



EDUCACIÓN

SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA



TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO



**TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO
Instituto Tecnológico de Minatitlán**

**“ANÁLISIS DE MEJORA EN EL TRATAMIENTO DE
EFLUENTE DE AGUA Y OLEOSOS POR PROCESO
QUÍMICO”**

TESIS PROFESIONAL

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
INGENIERA QUÍMICA**

PRESENTA:

Tania Guadalupe García Tadeo



MINATITLÁN, VER

MAYO DE 2022



Instituto Tecnológico de Minatitlán
División de Estudios Profesionales

COORDINACIÓN DE TITULACIÓN
OFICIO NUM. 013/2022

ASUNTO: AUTORIZACIÓN DE IMPRESIÓN DE
TRABAJO PROFESIONAL

Minatitlán, Veracruz, 17 DE MAYO DEL 2022

C. TANIA GUADALUPE GARCIA TADEO
PASANTE DE LA CARRERA DE INGENIERÍA QUÍMICA
PRESENTE:

Después de haber satisfecho los requisitos establecidos en el procedimiento académico para obtener el título en los Institutos Tecnológicos y de conformidad con la H. Comisión Revisora, me es grato autorizar la impresión de su TRABAJO PROFESIONAL por la opción de TESIS PROFESIONAL.

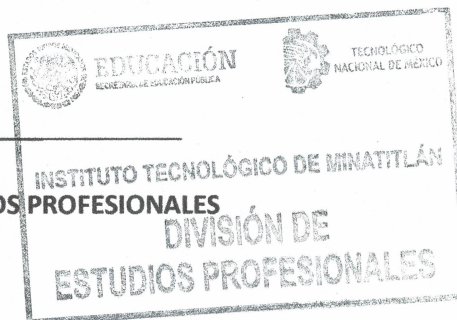
**“ANÁLISIS DE MEJORA EN EL TRATAMIENTO DE EFLUENTE DE AGUA Y OLEOSOS
POR PROCESO QUÍMICO”**

Así mismo se le exhorta a seguir superándose Académicamente y poner en alto el nombre de la Institución.

ATENTAMENTE

*Excelencia en Educación Tecnológica-
Por la Independencia Tecnológica de México®*


LIC. SANDRA LUZ CRUZ ROMÁN
JEFA DE LA DIVISIÓN DE ESTUDIOS PROFESIONALES



AGRADECIMIENTO

A Dios por obsequiarnos el valioso don de la vida entregándome al cuidado de dos ángeles que son nuestros padres.

A nuestros padres quienes nunca terminaremos de agradecer su infinito amor, apoyo, consejos, comprensión y algo muy importante por inculcarnos los valores más hermosos de la vida: Amor, Respeto, Honestidad y Dignidad.

A nuestros hermanos gracias por su amor y el infinito apoyo que siempre nos han dado, pero sobre todo por ser nuestros hermanos.

Tania Guadalupe García Tadeo

ÍNDICE

CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN	9
1.1. REALIDAD PROBLEMÁTICA	9
1.2. ANTECEDENTES	9
1.3. FORMULACION DEL PROBLEMA	11
1.4. HIPOTESIS	11
1.5. OBJETIVOS	11
1.6. JUSTIFICACION	12
CAPÍTULO II. MARCO TEORICO Y CONCEPTUAL	13
2.1. ORIGEN Y LOCALIZACIÓN DEL PETRÓLEO	13
2.1.1. Exploración de petróleo	14
2.1.2. Trampas de petróleo	16
2.2. USO DEL AGUA EN LOS PROCESOS DE REFINACIÓN	16
2.3. ABASTECIMIENTO DE AGUA	18
2.4. PRINCIPALES CONTAMINANTES EN LA INDUSTRIA DE LA REFINACIÓN	18
2.5. TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES	19
2.6. NORMATIVIDAD EN MATERIA DE DESCARGA DE AGUA RESIDUAL	23
2.7. PARÁMETROS EN EL USO DEL AGUA	25
2.8. ÍNDICES ESPECÍFICOS	28
2.9. COMPARACIÓN CON OTROS ESTUDIOS	30
CAPÍTULO III. MATERIALES Y MÉTODOS	32
3.1. PROCESO DE COAGULACIÓN - FLOCULACIÓN	32
3.2. COLOIDES HIDROFÓBICOS	34
3.3. COLOIDES HIDROFÍLICOS	34
3.4. MEDICIÓN DE LA CONCENTRACIÓN COLOIDAL	35
3.5. SISTEMA DE DESESTABILIZACIÓN	35
3.5.1. Neutralización de la carga	36
3.5.2. Adsorción	37

3.5.3.	Desestabilización de las suspensiones por coagulación	38
3.5.4.	Desestabilización de la suspensión por floculación	39
3.6.	CREACIÓN DEL FLÓCULO	40
3.7.	CINÉTICA DEL CRECIMIENTO DEL FLÓCULO	42
3.8.	CONSISTENCIA DE LOS FLÓCULOS.....	43
3.9.	EFICIENCIA DE LA COAGULACIÓN Y LA FLOCULACIÓN	44
3.10.	PARÁMETROS QUE TIENEN UNA INFLUENCIA EN LA EFICIENCIA DE COAGULACIÓN Y FLOCULACIÓN	45
3.11.	INFLUENCIA DE LAS PARTÍCULAS	45
3.12.	INFLUENCIA DE LOS POLÍMEROS	46
3.13.	INFLUENCIA DE UNA MEZCLA DE POLÍMEROS EN SOLUCIÓN	48
3.14.	INFLUENCIA DEL pH Y LA TEMPERATURA EN LA SOLUCIÓN	49
3.15.	INFLUENCIA DE LA NATURALEZA ORGÁNICA EN LA SOLUCIÓN	49
3.16.	PRINCIPALES PARÁMETROS NORMALMENTE USADOS PARA CARACTERIZAR POLÍMEROS.....	50
 CAPÍTULO IV. MÉTODOS Y TÉCNICAS		52
4.1.	SEPARACIÓN DE GRASAS Y ACEITES.....	52
4.2.	EQUIPOS UTILIZADOS PARA LA SEPARACIÓN DE GRASAS Y ACEITES	53
4.3.	RESIDUOS GENERADOS	53
4.4.	SEPARADORES API	54
4.5.	TRAMPAS DE ACEITE	55
4.6.	SEPARADORES DE PLACAS	56
4.7.	TANQUES GRAVIMÉTRICOS	57
 CAPÍTULO V. RESULTADOS		60
5.1.	DISCUSIÓN DE RESULTADOS	78
 CONCLUSIONES		79
BIBLIOGRAFÍA		80

