |
| Compuesto de Nitrógeno | Nitratos (N-NO ₃ ⁻) | mg/L | Análisis y Reporte | Análisis y Reporte | Análisis y Reporte | Análisis y Reporte | |
| | Nitrógeno Amoniacal (N-NH ₃) | mg/L | Análisis y Reporte | Análisis y Reporte | Análisis y Reporte | Análisis y Reporte | |
| | Nitrógenos Totales (N) | mg/L | 10 | 10 | 10 o 40 si el proceso de refinado se incluyen actividades de hidrogenación | Análisis y Reporte | Análisis y Reporte |
| Iones | Cianuro Total (CN ⁻) | mg/L | 1 | 1 | 1 | | |

| | | | | | | | |
|-----------------------------|---|------------------------|------------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| | Cloruros (Cl ⁻) | mg/L | 1200 | 1200 | 500 | 250 | 250 |
| | Fluoruros (F ⁻) | mg/L | Análisis y Reporte | Análisis y Reporte | Análisis y Reporte | | |
| | Sulfatos (SO ₄ ²⁻) | mg/L | 300 | 300 | 500 | 250 | 250 |
| | Sulfuros (S ²⁻) | mg/L | 1 | 1 | 1 | | |
| Metales y Metaloides | Arsénico (As) | mg/L | 0,1 | 0,1 | 0,1 | | |
| | Bario (Ba) | mg/L | Análisis y Reporte | Análisis y Reporte | Análisis y Reporte | | |
| | Cadmio (Cd) | mg/L | 0,1 | 0,1 | 0,1 | | |
| | Cinc (Zn) | mg/L | 3 | 3 | 3 | | |
| | Cobre (Cu) | mg/L | 1 | 1 | 1 | | |
| | Cromo (Cr) | mg/L | 0,5 | 0,5 | 0,5 | | |
| | Hierro (Fe) | mg/L | 3 | 3 | 3 | | |
| | Mercurio (Hg) | mg/L | 0,01 | 0,01 | 0,01 | | |
| | Níquel (Ni) | mg/L | 0,5 | 0,5 | 0,5 | | |
| | Plata (Ag) | mg/L | Análisis y Reporte | Análisis y Reporte | Análisis y Reporte | | |
| | Plomo (Pb) | mg/L | 0,2 | 0,2 | 0,1 | | |
| | Selenio (Se) | mg/L | 0,2 | 0,2 | 0,2 | | |
| | Vanadio (V) | mg/L | 1 | 1 | 1 | | |
| | Otros parámetros para Análisis y Reporte | Acidez Total | mg/L CaCO ₃ | Análisis y Reporte | Análisis y Reporte | Análisis y Reporte | Análisis y Reporte |
| Alcalinidad Total | | mg/L CaCO ₃ | Análisis y Reporte | Análisis y Reporte | Análisis y Reporte | Análisis y Reporte | Análisis y Reporte |

| | | | | | | | |
|--|---|------------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| | Dureza Cálrica | 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 |

4.5 PLANTAS DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES

Las PTAR necesitan equipos especializados para cada uno de los procesos de remoción de contaminantes y depuración del agua, además de cámaras, estanques y diferentes tecnologías (Galeano et al., 2016). Las aguas generadas en cada uno de los procesos industriales requieren un tratamiento detallado antes de ser descargado a un cuerpo hídrico; en la etapa inicial predominan los fenómenos físicos que corresponden a las operaciones unitarias, posteriormente se emplean los procesos químicos y biológicos (procesos unitarios). Para la eliminación de los sólidos suspendidos, se realiza una combinación de los procesos y operaciones unitarias. El tratamiento de una planta de agua residual, se divide en: Pre-tratamiento, Tratamiento Primario, Tratamiento secundario y Tratamiento terciario o avanzado (Figura. 1) (Bermeo Garay, 2016).

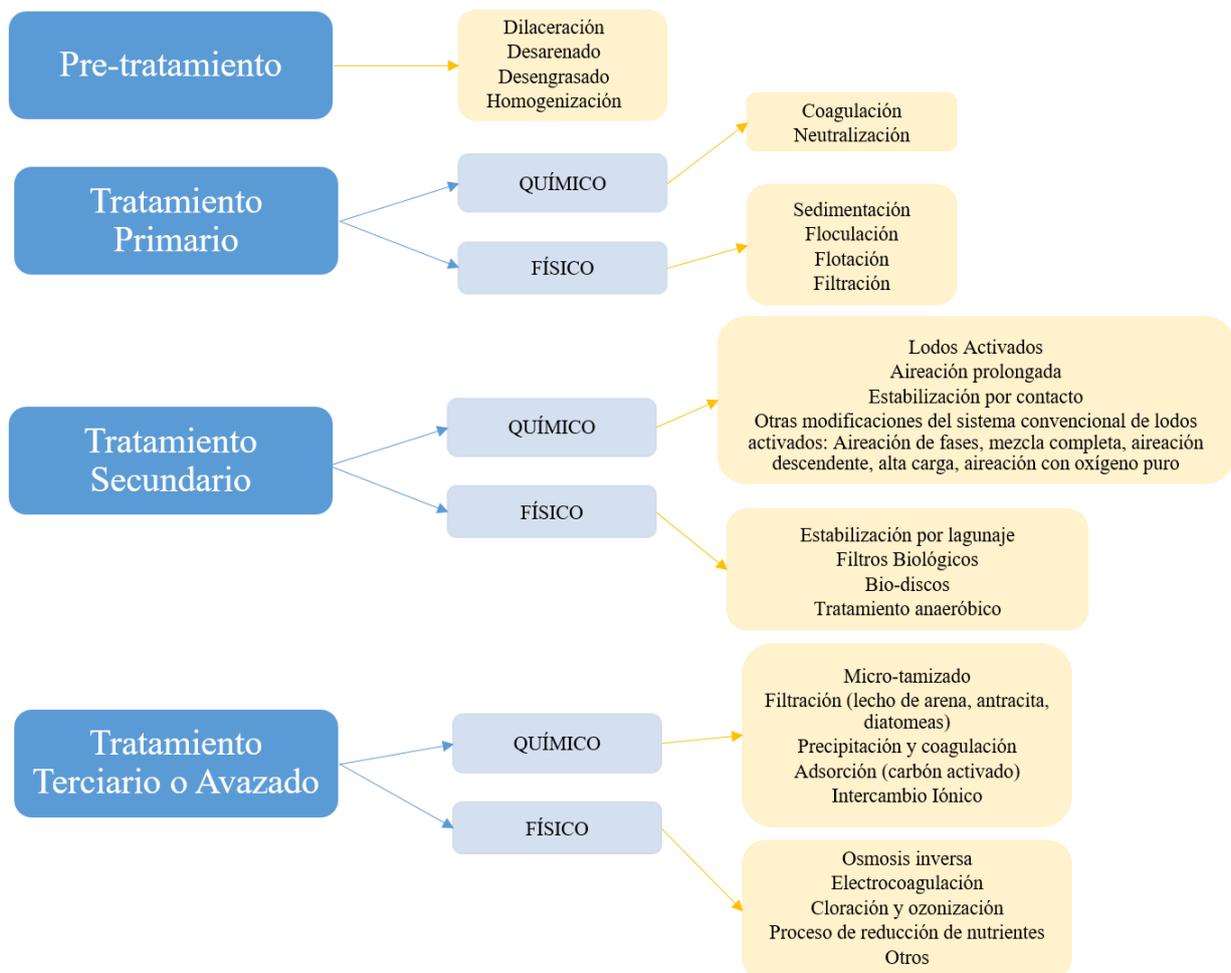


Figura. 1 Diferentes Métodos para el Tratamiento de Agua Residual.