INDICE DE TABLAS

Tabla No. 1. Proceso de tratamiento de aguas residuales empleadas en la industria de refinación en México. Fuente: PEMEX, 2021.	22
Tabla No. 2. Eficiencias de remoción de contaminantes en los procesos de tratamiento en una refinería. Fuente: PEMEX, 2021.....	22
Tabla No. 3. Operaciones unitarias de tratamiento de efluentes en refinerías. Fuente: PEMEX, 2021.....	23
Tabla No. 4. Límite máximo permisible (promedio diario). Fuente: SEMARNAT, 2021.	24
Tabla No. 5. Producción diaria del sistema de refinación. Fuente: PEMEX, 2021. ...	25
Tabla No. 6. Calidad del agua residual de la industria de refinación. Fuente: PEMEX, 2021.....	26
Tabla No. 7. Volumen de descarga y carga de contaminantes. Fuente: PEMEX, 2021.	26
Tabla No. 8. Industria de refinación, parámetros de uso del agua. Fuente: PEMEX, 2021.....	26
Tabla No. 9. Índices específicos de uso del agua en la industria de refinación. Fuente: PEMEX, 2021.....	28
Tabla No. 10. Industria de refinación, parámetros de uso del agua. Fuente: PEMEX, 2021.....	29
Tabla No. 11. Comparación de índices específicos de uso del agua ($m^3/1000bbl$). Fuente: IMTA, 2019.	30
Tabla No. 12. Tipos de flóculos resultantes de diversos procesos de separación. Fuente: Cárdenas, 2015.....	45
Tabla No. 13. Equipos utilizados para la separación de grasas y aceites. Fuente: PEMEX, 2021.....	53
Tabla No. 14. Características del agua establecida en la Refinería y límites máximos permisibles de acuerdo con la NOM-001-SEMARNAT-2021.....	60
Tabla No. 15. Capacidad de alimentación en cada Separador API. Fuente: Propio, 2021.....	65
Tabla No. 16. Corrientes de entrada. Fuente: Propio, 2021.....	66

Tabla No. 17. Aceites recuperados. Fuente: Propio, 2021.....	66
Tabla No. 18. Lodos. Fuente: Propio, 2021.....	67
Tabla No. 19. Especificaciones de los efluentes de una refinería. Fuente: PEMEX, 2021.....	70
Tabla No. 20. Resultados de la aplicación del Agente Coagulante. Fuente: Propia, 2021.....	72
Tabla No. 21. Resultados de la aplicación del Agente Floculante. Fuente: Propia, 2021.....	73
Tabla No. 22. Funcionalidad del Agente Coagulante a diferentes valores de pH. Fuente: Propia, 2021.....	73
Tabla No. 23. Funcionalidad del Agente Floculante a diferentes valores de pH. Fuente: Propia, 2021.....	74
Tabla No. 24. Sistema 1, parámetros de control en el agua clarificada. Fuente: Propia, 2021.....	75
Tabla No. 25. Sistema 2, parámetros de control en el agua clarificada. Fuente: Propia, 2021.....	75
Tabla No. 26. Sistema 3, parámetros de control de agua clarificada. Fuente: Propia, 2021.....	76
Tabla No. 27. Optimización de las dosificaciones. Fuente: Propia, 2021.....	77

INDICE DE FIGURAS

Figura No. 1. Tratamiento básico de agua. Fuente: EPA, 2016.	32
Figura No. 2. Equilibrio de capas en una partícula coloidal. Fuente: EPA, 2016.....	34
Figura No. 3. Isotherma de Adsorción. Fuente: Van Der Waals, 2010.....	37
Figura No. 4. Coagulación usando polímero de bajo peso molecular. Fuente: Cárdenas, 2015.....	39
Figura No. 5. Separación de una partícula por un polímero. Fuente: Cárdenas, 2015.	40
Figura No. 6. Enlace entre dos partículas. Fuente: Cárdenas, 2015.....	41
Figura No. 7. Flóculo duro por doble floculación. Fuente: Cárdenas, 2015.....	44
Figura No. 8. Efecto de filtro. Fuente: Cárdenas, 2015.	47

Figura No. 9. Esquema general de un separador tipo API. Fuente: IMP, 2016.....	55
Figura No. 10. Esquema general de un separados tipo API. Fuente: Cárdenas, 2015.	55
Figura No. 11. Trampa de aceite. Fuente: IMP, 2016.	56
Figura No. 12. Separador de placas. Fuente: Cárdenas, 2015.	57
Figura No. 13. Puntos de muestreo en el Sistema 1. Fuente: Popio, 2021.....	63
Figura No. 14. Puntos de muestreo en el Sistema 2. Fuente: Propio, 2021.....	64
Figura No. 15. Puntos de muestreo en el Sistema 3. Fuente: Propio, 2021.....	65
Figura No. 16. Puntos de muestreo en el Sistema 1. Fuente: Propio, 2021.....	69
Figura No. 17. Puntos de muestreo en el Sistema 2. Fuente: Propio, 2021.....	69
Figura No. 18. Puntos de muestreo en el Sistema 3. Fuente: Propia, 2021.....	70

RESUMEN

En la presente tesis se hace estudio del proceso de tratamiento de efluentes en una planta de refinación de crudo de petróleo. Al tratarse la refinación de un proceso continuo que maneja gran cantidad de materia prima, se presentan varios problemas en cuanto a uso de recursos como agua, energía y crudo de petróleo, lo cual se manifiesta finalmente en costos elevados de operación y de disposición de residuos.

El objetivo general es mejorar el proceso de tratamiento de efluentes de agua y oleosos. Mediante la utilización de la herramienta de procesos químicos, la cual se busca un uso de recursos de mayor eficiencia y una reducción en la generación de residuos, aplicando estrategias de buen mantenimiento, cambio tecnológico, entre otras. Se describe el proceso a analizar, de tratamiento de efluentes, así como el proceso principal de refinación del cual se derivan dichos efluentes.

Una vez hecho el diagnóstico, se procede a proponer las mejoras siguiendo la secuencia del proceso. La primera propuesta consiste automatizar la operación de separación de agua del crudo con un tratamiento complementario, ello para poder devolver solo petróleo a la refinación. La siguiente propuesta trata de utilizar cubiertas para los separadores API y CPI y así evitar la contaminación del aire y la pérdida de materia prima por evaporación al estar en contacto con el ambiente.

Otra propuesta consiste en alcanzar una mayor sequedad del lodo residual mediante el secado ambiental adicional. La última mejora propone un tratamiento terciario del agua residual para su reutilización en el proceso principal. Con las propuestas de mejora definidas se realiza una evaluación económica, la cual demuestra que además de los beneficios ambientales, se puede lograr recuperar la inversión inicial mediante los ahorros generados.

CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN

1.1. REALIDAD PROBLEMÁTICA

Uno de los mayores descubrimientos hechos por el hombre ha sido sin duda el recurso natural no renovable denominado petróleo, este invaluable hallazgo dio origen a una gran industria de transformación que es la Industria de Refinación del Petróleo, sin embargo, este gran proceso tiene una relación muy estrecha y vital con otro recurso natural no renovable que es el agua.

La disponibilidad de este recurso es cada vez menor a nivel mundial debido a la contaminación de los cuerpos receptores de agua ocasionados por las descargas contaminadas derivadas de los diferentes procesos industriales. Es por ello la importancia del desarrollo de productos amigables al ambiente, así como la mejora u optimización de los diversos procesos que actualmente se aplican al tratamiento de aguas.

Con esta visión se requiere que la industria petrolera mejore la reinyección de agua congénita en los pozos, disminuya la generación de efluentes y que los que ya se tienen sean tratados en sitio para su reincorporación al proceso, minimizando su descarga a los mantos acuíferos y con ello también minimizar sus efectos nocivos al ambiente.

1.2. ANTECEDENTES

Una trampa de petróleo es una estructura que presenta la roca almacén que favorece la acumulación del petróleo. Estas trampas, son lugares formados por rocas porosas rodeadas por capas impermeables. La disposición de éstas puede ser:

- Estratigráfica: se forman generalmente por cambios en los espesores de las capas.
- Estructurales: originadas por la presencia de fallas y plegamientos.

El petróleo siempre está presente en estructuras de tipo sedimentaria. Estas rocas se forman por la depositación de los minerales en ambientes acuosos (lacustres o marinos), se caracterizan por su disposición en estratos superpuestos, por la frecuente presencia de animales o vegetales fósiles y además las condiciones de sedimentación hicieron que sus granos fueran sometidos a erosión y al arrastre que los hace redondeados proporcionando mejores condiciones de porosidad.

Los principales tipos de rocas sedimentarias son:

- Terrígenas: Areniscas y arcillas.
- Marinas: Calizas y Dolomitas
- Evaporitas: Anhidritas y yeso.

Los principales son: la arcilla, principalmente la illita y la caolinita, el cuarzo y la calcita. Otros minerales son los feldespatos, de sodio y calcio principalmente, la dolomita, el yeso, la anhidrita y la halita. En los conglomerados la composición es cualquiera, dominando el cuarzo. En las areniscas, si es orto cuarcita, domina el cuarzo, si es grauvaca habrá fragmentos de roca, cuarzo y arcilla y si es arcosa feldespatos, cuarzos, micas y carbonato cálcico.

En las arcillolitas habrá hidróxidos de hierro y aluminio, en las lateritas; caolinita, en los caolines y arcilla, cuarzo, feldespatos y calcita, en los loess (material sedimentario, arcilloso y calcáreo transportado por el viento que forma suelos permeables y muy fértiles. En las margas se tendrá carbonato cálcico y arcilla, en travertinos, tobas, calizas, y caliches, habrá carbonato cálcico, como también en las calizas de bacterias y algas; en las cretas y calizas, conchíferas y coralinas; en las dolomías y calizas dolomíticas, formadas por procesos meta somáticos, habrá calcita y dolomita.

En el sílex, pedernal, gliceritas, trípoli, jaspe y lidita, se tiene sílice coloidal y criptocristalina. En los yesos, sal gema y otras evaporitas, habrá sulfato cálcico y

cloruros de sodio, potasio y magnesio. En las sideríticas y pantanosas, que son ferruginosas, carbonato, óxidos e hidróxidos de hierro. En las fosforitas y guano, fosfatos de calcio y otros elementos.

1.3. FORMULACION DEL PROBLEMA

¿El análisis de mejoramiento del tratamiento de efluente de agua y oleoso por proceso químico ayudara a la recuperación del fluido vital natural en una refinería?

1.4. HIPOTESIS

El análisis de mejoramiento del tratamiento de efluente de agua y oleoso por proceso químico ayudo a la recuperación del fluido vital natural en una refinería.

1.5. OBJETIVOS

General

Obtener una propuesta de mejoramiento en el proceso de tratamiento que permita optimizar el uso del agua en una refinería.

Específicos

- Establecer el diagnóstico de consumo de agua en la refinería objeto de estudio.
- Realizar las pruebas correspondientes al uso de productos coagulantes y floculantes que permitan la mejora en el proceso de separación de hidrocarburos.
- Elaborar la propuesta de tratamiento y comprobar su eficiencia en planta

1.6. JUSTIFICACION

Al desarrollarse este proyecto, se contribuiría a la generación de empleo debido al requerimiento de personal para su instalación y operación. La instalación de la planta de tratamiento de efluentes conllevará a un ahorro de una Refinería al evitar sanciones producto de no cumplir con la normativa legal vigente.

El cuidado del medio ambiente es un tema muy importante, y específicamente la contaminación del mar, el cual, es el mayor receptor de los efluentes industriales líquidos generados por el hombre; por lo tanto, con el desarrollo de este proyecto se reducirá la carga contaminante de los efluentes de una Refinería de petróleo a estar por debajo de los límites máximos permisibles establecidos por la normativa vigente, reduciendo de esta manera el impacto ambiental de estos.

El desarrollo del proyecto permitirá el empleo de una alternativa tecnológicamente viable, que mitigue la contaminación de la Refinería al cuerpo receptor y cumpla con la normativa legal vigente.

CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO Y CONCEPTUAL

2.1. ORIGEN Y LOCALIZACIÓN DEL PETRÓLEO

El petróleo crudo resulta de la descomposición de organismos bajo ciertas condiciones de temperatura y presión, procesos que se dieron hace millones de años en épocas geológicas conocidas como Jurásico, Cretácico y el Terciario. El petróleo así formado migró hacia las cuencas donde actualmente se le encuentra ligado a cierto tipo de rocas lo que hace factible su localización.

El producto es un compuesto químico complejo en el que coexisten partes sólidas, líquidas y gaseosas. Lo forman, por una parte, unos compuestos denominados hidrocarburos, formados por átomos de carbono e hidrógeno y, por otra, pequeñas proporciones de nitrógeno, azufre, oxígeno y algunos metales. Se presenta de forma natural en depósitos de roca sedimentaria y sólo en lugares en los que hubo mar.

Su color es variable, entre el ámbar y el negro y el significado etimológico de la palabra petróleo es aceite de piedra, por tener la textura de un aceite y encontrarse en yacimientos de roca sedimentaria.

Para descubrir los lugares donde existen yacimientos de petróleo no existe un método científico exacto, sino que es preciso realizar multitud de tareas previas de estudio del terreno. Los métodos empleados, dependiendo del tipo de terreno, serán geológicos o geofísicos.

El primer objetivo es encontrar una roca que se haya formado en un medio propicio para la existencia del petróleo, es decir, suficientemente porosa y con la estructura geológica de estratos adecuada para que puedan existir bolsas de petróleo. Para todo ello, se realizan estudios geológicos de la superficie, se recogen muestras de terreno, se realizan estudios por Rayos X, se perfora para estudiar los estratos y,

finalmente, con todos esos datos se realiza la carta geológica de la región que se estudia.

Cuando el terreno no presenta una estructura igual en su superficie respecto al subsuelo (por ejemplo, en desiertos, en selvas o en zonas pantanosas), los métodos geológicos de estudio de la superficie no resultan útiles, por lo cual hay que emplear la Geofísica, ciencia que estudia las características del subsuelo sin tener en cuenta las de la superficie.