Fuente: Figura realizada por el autor con información de (Bermeo Garay, 2016)

Los tratamientos de Agua Residual tienen como objetivos la reducción del DBO₅ y DBO, remover nutrientes y sustancias químicas, inactivar microorganismos y patógenos y finalmente, cumplir con las normas o reglas legales (Lazcano Carreño, 2016).

4.6 MÉTODOS DE REMOCIÓN DE ACEITES EN AGUAS RESIDUALES PETROLERAS.

4.6.1 Coagulación-Floculación

Para desestabilizar, separar y reagrupar las partículas coloidales se deben realizar las operaciones de coagulación y floculación. El proceso de coagulación es el resultado de dos fenómenos, el primero es un proceso químico, donde el coagulante reacciona con el agua y forma una especie hidrolizada con cargas positivas; el proceso secundario es fundamentalmente físico, donde la especie hidrolizada se transporta y hace contacto con las impurezas del agua, neutralizando las cargas y conduciendo a la agregación de partículas más pequeñas (Figura. 2). La floculación es un proceso complementario de la coagulación y favorece el crecimiento y la aglomeración de las partículas desestabilizadas por medio de la agitación mecánica (Figura. 3) (Hernández Cupaja, 2019; Saravanan et al., 2021).

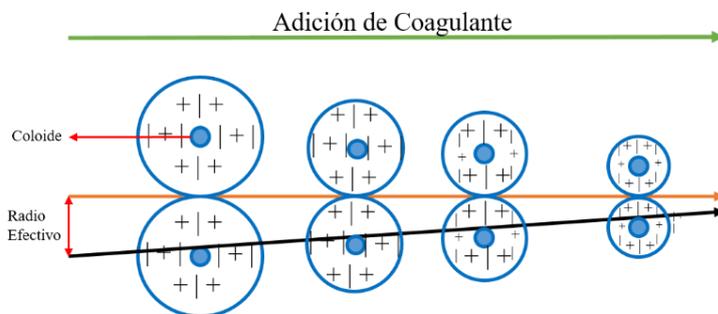


Figura. 2 Proceso de coagulación

Fuente: Figura realizada por el autor con información de (Saravanan et al., 2021)

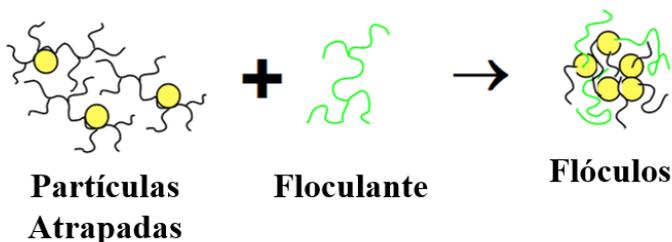


Figura. 3 Proceso de floculación

Fuente: Figura realizada por el autor con información de (Saravanan et al., 2021)

4.6.2 Sedimentación

La sedimentación es un proceso de separación de partículas a través de la gravedad, generado por la disminución de la velocidad del fluido, haciendo que la partícula permanezca en reposo, como se observa en la Figura. 4. Este proceso es utilizado previamente de la coagulación, con el fin de reducir la concentración de sólidos. Existen tres diferentes procesos de sedimentación, en el primero las partículas se sedimentan a una velocidad constante y no se produce adherencia ni floculación, en la segunda las partículas floculan debido al cambio constante de tamaño de partícula y en la tercera se generan deposiciones con altas concentraciones en distintas zonas (Saravanan et al., 2021)

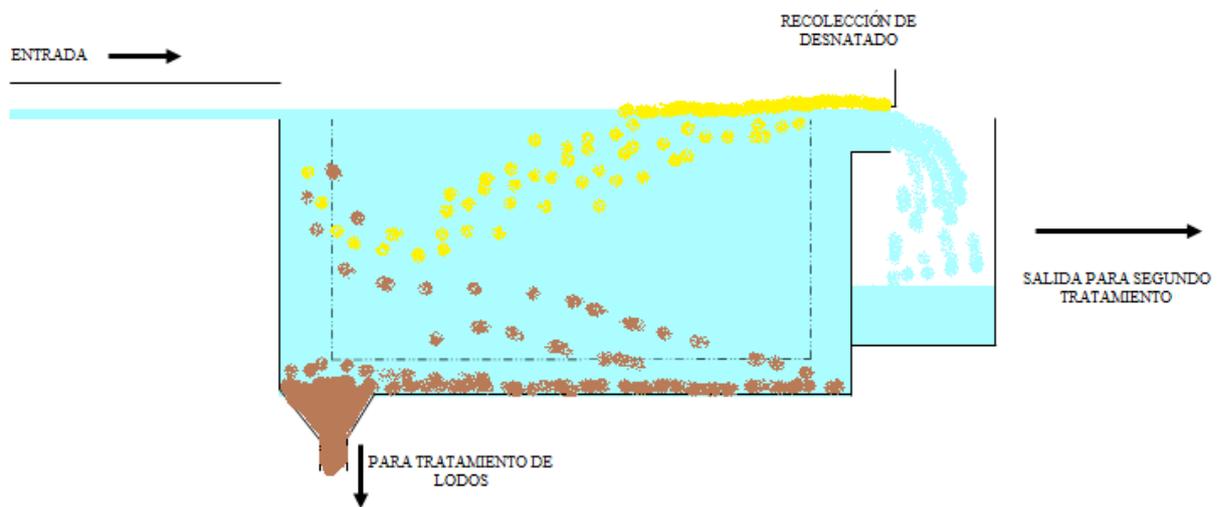


Figura. 4 Proceso de sedimentación.

Fuente: Figura diseñada por el autor con información tomada de (Giorgi et al., 2018)

4.6.3 Flotación por Aire Disuelto (DAF)

El proceso de flotación por aire disuelto es un proceso físico-químico que separa las partículas sólidas y líquidas por medio de la saturación del agua con aire a presión, procedente de una corriente de agua reciclada, donde luego es liberada la presión y así se produce una nube de microburbujas. Los flocúlos que se acumulan en la superficie son conocidos como flotadores y estos son eliminados en forma de lodo. En la Figura. 5 se presenta un sistema de Flotación por Aire Disuelto, allí es donde se unen las burbujas con los sólidos, generando una reducción en la carga de las partículas (Moran, 2018; Toro Equipment, 2018).

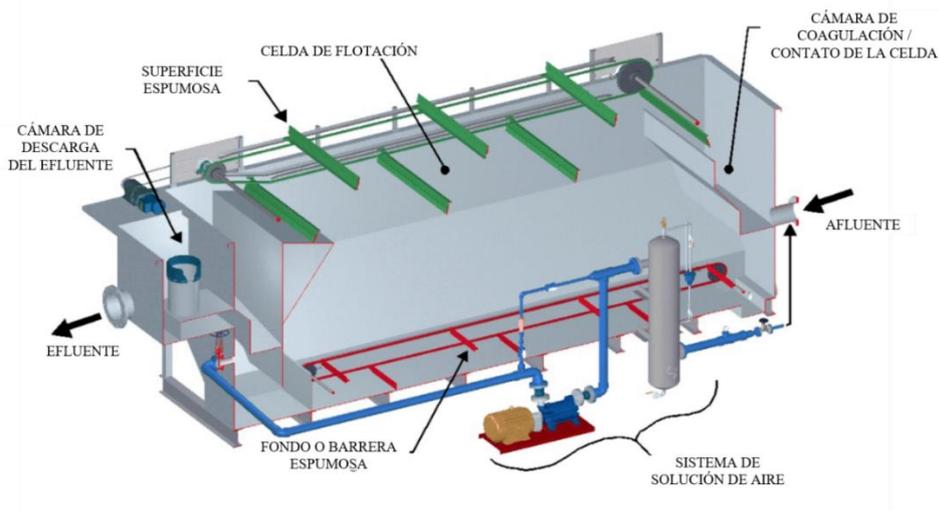
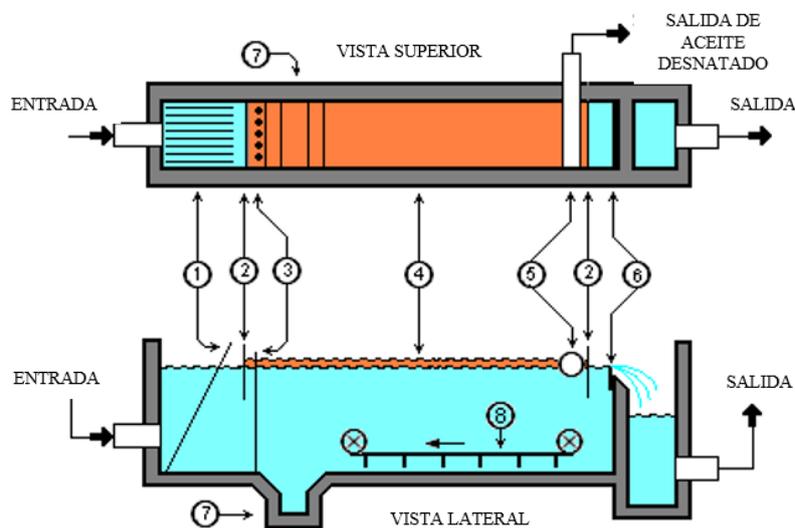


Figura. 5 Sistema de Flotación por Aire Disuelto.

Fuente: Figura modificada por el autor y tomada de (SPENA GROUP, 2016)

4.6.4 Separador API

El Separador API (Figura. 6) es un dispositivo que fue diseñado para separar aceite suspendido y sólidos suspendidos, las aguas residuales tratadas por este sistema son consecuencia de la producción de productos derivados del petróleo. El proceso de operación se basa en el tiempo de retención y la diferencia de densidades (Torres & Gutiérrez, 2017).



1. TRAMPA DE BASURA (VARILLAS INCLINADAS)
2. DEFLECTORES DE RETENCIÓN DE ACEITE
3. DISTRIBUIDORES DE FLUJO (VARILLAS VERTICALES)
4. CAPA DE ACEITE
5. DESNATADOR DE TUBO RANURADO
6. VERTEDERO DE DESBORDAMIENTO AJUSTABLE
7. SUMIDERO DE LODOS
8. RASPADOR DE CADENAS Y TRAÍLLAS

Figura. 6 Sistema de Separador API.

Fuente: Figura modificada por el autor y tomada de (Chemical Engineering Processing, 2021)

4.6.5 Separador CPI

El agua residual pasa por una unidad separadora de placas corrugadas, que actúa como cámara de pre-sedimentación de los sólidos suspendidos y separador de aceite, en esta parte la velocidad del efluente se reduce y se ponen en contacto las gotas de aceite y salen del paquete en flujo ascendente, formándose una capa en la parte superior, así como se muestra en la Figura. 7 (Torres & Gutiérrez, 2017).

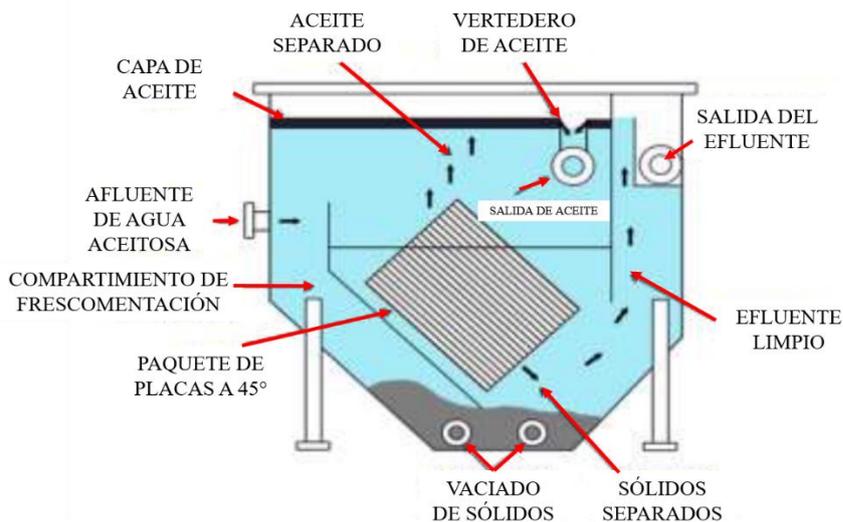


Figura. 7 Sistema de Separador de Placas Corrugadas.

Fuente: Figura modificada por el autor y tomada de (Torres & Gutiérrez, 2017).

4.6.6 Electrocoagulación

La electrocoagulación es un proceso electroquímico que consiste en aplicar una corriente continua a dos electrodos metálicos (ánodo y cátodo) que se encuentran sumergido en el agua residual, donde los cationes (Fe^{2+} o Al^{3+}) se liberan en la solución en el ánodo y el agua se reduce a gas de hidrogeno y OH^- en el cátodo, como se muestra en la Figura. 8. Normalmente las partículas coloidales presentes en el agua residual presentan una carga negativa, desestabilizando los coloides y las partículas al agregar los cationes, generando así la formación de flóculos grandes (Barrera-Díaz et al., 2018). En los procesos de tratamiento de agua residual oleosa, son eficaces para desestabilizar las emulsiones de agua y aceite. Según la teoría de Helmholtz, las gotas de aceite generan una carga negativa y esta está alineadas a la interfaz; por ende, al estar en contacto con un ánodo compatible y una carga eléctrica se genera la adecuada separación (An et al., 2017).

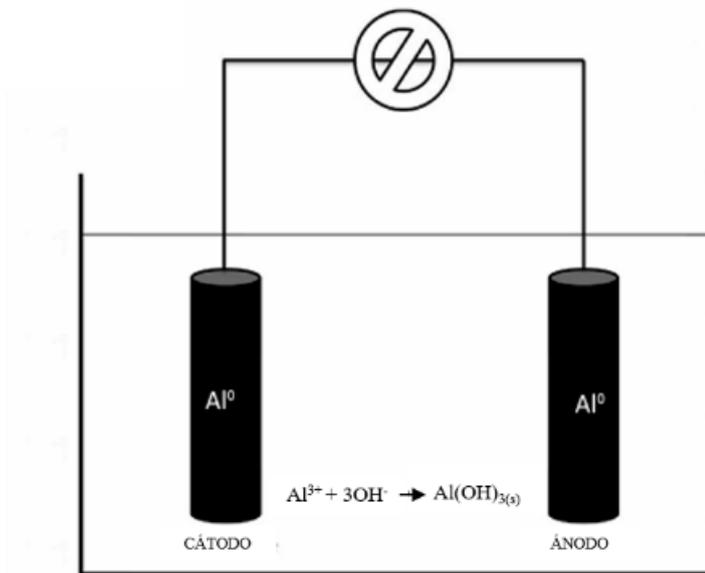


Figura. 8 Sistemas de Electrocoagulación.