2.1.1. Exploración de petróleo

La búsqueda de petróleo y su posterior explotación requiere de grandes inversiones por lo que las compañías petroleras promueven la investigación, así como el desarrollo tecnológico, lo que permite disminuir el riesgo e incrementar la posibilidad de éxito en la exploración. En este proceso las herramientas más usadas como se mencionó anteriormente provienen de las disciplinas:

- Geología superficial
- Gravimetría
- Sismología bi y tridimensional
- Geoquímica

Métodos sísmicos de prospección: aún no están muy depurados, pero con las nuevas tecnologías se puede llegar a delimitar bolsas de petróleo de diámetros de tan sólo 10 m y es un método cada vez más utilizado, las técnicas de prospección sísmica, que estudian las ondas de sonido, su reflexión y su refracción, generan datos que permiten determinar la composición de las rocas del subsuelo. Así, mediante una explosión, se crea artificialmente una onda sísmica que atraviesa diversos terrenos, que es refractada (desviada) por algunos tipos de roca y que es reflejada (devuelta) por otros y todo ello a diversas velocidades.

Estas ondas son medidas en la superficie por sismógrafos. Pero, con todo, la presencia de petróleo no está demostrada hasta que no se procede a la perforación de un pozo.

Aparatos como el gravímetro permiten estudiar las rocas que hay en el subsuelo. Este aparato mide las diferencias de la fuerza de la gravedad en las diferentes zonas de suelo, lo que permite determinar qué tipo de roca existe en el subsuelo. Con los datos obtenidos se elabora un “mapa” del subsuelo que permitirá determinar en qué zonas es más probable que pueda existir petróleo.

También se emplea el magnetómetro, aparato que detecta la disposición interna de los estratos y de los tipos de roca gracias al estudio de los campos magnéticos que se crean.

- Diagrafías: son un método alternativo que produce gráficas de datos que indican de forma indirecta, alguna propiedad de los materiales.
- Microgravedad: es empleada para determinar la densidad de los cuerpos atravesados por el sondeo.
- Electricidad: de las propiedades eléctricas de las rocas, las más usuales a la hora de hacer geofísica son:
 - a. Medida del potencial instantáneo.
 - b. Medida de la resistividad de la roca (permeabilidad eléctrica).
- Sonido: mediante el cálculo de la velocidad de propagación de ondas sísmicas, se obtienen indicadores de la densidad total de la roca y de la consistencia de ésta.

La ventaja de los métodos geofísicos de prospección mediante sondeos (diagrafías o well-logs) estriba en su bajo costo, rapidez con que se obtienen los datos, que son continuos a lo largo del registro estratigráfico y que además permite establecer correlaciones de forma bastante sencilla.

En las últimas décadas se ha desarrollado enormemente la búsqueda de yacimientos bajo el mar, los cuales, si bien tienen similares características que los terrestres en cuanto a estructura de las bolsas, presentan muchas mayores dificultades a la hora de su localización y, por añadidura, de su explotación.

2.1.2. Trampas de petróleo

Una trampa de petróleo es una estructura que presenta la roca almacén que favorece la acumulación del petróleo. Estas trampas, son lugares formados por rocas porosas rodeadas por capas impermeables. La disposición de éstas puede ser:

- Estratigráfica: se forman generalmente por cambios en los espesores de las capas.
- Estructurales: originadas por la presencia de fallas y plegamientos.

2.2. USO DEL AGUA EN LOS PROCESOS DE REFINACIÓN

La industria de refinación requiere prevenir y controlar la contaminación del ambiente, preservar los recursos naturales, y racionalizar cada vez más el uso del agua, ordenando su integración al entorno de sus centros de trabajo. El agua utilizada en los diversos procesos en la industria del petróleo debe cumplir con ciertos requisitos de calidad, de lo contrario puede originar problemas o fallas en las instalaciones de una refinería, así como en las diferentes etapas de refinación del crudo.

Los contaminantes orgánicos, contribuyen al crecimiento de material biológico en las torres de enfriamiento y por lo tanto no solo incrementan los problemas por fallas, sino también deterioran el material de las torres. Los contaminantes inorgánicos, usualmente en estado disuelto como los cloruros, contribuyen a la corrosión de los metales. Sales de calcio, magnesio y fósforo causan formación de escamas en las calderas e intercambiadores de calor; los carbonatos aceleran la

deslignificación de la madera en las torres de enfriamiento, y los nitratos y fosfatos contribuyen a la formación de algas en las torres de enfriamiento.

La industria del petróleo requiere agua de calidad tal que permita buen intercambio de calor con las superficies metálicas y que cause mínima corrosión. Para el control de escamas, el calcio y el fósforo deben ser reducidos a valores bajos y evitar precipitados de carbonatos de calcio y fosfatos de calcio.

Es importante mencionar que en cada refinería se cuenta con una Unidad de Servicios Auxiliares, esta unidad da soporte técnico a las diferentes secciones o procesos de refinación del petróleo suministrándoles vapor de agua de alta, media y baja presión, electricidad, aire comprimido y agua de enfriamiento. En algunas refinerías se utiliza parte del vapor para producir electricidad y en otras la electricidad se compra y se utiliza totalmente el vapor generado en una caldera para los procesos.

El calor necesario para la producción del vapor proviene del quemado de combustibles y derivados del petróleo de bajo valor comercial provenientes de los diferentes procesos.

Los usos del agua en la industria petrolera se clasifican en: agua de proceso y agua de servicios.

- **Agua de Proceso:** El agua de proceso es el agua utilizada como transporte, enfriamiento o generación de vapor. El agua de enfriamiento se clasifica como agua de enfriamiento en contacto directo con el material a enfriar y en agua sin contacto directo. Para la industria de refinación, el caudal de agua de enfriamiento representa el 62% del agua que demanda el proceso. El agua para generación de vapor es el caudal que se alimenta a las calderas, este valor representa el 25% del agua que demanda el proceso.

- **Agua de servicios.** Incluye el agua para usos generales de los empleados, trabajos mecánicos, limpieza de equipo y riego de jardines, representa el 13% del agua que demanda el proceso

2.3. ABASTECIMIENTO DE AGUA

De acuerdo con información de la Comisión Nacional del Agua la industria de refinación tiene tres fuentes principales de agua de abastecimiento, a través de extracción subterránea, superficial y aguas residuales municipales.

2.4. PRINCIPALES CONTAMINANTES EN LA INDUSTRIA DE LA REFINACIÓN

El impacto ambiental de la refinación de petróleo es el resultado, principalmente, de las emisiones gaseosas, descargas de efluentes, desechos sólidos, ruido y olor además de efectos visuales o estéticos.