Fuente: Figura modificada por el autor y tomada de (Barrera-Díaz et al., 2018)

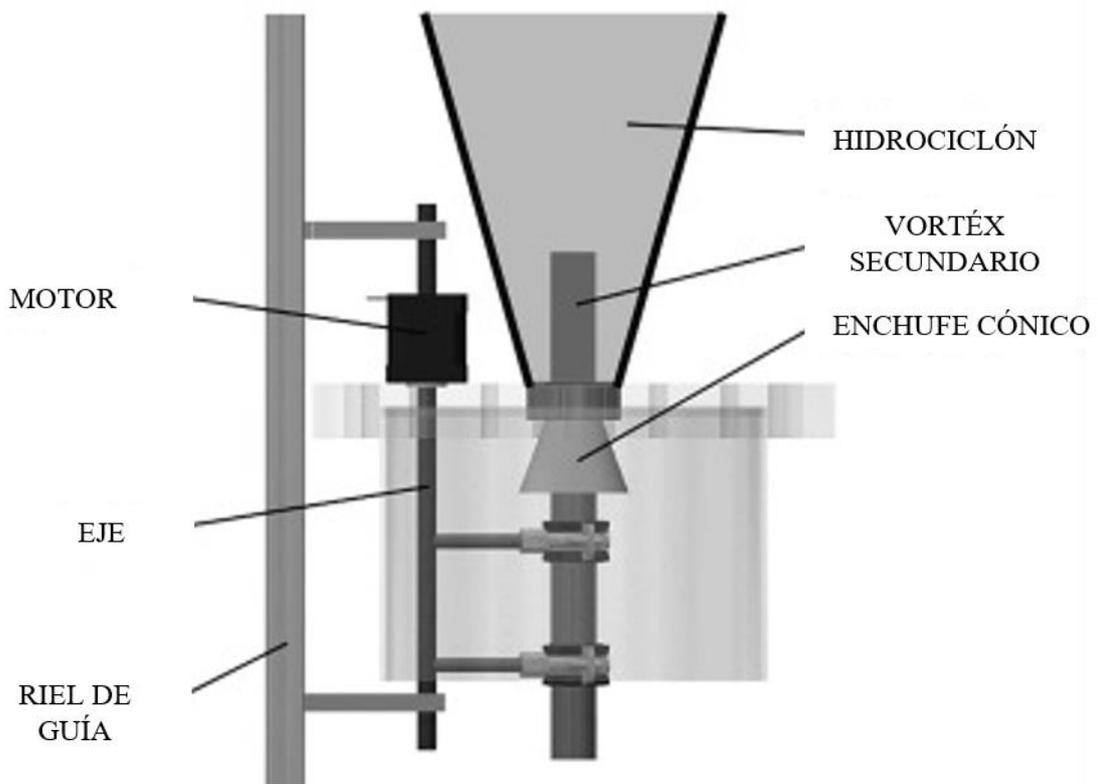


Figura. 9 Sistema de Hidrociclón

Fuente: Figura modificada por el autor y tomada de (Senfter et al., 2021)

4.6.7 Hidrociclón

Los Hidrociclones (Figura. 9) son utilizados en la mayoría de sectores industrias como dispositivos que utilizan la fuerza centrífuga para retirar y remover las partículas de los líquidos; el principio de este proceso se basa en las altas diferencias de densidades. En la aplicación se crea un movimiento de remolino a la entrada y el vórtice se acelera de tal forma que desciende por el cono, el agua se mueve hacia fuera del vórtice y el aceite se mueve hacia el centro. Los sistemas de Hidrociclón requieren un grande espacio, un alto consumo de energía y un alto costo de capital, además de ser susceptible a fallas y tener un costo de mantenimiento elevado debido a sus partes electromecánicas como los engranajes y el motor (An et al., 2017; Senfter et al., 2021).

4.6.8 Filtración por Membrana

El proceso de filtración consiste en el paso de un líquido a través de un medio filtrante, con el fin de eliminar materia no deseada que se encuentra en suspensión, estas se encuentran divididas en diferentes capas para alcanzar a retener las impurezas a nivel celular. Los sistemas de filtración se pueden clasificar según el medio de filtración; los filtros fibrosos son de fibras de vidrio y los de medio suelto son de lechos de material granular como lo es la arena, la grava, el carbón activado granulado y los nanotubos de carbono. Estas membranas deben tener propiedades ideales para un buen rendimiento de proceso, teniendo una distribución uniforme que disminuye las zonas muertas, el mantenimiento y la limpieza es fácil, posee bajo costo, es bastante compacto y tienen baja resistencia tangencial a los fluidos; y pueden ser encontrada como membranas de microfiltración (100-500 kDa), ultrafiltración (20-150 kDa) y nanofiltración (2-20 kDa) (Obotey Ezugbe & Rathilal, 2020; Saravanan et al., 2021; Thekkudan et al., 2017).

La fuerza principal de la tecnología de membrana actúa como un filtro muy específico (Figura. 10), esta es utilizada como alternativa de la floculación, adsorción, destilación, técnicas de purificación y extracción (Lenntech, 2020). Las características principales para que una membrana sea adecuada van en función de su permeabilidad, hidrofilia y resistencia química, entre las más apropiadas encontramos: Polisulfona (PSF), Polietersulfona (PES), Poliacrinitrilo (PAN), Poliamidas (PA) y Polivinilideno Difluoruro (PVDF) (An et al., 2017).

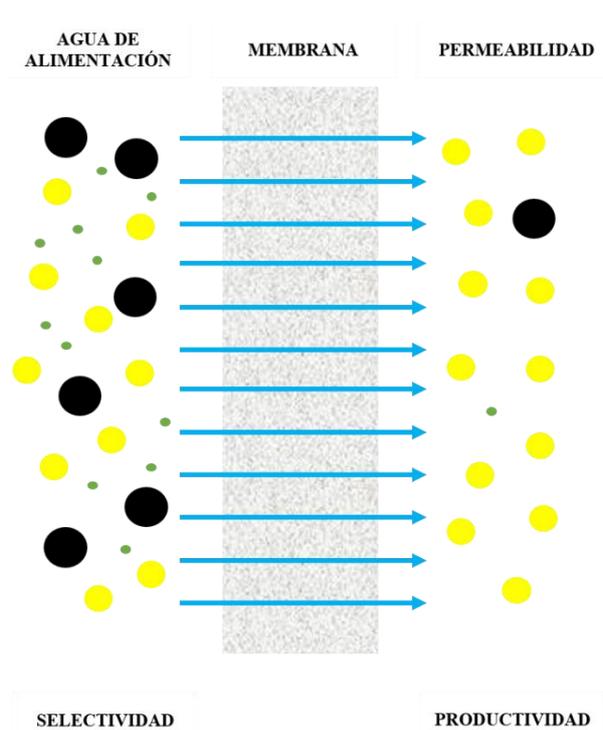


Figura. 10 Proceso de Filtración de Membrana.

Fuente: Figura realizada por el autor con información de (Lenntech, 2020).

4.6.9 Tratamiento Biológico

En los Tratamientos Biológicos se utilizan los metabolismos microbianos (Yu & Han, 2017b), se agregan bacterias y hongos para eliminar compuestos orgánicos y estabilizar compuestos peligrosos que estén presente en las aguas residuales (An et al., 2017). Los procesos más utilizados son la digestión anaeróbica (DA), la digestión aeróbica y la combinación de ambos métodos. La digestión anaeróbica produce metano que sirve como energía renovable y genera una cantidad baja de lodos. La digestión aeróbica es la más utilizada debido a que es menos sensible a los efectos tóxicos y posee una mayor tasa en el crecimiento de los microorganismos, los diferentes sistemas que se utilizan son: los reactores de lodos activados tradicionales, lodos activados por contacto, reactor secuencial por Batch, biorreactor de membrana, entre muchos más. La combinación de ambos métodos (reactor híbrido) aprovecha las ventajas de ambos procesos y crea una eficiencia mayor en la eliminación aceites. En la Figura. 11 se presenta un ejemplo de un proceso de Tratamiento anaeróbico en estanque de oxidación (Ghimire & Wang, 2018; Saravanan et al., 2021).