Las emisiones atmosféricas constituyen las causas más significativas de los impactos ambientales negativos de las refinerías. Las más importantes son las partículas, hidrocarburos, monóxido de carbono, óxidos de azufre y de nitrógeno, éstos emanan de diferentes fuentes incluyendo la unidad de desintegración catalítica, los procesos de recuperación de azufre, calentadores, desfuegos, mecheros y almacenamiento de los productos o materias primas. Los sellos de las bombas y las válvulas pueden originar las emisiones fugitivas. La combinación de estas emanaciones puede causar olores nocivos que afectarán a grandes áreas alrededor de la refinería.

El uso de grandes cantidades de agua en la refinación de petróleo para lavar los materiales indeseados de la corriente del proceso, para enfriamiento y producción de vapor, y en los procesos de reacción. Entre los contaminantes principales que se encuentran en los efluentes de las refinerías de petróleo se tiene: aceites y grasas,

amoníaco, compuestos fenólicos, sulfuros, ácidos orgánicos, y cromo y otros metales. Se pueden expresar estos contaminantes en términos de su Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO5), Demanda Química de Oxígeno (DQO) y el contenido de Carbono Orgánico Total (COT). Además, existe el potencial para contaminar el agua superficial, el suelo y el agua freática debido a las fugas o derrames de las materias primas o productos. La purga del agua de enfriamiento, el agua de lavado o de limpieza, el escurrimiento e infiltración de los patios de tanques, almacén de tubos, áreas de entrega de productos, y módulos de procesamiento, también pueden causar la degradación de las aguas superficiales y freáticas.

Las refinerías generan grandes cantidades de desechos sólidos; los principales son las partículas catalíticas de las unidades de desintegración, finos de coque, sulfuros de hierro, medios de filtración, y diferentes lodos (de la limpieza de los tanques, separadores de aceite y agua, y sistemas de tratamiento de las aguas servidas).

La operación de refinación de petróleo puede ser ruidosa. Las fuentes de ruido son los compresores de alta velocidad, las válvulas de control, los sistemas de tubería, turbinas y motores, mecheros, intercambiadores de calor con enfriamiento por aire, ventiladores, torres de enfriamiento y desfuegos. Los niveles típicos de ruido varían de 60 a 110 dB a una distancia de un metro de la fuente

2.5. TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES

En los casos en que la reutilización de las aguas utilizadas en los procesos productivos no es posible, es importante ajustar el efluente a los límites de vertido contemplados por la legislación vigente. Las principales técnicas para la depuración de aguas residuales en diferentes sectores de actividad industrial se pueden clasificar como:

- a. Tratamiento Fisicoquímico: La depuración fisicoquímica consiste en la eliminación de los contaminantes contenidos en un agua residual por la

combinación de métodos químicos (adición de productos químicos para conseguir la precipitación y el volumen y peso adecuados de los lodos) y métodos físicos (decantación y flotación).

- b. Tratamiento Biológico de aguas residuales: Existen en el mercado diversos reactores biológicos a membranas. (tipo MBR, de lecho móvil MBBR y secuenciales SBR).

Los métodos más comunes aplicados para el tratamiento de las descargas acuosas de las refinerías de petróleo se clasifican en:

- a. Método físico. Incluye separador por gravedad (API), flotación con aire disuelto (DAF) y evaporadores.
- b. Método químico. Se incluyen diversos productos químicos tales como floculantes y coagulantes, separadores de emulsión, clarificadores, etc.
- c. Método biológico, incluye lodos activados, biodisco, lagunaje, etc.
- d. Tratamiento terciario. El tratamiento terciario forma parte del proceso de depuración de una Estación Depuradora de Aguas Residuales (EDAR) o Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR). El papel de este tratamiento en todo el proceso de depuración es el de higienizar y adecuar el agua para el consumo urbano y aplicaciones industriales que requieran la máxima pureza del agua.

Los separadores por gravedad son usados prácticamente en todas las refinerías, son diseñados principalmente para la remoción de sólidos sedimentables y extracción de aceite por flotación. Remueven del 50 al 99% del aceite flotante y del 10 al 85% de los sólidos suspendidos, también tienen una remoción de la DBO₅, DQO y fenoles. La remoción de contaminantes en tanques de evaporación es muy elevada, pero la aplicación de este método es severamente limitada por las condiciones del lugar, clima y la disponibilidad de la carga hidráulica.

Los métodos fisicoquímicos que utilizan los procesos de coagulación-floculación-sedimentación, agregando algún producto químico como sulfato de

aluminio o cloruro férrico, aceleran el proceso de remoción de sólidos sedimentables y la separación de aceites mediante la aplicación de aire disuelto, este proceso es particularmente recomendable para las emulsiones de aceite.

Los métodos de tratamiento biológico incluyen: lodos activados, filtros rociadores, lagunas de aeración y zanjas de oxidación. Estos procesos de tratamiento requieren de un pretratamiento para la remoción de aceite y controlar otras condiciones (como pH y sustancias tóxicas como fenoles y cianuros), de los mencionados. El proceso de lodos activados, incluyendo las zanjas de oxidación, son los más efectivos en la remoción de la materia orgánica; las eficiencias esperadas de remoción están en los rangos de 70 - 95% de DBO5, 30 - 70% de DQO, y 65-99% de Fenoles y Cianuros.

El tratamiento terciario puede incluir filtración, carbón activado y desinfección con ozono, a la fecha ha sido limitado por el costo que implica su uso. Estos métodos son tratamientos efectivos en la remoción de olor y sustancias orgánicas refractarias, después del tratamiento biológico de las aguas residuales. Los métodos más importantes son: la disminución de aguas ácidas, neutralización y oxidación de productos usados (alcalinos), tratamiento de agua de desecho, recuperación del petróleo derramado y control de temperatura. Estas medidas reducen la carga contaminante del tratamiento en el efluente de una refinería general.

En la Tabla No. 1, se presenta la clasificación regional administrativa y se indica el tipo de proceso de tratamiento y características de las aguas residuales utilizadas en las refinerías y unidades de distribución de PEMEX, en la mayor parte de las plantas, algún tipo de tratamiento biológico es utilizado para la remoción de material orgánico disuelto. La tabla II.5 muestra eficiencias típicas de remoción de contaminantes en procesos de tratamiento. La tabla II.6 muestra las operaciones unitarias empleadas actualmente en la refinación de petróleo en México para el tratamiento de efluentes.

Tabla No. 1. Proceso de tratamiento de aguas residuales empleadas en la industria de refinación en México. Fuente: PEMEX, 2021.

Región administrativa:	Estado:	Nombre del usuario	Proceso de tratamiento	Gasto operación (lps)
Sureste	Oaxaca	PEMEX- REFINACIÓN	Trat. Sec.	200
Noroeste	Nayarit	PEMEX- REFINACIÓN	Trat. Primario	
Norte	Nuevo León	Ref. Héctor R. Lara Sosa (PEMEX)	Lodos Act.	380.00
	Tamaulipas	PEMEX Ref. Franco. I. Madero	Trat. Primario.	
Península de baja California	Baja California Sur	PEMEX- REFINACIÓN	Trat. Primario	
Lerma – Balsas	Guanajuato	PEMEX- REFINACIÓN	Trat terciario	231.48
	Michoacán	PEMEX- REFINACIÓN	Trat. Sec.	5.00
Valle de México	Hidalgo	PEMEX- REFINACIÓN (ductos Pachuca)	Trat. Sec.	0.07
		PEMEX- REFINACIÓN (ductos Cuautepec)	Trat. Primario	0.02
		PEMEX- REFINACIÓN (ductos Tepatlán)	Trat. Primario	0.02
Balsas	Morelos	PEMEX- REFINACIÓN (Cuautla)	Trat. Primario	.05
		PEMEX- REFINACIÓN (Cuernavaca)	Trat. Primario	0.16

Tabla No. 2. Eficiencias de remoción de contaminantes en los procesos de tratamiento en una refinería. Fuente: PEMEX, 2021.

Procesos	Efluente de procesos	DBO5	DQO	TOC	SS	Aceite	Fenol	Amoniaco	Sulfuros
Separador API	Aguas crudas	5-40	5-30	-	10-50	60-99	0-50	-	-
Clarificador	1	30-60	20-50	-	50-80	60-95	0-50		
Flotación con aire	1	20-70	10-60	-	50-85	70-85	10-75	-	-
Filtro	1	40-70	20-55	-	75-95	65-90	5-20	-	-
Lagunas de oxidación	1	40-95	30-65	60	20-70	50-90	60-99	0-15	70-100
Lagunas aereadas	2,3,4	75-95	60-85	-	40-65	-	90-99	10-45	95-100
Lodos activados	2,3,4	80-99	50-95	40-90	60-85	80-99	95-99	33-99	97-100
Filtración	1	60-85	30-70	-	60-85	50-80	70-98	15-90	70-100
Torres de	2,3,4	50-90	40-90	10-70	50-85	60-75	75-99	60-95	-

enfriamiento									
Carbón activado	2,3,4	70-95	70-90	50-80	60-90	75-95	90-100'	7-33	-
Filtración medio granular	5-9	-	-	50-65	75-95	65-95	5-20	-	-
Carbón activado	5-9 y 11	91-98	86-94	50-80	60-90	70-95	90-99	33-87	-

Tabla No. 3. Operaciones unitarias de tratamiento de efluentes en refinerías. Fuente: PEMEX, 2021.

Refinería	Cárcamo regulador	Separadores API	Separador de placas corrugadas	Lagunas de igualación	Máquinas deflotación	Lagunas de oxidación	Lagunas de estabilización
Cadereyta	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Madero	✓	✓	✓				
Minatitlán	✓	✓	✓				
Salamanca	✓	✓	✓	✓		✓	✓
Salina Cruz	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Tula	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓

2.6. NORMATIVIDAD EN MATERIA DE DESCARGA DE AGUA RESIDUAL

La prevención y control de la contaminación de las aguas es materia de la Ley de Aguas Nacionales, en ella se establecen las condiciones para promover y, en su caso, ejecutar y operar la infraestructura hidráulica, así como para preservar, conservar y mejorar la calidad del agua en las cuencas hidrológicas y acuíferos. Un conjunto de normas oficiales ha desarrollado diversas disposiciones al respecto.

Recientemente, se han efectuado modificaciones significativas al marco normativo de referencia, para simplificarlo sin detrimento de su capacidad regulatoria. Las normas anteriores vigentes que regulaban las descargas de aguas residuales han sido abrogadas y sustituidas por tan sólo tres normas oficiales aplicables a la industria petrolera de refinación, las cuales se mencionan a continuación:

- NOM-001-SEMARNAT-2021. Establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales vertidas en aguas y bienes nacionales.
- NOM-002-SEMARNAT-1996. Establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales a los sistemas de alcantarillado urbano o municipal.
- NOM-003-SEMARNAT-1997. Establece los límites máximos permisibles de contaminantes para las aguas residuales tratadas que se reúsen en servicios al público.

En la Tabla No.4, se muestran los límites máximos permisibles para contaminantes básicos, de acuerdo con la norma NOM-001-SEMARNAT-2021.

Tabla No. 4. Límite máximo permisible (promedio diario). Fuente: SEMARNAT, 2021.

Parámetro	NOM-001-SEMARNAT-2021
Temperatura	40
pH (unidades de pH)	5-10
Grasas y aceites (mg/L)	15-25
Sólidos sedimentables	2
Sólidos suspendidos totales (mg/L)	60-200
Demanda bioquímica de oxígeno (mg/L)	60-200
Nitrógeno total (mg/l)	60
Fósforo total (mg/l)	30
Arsénico (mg/l)	0.2-0.4
Cadmio (mg/l)	0.2-0.4
Cianuro (mg/l)	2.0-3.0
Cobre (mg/l)	6.0
Cromo (mg/l)	1.0-1.5
Mercurio (mg/l)	0.01-0.02
Níquel (mg/l)	4
Plomo (mg/l)	0.04-1.0
Zinc (mg/l)	20

2.7. PARÁMETROS EN EL USO DEL AGUA

La industria petrolera de refinación es una industria específica, la estructura económica es igual a la productiva y se considera como referencia la producción de refinados para cuantificar parámetros e índices de usos del agua correspondientes.

Parámetros de producción. La tabla muestra valores de producción de las refinерías del país, estos valores pertenecen al conjunto de parámetros de producción, como ejemplo en la Tabla No. 5 se muestra la producción promedio diaria de refinación de petróleo crudo.

Tabla No. 5. Producción diaria del sistema de refinación. Fuente: PEMEX, 2021.

Refinería	Refinación (miles barriles/día)
Cadereyta	251.0
Madero	175.0
Minatitlán	281.6
Salamanca	220.0
Salina Cruz	303.9
Tula	304.0
Promedio	255.9

Parámetros de calidad del agua residual. La tabla No. 6 proporciona el caudal de descarga diario y concentración de contaminantes para cada refinерía, es importante observar el caso de Minatitlán, ingresa al sistema de enfriamiento un caudal de 146,880 m³/día de agua y el mismo volumen es descargado sin considerarse contaminación alguna, por lo tanto, se excluye en la estimación de parámetros e índices específicos. La Tabla No. 7 proporciona la carga diaria de contaminantes producida por cada refinерía.

Tabla No. 6. Calidad del agua residual de la industria de refinación. Fuente: PEMEX, 2021.

Refinería	Descarga (m³/día)	DBO₅ (mg/L)	DQO (mg/L)	SST (mg/L)	GYA (mg/L)
Cadereyta	25,315	328	340	87	10
Madero	28,524	122	1,014	132	92
Minatitlán	35,615	191	464	167	39
Salamanca	27,833	290	650	270	50
Salina Cruz	45,290	22	168	71	6
Tula	44,064	128	202	87	10
Promedio	34,440	180	473	136	35

Tabla No. 7. Volumen de descarga y carga de contaminantes. Fuente: PEMEX, 2021.