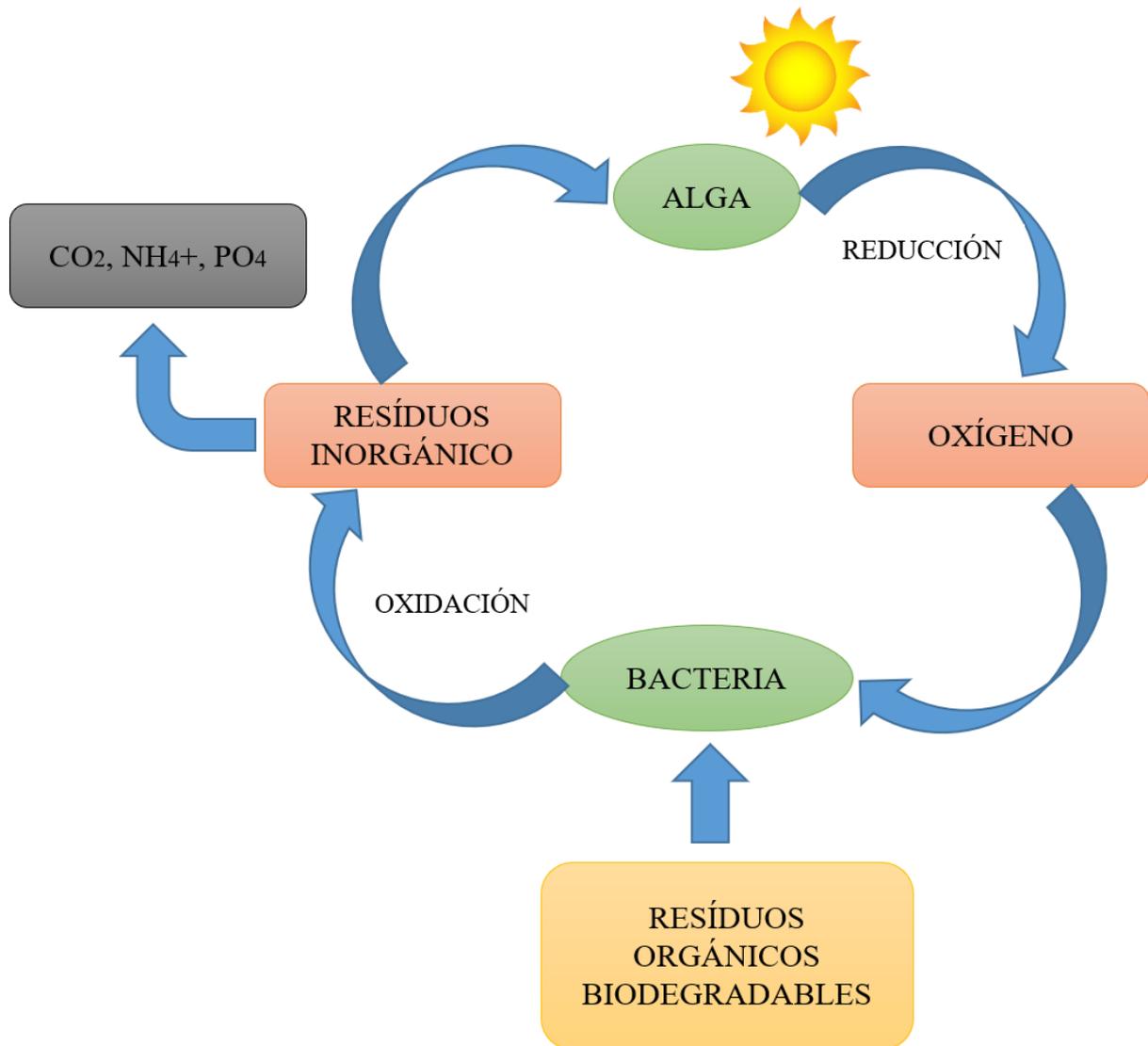


Figura. 11 Tratamiento anaeróbico en estanque de oxidación.

Fuente: Figura realizada por el autor con información de (Saravanan et al., 2021)

5. RESULTADOS Y ANÁLISIS

La adecuada elección de los diferentes métodos de tratamiento de aguas residuales para remover aceites y grasas procedentes de la industria petrolera depende de muchos factores, tales como el grado de remoción, la flexibilidad del método de control, el costo del proceso y la compatibilidad ambiental (P. S. Kumar, 2021; Saravanan et al., 2021; You et al., 2018). En la Tabla 5 se muestran las ventajas y desventajas de cada uno de los métodos hablados anteriormente. Siendo posible observar que cada una de las tecnologías presentan desventajas en función de los costos de mantenimiento, costos de operación y consumo energético y ventajas en que tienen excelentes resultados en la remoción de grasas y aceites. Pero es claro que dependiendo del tipo de resultado deseado es importante realizar un análisis en relación a la purificación del efluente.

Tabla 5 Ventajas y Desventajas de los métodos de separación de agua y aceite.

Fuente: Tabla realizada por el autor

| MÉTODO | VENTAJAS | DESVENTAJAS | REFERENCIAS |
|--|--|--|--|
| Coagulación- Floculación | -Funciona muy bien para la eliminación de partículas finas. - Elimina metales, turbidez y color. -Alta adaptabilidad. | - Presenta múltiples pasos en el proceso. -Puede producir toxicidad si es usado de forma incorrecta. -Tiene alta producción de lodos. -Posee un costo operacional alto. | (Aini Amran & Nor Adibah Mustapha, 2021; Liu et al., 2021; Saravanan et al., 2021) |
| Sedimentación | -No presenta costo energético. -Posee una excelente reproducibilidad. | -Es un proceso selectivo. -Posee falta de precisión. -Ocupa bastante espacio. | (Saravanan et al., 2021) |
| Flotación por Aire Disuelto (DAF) | -Dimensiones del equipo pequeñas. -Bajos costos de instalación. -Excelente rendimiento en suspensión de sólidos superiores y mixtos. -Gran producción de lodos sólidos. | -Consumo alto de energía. -Requiere de reactivos adicionales. -Altos costos de operación y mantenimiento. | (Wang et al., 2016) |
| Separador API | -Son efectivos para fases discretas de aceite y agua. -Los costos de operación y | -No es eficaz para separar los aceites emulsionados del agua. -Ocupa bastante espacio. | (Aini Amran & Nor Adibah Mustapha, 2021) |
| Separador CPI | manutencción son bajos. | | |

| | | | |
|--------------------------------|---|--|--|
| | -Bajo consumo energético. | -Consumo de bastante tiempo en cada operación. | |
| Electrocoagulación | -Fácil operación. - Pequeña ocupación de área. -Alto grado de automatización. | -Ineficiencia en la remoción de DQO. -Condiciones de operación extremas. -Alto costo de operación y mantenimiento. -Alto costo capital. | (Jing et al., 2020) |
| Hidrociclón | -Son más compactos. -No requieren grandes tanques de retención de agua de sentina. -Producen pequeñas cantidades de residuos. -Se puede ejecutar sin operación y supervisión continua en horas de trabajo. | -Utiliza motores de gran potencia. -Requiere mantenimiento frecuente. -Altos costo capital y de mantenimiento. | (Aini Amran & Nor Adibah Mustapha, 2021) |
| Filtración por Membrana | -Poseen alta eficiencia en la remoción de partículas pequeñas, incluyendo bacterias e iones monovalentes. -No requiere productos químicos. -Menos tiempo de operación. | -Alto consumo energético. -Facilidad de ensuciamiento, disminuyendo el rendimiento. -Altos tiempos de inactividad en procesos de limpieza. -Alto costo de operación y mantenimiento. | (Obotey Ezugbe & Rathilal, 2020) |
| Tratamiento Biológico | -Los tratamientos aeróbicos poseen una actividad bastante simple, limita la creación de olores, disminuye la propagación de patógenos y grasas y puede utilizar el microbio más óptimo para el proceso. - Los tratamientos anaeróbicos producen energía renovable y disminuyen la contaminación ambiental. | -Los tratamientos aeróbicos poseen un costo alto de capital y problemas de manutención. -Los tratamientos anaeróbicos poseen un costo alto de capital y produce molestias con los malos olores. | (Saravanan et al., 2021) |

En la Tabla 6 se presentan una comparación de los métodos de remoción de aceites y grasas procedentes de las aguas residuales producidas por la industria petrolera más utilizados en Colombia y sus correspondientes porcentajes de remoción.