Refinería	DBO₅ (Kg/día)	DQO (Kg/día)	SST (Kg/día)	GyA (Kg/día)
Cadereyta	8,303	8,607	2,202	253
Madero	3,480	28,923	3,765	2,624
Minatitlán	6,802	16,525	5,948	1,389
Salamanca	8,072	18,091	7,515	1,392
Salina Cruz	996	7,609	3,216	272
Tula	5,640	8,901	3,834	441
Promedio	5,549	14,776	4,413	1,062

Parámetros de uso del agua. Los parámetros que caracterizan a la industria petrolera de refinación en el contexto de uso del agua se muestran en la Tabla No. 8.

Tabla No. 8. Industria de refinación, parámetros de uso del agua. Fuente: PEMEX, 2021.

Refinería	Abastecimiento [m³/día]	Recirculación- reúso [m³/día]	Demanda [m³/día]	Consumo [m³/día]	Descarga [m³/día]
Cadereyta	30,378	163,434	193,812	5,063	25,315
Madero	34,229	184,151	218,380	5,705	28,524

Minatitlán	42,738	229,930	272,668	7,123	35,615
Salamanca	33,400	179,690	213,090	5,567	27,833
Salina Cruz	54,348	292,392	346,740	9,058	45,290
Tula	52,877	284,477	337,354	8,813	44,064
Promedio	41,328	222,346	263,674	6,888	34,440

- **Agua de abastecimiento**, también denominada agua de reposición es el caudal de agua de extracción superficial o subterránea para un uso específico. Para estimar el caudal de agua de abastecimiento se utilizó como base el caudal de descarga y un factor de relación abastecimiento/descarga igual a 1.2.
- **Agua de recirculación**, es el caudal de agua que retorna después de haber proporcionado un servicio a la planta (generalmente para enfriamiento o generación de vapor), el agua de recirculación no se pone en contacto directo con productos o insumos, requiere un tratamiento mínimo. Agua de reúso, (incluyendo recirculación) es el caudal de agua que se incorpora en algunas etapas del proceso después de un tratamiento que le permite la recuperar la calidad requerida.
- **Agua de demanda**, es el caudal total de agua que por diseño requiere el proceso, es la adición del caudal de agua de abastecimiento más el caudal de agua recirculada y reusada. En la estimación del caudal de agua de demanda se utilizó como base el caudal de descarga y un factor de relación demanda/descarga igual a 6.38.
- **Agua de descarga**, es el caudal que ha estado en contacto con insumos o productos y posteriormente es retornado a un bien nacional (río, barranca, laguna, otro) o a la red municipal.
- **Agua de consumo**, es el agua que se evapora o que se incorpora al producto, es la diferencia entre el caudal de reposición y el caudal de descarga.

2.8. ÍNDICES ESPECÍFICOS

Estos índices son coeficientes que representan grado o intensidad de uso, se clasifican como:

- **Índice específico de uso del agua.** Son una relación entre el volumen de agua que se extrae, recircula, consume o descarga la industria y el volumen de producto manufacturado, en el caso específico de la industria petrolera de refinación, el índice específico de uso del agua se expresa en metros cúbicos por 1000 barriles.

Industria petrolera	Abastecimiento [m ³ /1000bb]	Recirculación reúso [m ³ /1000bb]	Demanda [m ³ /1000bb]	Consumo [m ³ /1000bb]	Descarga [m ³ /1000bb]
Refinación	198	1,064	1,262	33	165

- **Índice de carga de contaminante.** Relación entre la masa de contaminantes generados por las aguas residuales de la industria por cada tonelada de producto manufacturado.

Industria petrolera	DBO ₅ [kg/1000bb]	DQO [kg/1000bb]	SST [kg/1000bb]	GYA [kg/1000bb]
Refinación	29	82	23	6

De acuerdo con la producción de refinados registrada y estimaciones de uso del agua en esta industria, la Tabla No. 9 presenta los índices específicos de uso del agua obtenidos para cada refinería.

Tabla No. 9. Índices específicos de uso del agua en la industria de refinación. Fuente: PEMEX, 2021.

Refinería	Abastecimiento [m ³ /1000bb]	Recirculación / reúso [m ³ /1000bb]	Demanda [m ³ /1000bb]	Consumo [m ³ /1000bb]	Descarga [m ³ /1000bb]
Cadereyta	182	977	1,158	30	151
Madero	232	1,248	1,480	39	193
Minatitlán	237	1,272	1,509	39	197

Salamanca	180	970	1,151	30	150
Salina Cruz	177	951	1,128	29	147
Tula	179	965	1,144	30	149
Promedio	198	1,064	1,262	33	165

De acuerdo con los valores de los índices específicos obtenidos, para operación normal, la industria de petrolera de refinación requiere un abastecimiento anual por extracción superficial y/o subterránea de 93 millones de metros cúbicos, este volumen es equivalente a dotar de agua a una población que en 1998 se estimaba en 1,268,602 habitantes (200 litros diarios por persona) durante un año.

Se estima que la planta industrial recircula (incluido el reúso) 498 millones de metros cúbicos, demanda para su operación 590 millones de metros cúbicos, equivalente a dotar de agua a una población de 8 millones de habitantes, consume 15 millones de metros cúbicos y descarga 77 millones de metros cúbicos.

La tabla No. 10 presenta una estimación del uso del agua en la industria petrolera de refinación para los rubros: abastecimiento, recirculación-reúso, demanda, consumo y descarga.

Tabla No. 10. Industria de refinación, parámetros de uso del agua. Fuente: PEMEX, 2021.

	Abastecimiento [m ³ /año]	Recirculación -reúso [m ³ /año]	Demanda [m ³ /año]	Consumo [m ³ /año]	Descarga [m ³ /año]
Industria de Refinación	92,607,913	498,230,573	590,838,486	15,434,652	77,173,261
Población equivalente (habitantes)	1,268,602	6,825,076	8,093,678	211,434	1,057,168

2.9. COMPARACIÓN CON OTROS ESTUDIOS

En el estudio realizado por la Secretaría de Recursos Hidráulicos “Estudio sobre usos del agua, métodos y costos para el control de la contaminación del agua residual en la industria petrolera en el año 1975, se reportó un índice específico de abastecimiento de 316 m³/1000bbl y un índice específico de descarga de 150 m³/1000bbl, en este estudio se tomó como referencia la refinería de Azcapotzalco, actualmente fuera de servicio.

De acuerdo con “The water encyclopedia” en el año 2010 los valores reportados de índices específicos de uso del agua para la industria de refinación en los Estados Unidos eran: abastecimiento 1,069 m³/1000bbl; descarga 965 m³/1000bbl; índice de consumo 100 m³/1000bbl; demanda 6848 m³/1000bbl y recirculación-reúso 5,779 m³/1000bbl. Estos índices ya no requieren especificar el tamaño de la planta, los productos finales y la calidad del petróleo crudo procesado.