Tabla 6 Diferentes métodos y porcentajes de remoción de grasas y aceites de las aguas residuales procedentes de la industria petrolera.

Fuente: Tabla realizada por el autor.

| MÉTODO | PROCESO ESPECÍFICO | REACTIVO | REMOCIÓN DE ACEITES Y GRASAS | REFERENCIAS |
|---|------------------------------------|--|------------------------------|---------------------------|
| Coagulación - Flocculación - Flotación | Flotación con Aire Disuelto | Sulfato de Aluminio y Sintec D50 (Coagulante) con CLR60 (Floculante) | 86,0% | (Díaz et al., 2017) |
| | | PAC (Coagulante) con CLR60 y CS610 (Floculante) | 77,0% | |
| | | FCAPM (Coagulante) | 98% | (Turrís et al., 2011) |
| | | PA (Coagulante) | 79,0% | |
| | | FC (Coagulante) | 99,0% | |
| | | PAPM (Coagulante) | 96,0% | |
| | | Alumina (Coagulante) con CS610 (Floculante) | 98,0% | (Díaz-Díaz et al., 2018) |
| | | PAC 18% (Coagulante) con CS610 (Floculante) | 96,0% | |
| | | PASS (Coagulante) | 93,0% | (Tetteh & Rathilal, 2020) |
| | | PAC-10LB (Coagulante) | 88,0% | |
| | | PFS (Coagulante) | 84,0% | |
| | | Sulfato de Aluminio (Coagulante) | 86,0% | |
| | | - | 73,0% | |
| | | Sulfato de Aluminio (Coagulante) | 99,3% | (Sun et al., 2021) |
| | | Cloruro Férrico (Coagulante) y 4330 (Floculante) | 80% | (Valerio, 2011) |
| | Flotación | - | > 90% | (Yu & Han, 2017b) |
| | Coagulación | Silicato de Zinc con PAC anionica | 99,0% | |
| | | CAX | > 98% | |
| | | Sulfato de Aluminio | 93,0% | (Tetteh & Rathilal, 2020) |
| | | Policloruro de Aluminio | 90,0% | |

| | | | | |
|--------------------------------|---------------------------------|---|--------------|-------------------------------------|
| | | Sulfato de Aluminio, Sulfato Ferroso y filtración | 97,3% | (Sun et al., 2021) |
| Separador Por Gravedad | Separador Api | - | 70,56 % | (Valerio, 2011) |
| | Separador API | - | 60% | (Turrís et al., 2011) |
| | Separador CPI | - | 72 % | |
| Electrocoagulación | | - | 97,4% | (Sun et al., 2021) |
| Hidrociclón | Con Filtración Intensiva | - | 99,1% | (Sun et al., 2021) |
| Filtración por Membrana | Membrana Dinámica | - | 99,0% | (Sun et al., 2021; Yu & Han, 2017b) |
| | Microfiltración | - | 97 - 99 % | |
| Tratamiento Biológico | Digestión Anaeróbica | - | 72 - 88 % | (Ghimire & Wang, 2018) |
| | Digestión Aeróbica | - | 82 - 99,9 % | |
| | Digestión Combinada | - | 86,5 – 98,9% | |

- El proceso de Flotación por Aire Disuelto es uno de los métodos más utilizados recientemente en la industria petrolera, presenta mayor eficacia en la remoción de aceites y grasas en las aguas residuales. Este proceso va de la mano con la coagulación y la floculación, debido a esto los resultados pueden variar conforme a la dosificación (que está en función del tipo de agua a tratar) y tipo de coagulante y floculante que ingrese al proceso.

El proceso sin ningún reactivo proporcionó una remoción del 73%, al agregar diferentes tipos de coagulantes o al agregar coagulantes y floculantes, el porcentaje de remoción aumentó en todos los casos; los reactivos con porcentaje de remoción superior al 99% son los más eficientes, se encontró que solo agregando Sulfato de Aluminio se puede obtener un porcentaje de remoción del 99,3%.

- El proceso de Coagulación presentó excelentes resultados, todos los porcentajes de remoción se encuentran por encima del 90%, obteniendo como mejor solución la mezcla de Silicato de Zinc con PAC amónico, para proporcionar una remoción de aceites y grasas del 99%.

- Los métodos de Separación por Gravedad presentan los resultados más críticos en el proceso de remoción de grasas y aceites de las aguas residuales petroleras. En Colombia se utilizan los separadores API y CPI, para ambos casos los porcentajes de remoción no superaron el 72%, siendo esta menor que los resultados obtenidos por el proceso de Flotación por Aire Disuelto sin ninguna ayuda química.
- La Electro-Coagulación, el Hidrociclón y la Filtración con Membrana son procesos que genera excelentes resultados de remoción de aceites y grasas, cada uno de estos métodos presentó más del 97% de remoción de residuos oleosos. Cabe resaltar que la eficacia de cada uno de estos procesos se relaciona con los diferentes materiales que utiliza, en el caso de la Electrocoagulación, el tipo de material que está echo el electrodo; en el caso de la Filtración con Membrana, el tipo de material que esté echa la membrana. Además del adecuado mantenimiento y cambio de los mismos.
- De forma general se puede deducir que el mejor método para la remoción de aceites y grasas de aguas residuales de la industria petrolera, es la Flotación con Aire Disuelto con Sulfato de Aluminio con coagulante y seguido del Hidrociclón con filtración intensiva.
- Los Sistemas de Filtración por Membrana son procesos que generan excelentes resultados en la remoción de grasas y aceites, poseen bajos costos energético, pero el costo de mantenimiento es mayor, ya que las membranas deben ser limpiadas o cambiadas constantemente.
- Los Hidrociclones también presentan excelentes resultados en el proceso de remoción de grasas y aceites; a pesar de que ahorran espacio y pesan mucho menos que los métodos de separación por gravedad, estos tienen un alto costo de instalación, operación y mantenimiento.
- La Electrocoagulación es un proceso que presenta buenos resultados en la remoción de grasas y aceites, pero a su vez presenta déficits en otras soluciones secundarias como lo es la remoción de DBO soluble. Los costos de operación son menores que los costos

producidos por los procesos convencionales de coagulación debido a que el consumo de coagulante es menor, los equipos utilizados son fáciles de operar, pero genera bastantes gastos en la renovación de los electrodos sacrificados y en consumo de energía eléctrica, siendo finalmente un proceso de mayor costo.

- Los Tratamientos Biológicos presentan resultados aprobables para el proceso de eliminación de aceites en las aguas residuales petroleras, además de que son métodos rentables, muy versátiles y amigables con el medio ambiente. Pero, debido a que se trabaja con microorganismos, estos tienden a ser muy sensibles a los cambios de temperatura, humedad, presión y otras anomalías ambientales; por ende, necesitan un mantenimiento constante y un control riguroso para garantizar el rendimiento del sistema, situación que conlleva a costos de operación mayores.
- Los Separadores por Gravedad son procesos físicos que generan resultados aceptables, pero no favorables, además de ocupar bastante espacio. Los Separadores API son económicos en los procesos ya que funcionan por acción de la gravedad, pero estos requieren de mucho tiempo para sus resultados, además de que el aceite emulsionado no puede ser eliminado, generando pérdidas monetarias en el proceso. Los Separadores CPI requieren menos tiempo de residencia que los API, su porcentaje de remoción es mayor y sus costos equivalen a un 80% de los costos de los API.
- Los Sistemas que utilizan coagulantes y floculantes generan excelentes resultados de remoción de grasas, aceites, materia suspendida y DBO; los costos de operación varía conforme al tipo de reactivo que se utilices y la cantidad que se utilice; la cantidad de coagulante debe ser la óptima, ya que si es muy baja las partículas no se neutralizan totalmente y no se generaran casi flóculos; si la cantidad es muy alta se produce una inversión en las partículas y se generan muchos micro-flóculos de tamaños muy pequeños y los resultados son ineficientes. De todos los reactivos presentados en el documento, el Sulfato de Aluminio es el coagulante más económico y con mejores resultados en la remoción de aceites y grasas en las aguas residuales petroleras.

6. CONCLUSIONES

El cumplimiento de las regulaciones y los estándares de calidad del agua tienen como función la seguridad de la salud humana y del medio ambiente, siendo así de gran importancia la instalación de tratamientos de agua con buenos resultados de calidad; pero estas instalaciones se encuentran limitadas por parámetros de costos de capital, costos operacionales, costos de mantenimiento y espacio de instalación. El proceso de remoción de grasas y aceites en las aguas residuales petroleras es de suma importancia en las Plantas de Tratamiento de Agua Residual, dado que son los encargados de mantener los parámetros de concentraciones solicitadas por las normativas y de eliminar las sustancias oleosas que pueden perjudicar los ecosistemas.

De la gran cantidad de métodos y procesos para la remoción de grasas y aceites de aguas residuales producidas por la industria petrolera, los más comunes y utilizados en Colombia son los Sistemas de Flotación con Aire Disuelto, Separadores API, CPI y Filtración por Membrana.

Los Procesos DAF han demostrado una gran eficacia en la remoción de aceites, grasas y materiales suspendidos en las aguas residuales de la industria petrolera; entre la gran variedad de coagulantes se determinó que los coagulantes inorgánicos como los que poseen Hierro y Aluminio presentan una mayor solución a la problemática. El orden de efectividad de los coagulantes utilizados en el proceso DAF, presentados en el documento es: Sulfato de Aluminio > FC > FCAPM > Alúmina con CS610 > PAPM > PAC 18% > PASS > PAC-10LB > Sulfato de Aluminio y Sintec D50 con CLR60 > PFS > PA > PAC. Adicionalmente, los DAFs presentan costos de capital bajos y sus dimensiones de instalación son pequeñas, haciendo que sea uno de los métodos más viables para la industria petrolera en relación del porcentaje de remoción de grasa y aceite y costo, el mejor resultado de remoción fue dado por el Sistema de Flotación de Aire Disuelto, utilizando el Sulfato de Aluminio como coagulante, obteniendo como resultado una remoción del 99,3%.

Aunque los resultados de los métodos de Hidrociclón, Electrocoagulación y Filtración de Membrana son excelentes en relación al porcentaje de remoción, los costos de instalación, proceso y mantenimientos son muy elevados debido a su alto consumo energético, al alto costo de operación, manutención y capital, convirtiendo los procesos inviables económicamente.

7. RECOMENDACIONES

- ✓ Investigar sobre otras alternativas para las aguas producidas, evitando por completo su reincorporación en los sistemas fluviales, ya que estas jamás se ingresan con un 100% de purificación, ocasionando daños ambientales a largo plazo.
- ✓ Implementar un sistema de energía renovable con el fin de utilizar métodos más amigables con el medio ambiente, como lo es la Electrocoagulación, ya que no utiliza reactivos químicos.
- ✓ Buscar diferentes alternativas para reutilizar los aceites removidos en el tratamiento de agua residual.
- ✓ Validar de forma más profunda los costos de capital, operación y manutención de cada uno de los métodos, con el fin de tener un concepto más claro sobre los gastos requeridos para su adecuado funcionamiento.

8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aini Amran, N., & Nor Adibah Mustapha, S. (2021). Oil–Water Separation Techniques for Bilge Water Treatment. In *Resources of Water*. IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.91409>
- An, C., Huang, G., Yao, Y., & Zhao, S. (2017). Emerging usage of electrocoagulation technology for oil removal from wastewater : A review. *Science of the Total Environment*, 579, 537–556. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.11.062>
- Arockiam JeyaSundar, P. G. S., Ali, A., Guo, di, & Zhang, Z. (2020). Waste treatment approaches for environmental sustainability. In *Microorganisms for Sustainable Environment and Health*. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819001-2.00006-1>
- Barrera-Díaz, C. E., Balderas-Hernández, P., & Bilyeu, B. (2018). Electrocoagulation: Fundamentals and Prospectives. In *Electrochemical Water and Wastewater Treatment* (pp. 61–76). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-813160-2.00003-1>
- Bermeo Garay, M. M. (2016). *Tratamiento De Aguas Residuales : Técnicas convencionales*.
- Bokova, I. (2017). Aguas Residuales: el recurso desaprovechado. *Informe Mundial de Las Naciones Unidas Sobre El Desarrollo de Los Recursos Hídricos*, 3, 123.
- Chemical Engineering Processing. (2021). *API Oil-Water Separator*. <https://chemeng-processing.blogspot.com/2012/08/api-oil-water-separator.html>
- Cooper, P. F. (2018). Historical aspects of wastewater treatment. In *Decentralised Sanitation and Reuse*.
- Díaz, M., Rivas, L., Fernández, D., Salazar, D., & Miller, S. (2017). *Selección de programa químico de tratamiento para aguas residuales oleosas*. 44, 89–100.
- Díaz-Díaz, M. A., Rivas-Trasancos, L., Fernández-Rangel, D., Salazar-Alemán, D., & Miller-Palmer, S. (2018). Oily wastewater treatment by dissolved air floatation. *Centro de Investigación Del Petróleo*, 256–270.
- Ecopetrol S.A. (2020). *Reporte Integrado de Gestión Sostenible*.
- El-nwsany, R. I., Maarouf, I., & Abd el-Aal, W. (2019). Water management as a vital factor for a sustainable school. *Alexandria Engineering Journal*, 58(1), 303–313. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2018.12.012>

- Five barrels of water for one barrel of Oil.* (2020). CNBC. <https://www.cnbc.com/advertorial/2017/11/13/five-barrels-of-water-for-one-barrel-of-oil.html>
- Galeano, Lady, & Ibarra. (2016). *Propuesta de diseño de una planta de tratamiento de agua residual por zanjón de oxidación para el casco urbano del municipio de Velez-Santander.*
- Ghimire, N., & Wang, S. (2018). *Tratamiento biológico de aguas residuales petroquímicas, productos químicos del petróleo: conocimiento reciente.* IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.79655>
- Ghosh, P., & Mukherji, S. (2020). Degradation of carbazole, fluorene, dibenzothiophene and their mixture by *P. aeruginosa* RS1 in petroleum refinery wastewater. *Journal of Water Process Engineering*, 37(101454), 8. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2020.101454>
- Giorgi, S., Reitsma, B. A. H., van Fulpen, H. J. F., Berg, R. W. P., & Bechger, M. (2018). Primary sedimentation as a sustainability measure for newly built municipal wastewater treatment plants: too expensive? *Water Science and Technology*, 78(7), 1597–1602. <https://doi.org/10.2166/wst.2018.440>
- Gomes, I. B., Simões, L. C., & Simões, M. (2018). The effects of emerging environmental contaminants on *Stenotrophomonas maltophilia* isolated from drinking water in planktonic and sessile states. *Science of the Total Environment*, 643, 1348–1356. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.06.263>
- Guerra-Santiesteban, D., & Yparraguirre-Peña, J. L. (2020). Effect of wastewater injection on oil production in a block from Pina oilfield, Cuba. *Minería y Geología, Scielo*, 36(1993 8012), 1–15.
- Gutiérrez Rico, A. P. (2018). *La industria petrolera y el recurso hídrico: la conjunción de una industria ambientalmente sostenible.* 457–489.
- ISO 22447. (2019). *ISO 22447:2019, Industrial wastewater classification.* <https://www.iso.org/obp/ui/fr/#iso:std:iso:22447:ed-1:v1:en>
- Jing, G., Ren, S., Gao, Y., Sun, W., & Gao, Z. (2020). Electrocoagulation: A promising method to treat and reuse mineral processing wastewater with high COD. *Water (Switzerland)*, 12(2). <https://doi.org/10.3390/w12020595>
- João, J. J., Emerick, T., de Filho, U. S., & Nishihora, R. K. (2018). Electrocoagulation-flotation process: Investigation of operational parameters for wastewater treatment from fishery industry. *Química Nova*, 41(2), 163–168. <https://doi.org/10.21577/0100-4042.20170166>

- Kumar, P. S. (2021). Introduction to marine biology. In *Modern Treatment Strategies for Marine Pollution* (pp. 1–10). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-822279-9.00008-7>
- Kumar, S., Klai, N., Kaur, R., Tyagi, R. D., & Surampalli, R. Y. (2019). Oleaginous yeast biomass flocculation using bio flocculant produced in wastewater sludge and transesterification using petroleum diesel as a. *Renewable Energy*, *131*, 217–228. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.06.066>
- Lazcano Carreño, C. (2016). *Biología Ambiental de Aguas y Aguas Residuales* (Segunda Ed). Ecoe Ediciones Ltda.
- Lenntech. (2018). *History Water Treatment*. Lenntech. <https://www.lenntech.com/history-water-treatment.htm>
- Lenntech. (2020). *Tecnología de membrana*. <https://www.lenntech.es/tecnologia-de-membrana.htm>
- Liu, Y., Lu, H., Li, Y., Xu, H., Pan, Z., Dai, P., Wang, H., & Yang, Q. (2021). A review of treatment technologies for produced water in offshore oil and gas fields. *Science of The Total Environment*, *775*. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.145485>
- Mesa, S. L., Orjuela, J. M., Ortega, A. T., & Sandoval, J. A. (2018). *Revisión del panorama actual del manejo de agua de producción en la industria petrolera colombiana*. *21*(1), 87–98.
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, C. (2015). *Resolución 631 de 2015* (p. 93).
- Mojica, J., & Romero, J. (2021). *Inicia un nuevo auge Petrolero*.
- Moran, S. (2018). Chapter 4- Engineering science of water treatment unit operations. *An Applied Guide to Water and Effluent Treatment Plant Design*, *7*(811309), 39–51. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-12-811309-7.00004-7>
- Neder, R., Aguirre, V., Rubín, D., Eveling, P., & Cejas, G. (2020). *Model of the Use and Production of Water in the Gulf of San Jorge Basin*. <https://doi.org/10.1306/80713Neder2020>
- Obotey Ezugbe, E., & Rathilal, S. (2020). Membrane Technologies in Wastewater Treatment: A Review. *Membranes*, *10*(5). <https://doi.org/10.3390/membranes10050089>
- Olajire, A. A. (2020). Recent advances on the treatment technology of oil and gas produced water for sustainable energy industry-mechanistic aspects and process chemistry perspectives. *Chemical Engineering Journal Advances*, *4*, 100049. <https://doi.org/10.1016/j.ceja.2020.100049>

- OMS. (2006). *Guías para la calidad del agua potable* (Tercera Ed).
- Prada R, A. F. (2021). *Revisión de las Tecnologías para Tratamiento de Aguas de Producción Petrolera para su aprovechamiento en el riego de cultivos*.
- PSC. (2021). *Refinería O Tratamiento De Agua Residual Petroquímica*. PSC. <https://www.pscengineering.com/task-refinery-wastewater-treatment-es.php>
- Saleh, I. A., Zouari, N., & Al-ghouti, M. A. (2020). Removal of pesticides from water and wastewater : Chemical , physical and biological treatment approaches. *Environmental Technology & Innovation*, 19(101026), 22. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2020.101026>
- Saravanan, A., Senthil Kumar, P., Jeevanantham, S., Karishma, S., Tajsabreen, B., Yaashikaa, P. R., & Reshma, B. (2021). Effective water/wastewater treatment methodologies for toxic pollutants removal: Processes and applications towards sustainable development. *Chemosphere*, 280, 130595. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.130595>
- Senfter, T., Fritsch, L., Berger, M., Kofler, T., Mayerl, C., Pillei, M., & Kraxner, M. (2021). Sludge thickening in a wastewater treatment plant using a modified hydrocyclone. *Carbon Resources Conversion*, 4, 132–141. <https://doi.org/10.1016/j.crcon.2021.03.001>
- Singh, B., & Kumar, P. (2020). Pre-treatment of petroleum refinery wastewater by coagulation and flocculation using mixed coagulant: Optimization of process parameters using response surface methodology (RSM). *Journal of Water Process Engineering*, 36(101317), 17. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2020.101317>
- SPENA GROUP. (2016). *Tratamiento Primario del Agua y Aguas Residuales- Sistema de Flotación*. spenagroup.com/tratamiento-primario-del-agua-aguas-residuales-sistema-flotacion/
- Sun, Y., Liu, Y., Chen, J., Huang, Y., Lu, H., Yuan, W., Yang, Q., Hu, J., Yu, B., Wang, D., Xu, W., & Wang, H. (2021). Physical pretreatment of petroleum refinery wastewater instead of chemicals addition for collaborative removal of oil and suspended solids. *Journal of Cleaner Production*, 278, 123821. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123821>
- Tetteh, E., & Rathilal, S. (2020). Evaluation of different polymeric coagulants for the treatment of oil refinery wastewater. *Cogent Engineering*, 7(1785756), 16. <https://doi.org/10.1080/23311916.2020.1785756>
- Thekkudan, V. N., Vaidyanathan, V. K., Ponnusamy, S. K., Charles, C., Sundar, S., Vishnu, D., Anbalagan, S., Vaithyanathan, V. K., & Subramanian, S. (2017). Review on

- nanoadsorbents: a solution for heavy metal removal from wastewater. *IET Nanobiotechnology*, 11(3), 213–224. <https://doi.org/10.1049/iet-nbt.2015.0114>
- Toro Equipment. (2018, November). *Dissolved air flotation (DAF)*. <https://toroequipment.com/what-is-dissolved-air-flotation/>
- Torres, K., & Gutiérrez, M. (2017). Estado del Arte de las Tecnologías más utilizadas en las refinerías de América para el Tratamiento de Aguas Residuales. *Universidad de San Buenaventura*, 15.
- Turris, A. de, Yabroudi, S. C., Valbuena, B., Gutiérrez, C., Cárdenas, C., Herrera, L., & Rojas, C. (2011). Tratamiento de Aguas de Producción por Flotación con Aire Disuelto. *Interciencia*, 36(3), 211–218.
- Valerio, L. (2011). *Ingeniería Básica Ambiental para el Diseño de Mejoras del Sistema de Tratamiento de Aguas Residuales de la Refinería de RECOPE S.A en Moín-Limón*.
- Vasistha, P., & Ganguly, R. (2020). Water quality assessment of natural lakes and its importance : An overview. *Materials Today: Proceedings*. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.02.092>
- Wang, Y., Liu, B., Zhang, K., Li, M., Jia, R., Song, W., & Li, J. (2016). Construction and operation characteristics of countercurrent-cocurrent dissolved air flotation. *Huagong Xuebao/CIESC Journal*, 67(12), 5252–5258. <https://doi.org/10.11949/j.issn.0438-1157.20160917>
- You, Z., Xu, H., Sun, Y., Zhang, S., & Zhang, L. (2018). Efficient treatment of emulsified petroleum wastewater using the coagulation-flotation process. *Avances RSC*, 8(207890), 40639–40649. <https://doi.org/https://doi.org/10.1039/C8RA06565A>
- Yu, L., & Han, M. (2017a). A review of treating oily wastewater. *Arabian Journal Of Chemistry*, 10. <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2013.07.020>
- Yu, L., & Han, M. (2017b). *A review of treating oily wastewater*. <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2013.07.020>