La Tabla No. 11 presenta un resumen de los índices específicos de uso del agua en la industria petrolera de obtenidos en estudios realizados en México y en los EUA.

Tabla No. 11. Comparación de índices específicos de uso del agua (m³/1000bbl). Fuente: IMTA, 2019.

Estudio	Abastecimiento	Recirculación reúso	Demanda	Consumo	Descarga
Presente estudio	198	1,064	1,262	33	165
Estudio sobre usos de agua, 1975		-	316	-	150
The water encyclopedia, 2010					
EUA	1,069	5,779	6,848	100	965
China	-	-	3,965	-	-
Suiza	-	-	1,300	-	-

La disponibilidad de agua potable es una de las grandes preocupaciones en el ámbito mundial. Se considera que más de 80 países sufren de grave escasez. En diversas regiones de América Latina, Europa, África y Asia se presentan casos de epidemias y enfermedades debido a la contaminación de los mantos acuíferos con los que se abastecen las comunidades.

Pero no sólo los problemas de salud son preocupantes; también se consideran otros factores como la pérdida de especies y el agotamiento de los mantos acuíferos. Es por ello la importancia del desarrollo de productos amigables al ambiente, así como la mejora u optimización de los diversos procesos que actualmente se aplican al tratamiento de aguas.

Con esta visión se requiere que la industria petrolera mejore la reinyección de agua congénita en los pozos, disminuya la generación de efluentes y que los que ya se tienen sean tratados en sitio para su reincorporación al proceso, minimizando su descarga a los mantos acuíferos y con ello también minimizar sus efectos nocivos al ambiente.

CAPÍTULO III. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. PROCESO DE COAGULACIÓN - FLOCULACIÓN

El proceso de tratamiento del agua para su potabilización comprende diversas fases fundamentales, básicamente: la precloración, coagulación, floculación, filtración y desinfección. El comportamiento del agua ante cada una de estas fases o ante el conjunto de todas ellas difiere según las características del agua a tratar, o si el tratamiento se dirige a la producción y acondicionamiento del agua para usos industriales específicos, o bien el tratamiento se aplica sobre aguas residuales urbanas, industriales, etc., los procesos, aunque en algunas fases son bastante análogos, no pueden en cambio considerarse totalmente iguales. En la Figura No. 1 se muestra un esquema general de un tratamiento básico de agua.

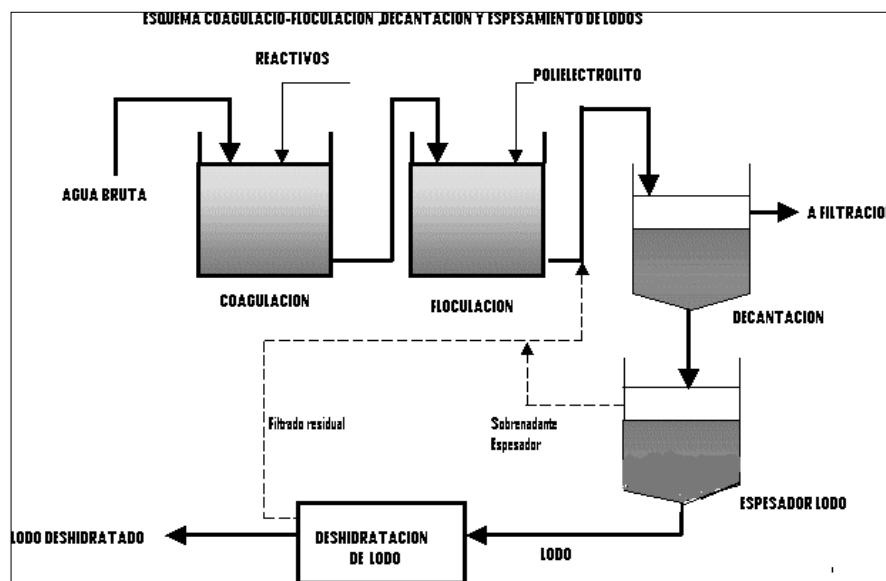


Figura No. 1. Tratamiento básico de agua. Fuente: EPA, 2016.

Una de las fases principales en las instalaciones para el tratamiento del agua, es la eliminación de suspensiones coloidales y partículas de impurezas suspendidas en el agua. Las operaciones mediante las cuales se facilita la sedimentación de estas suspensiones y partículas para su posterior eliminación se conocen con el nombre de coagulación y floculación. El control de la coagulación y floculación, en una planta de

tratamiento de agua, es una de las fases más importantes y difíciles del proceso general.

Para llegar a un mejor conocimiento de las operaciones de coagulación y floculación, es conveniente recordar previamente lo que se conoce con el nombre de estado coloidal. En primera aproximación, se pueden considerar como partículas coloidales aquéllas que tienen una dimensión comprendida entre $1\text{ m}\mu$ y $0,2\ \mu$. Dentro de los sistemas coloidales, los que más interesa conocer son los sistemas dispersos, en los cuales hay dos fases bien diferenciadas, la fase dispersa y el medio de dispersión.

Entre los tipos de dispersiones coloidales, al estudiar la coagulación, es importante definir aquel en que la fase dispersa es un sólido y el medio de dispersión un líquido. Todas las dispersiones coloidales tienen una característica común: su gran relación área-volumen en las partículas dispersas. En la interfase entre la fase dispersa y el medio de dispersión hay que considerar propiedades superficiales muy importantes, tales como la adsorción y los efectos de doble capa eléctrica.

Los sólidos que se encuentran en el agua, como arcilla, materias de origen vegetal, algas y otras materias orgánicas e inorgánicas presentan diferentes tamaños, que van, generalmente, desde las partículas gruesas, que se depositan fácilmente, hasta las que por su pequeño tamaño se encuentran en suspensión en estado coloidal. Son este tipo de partículas a las que hay que someter al proceso de coagulación - floculación. Además de las características que ya se han mencionado las partículas coloidales, ofrecen una gran superficie total, mayor que la de otras partículas no coloidales del mismo peso, otra propiedad importante, es que están provistas de carga eléctrica.

Las partículas coloidales como las partículas de arcilla y otros coloides tienen carga negativa, lo que origina una repulsión entre ellas, impidiendo así su unión y separación del líquido, de aquí la necesidad de adicionar un electrolito que neutralice

la carga eléctrica del coloide para poder eliminarle por decantación. La neutralización de las cargas eléctricas de los coloides en suspensión es la condición primordial para una buena depuración por coagulación y floculación, aun cuando en el fenómeno de la coagulación-floculación influyen también otros factores muy importantes.

3.2. COLOIDES HIDROFÓBICOS

Los coloides de naturaleza hidrofóbica (por ejemplo, las arcillas) forman suspensiones estables porque su carga superficial es la misma y repelen cualquier otra carga. Estas cargas pueden venir de una absorción selectiva de un ion en la superficie o desde el interior de la misma superficie (defectos de la red cristalina) como se muestra en la Figura No. 2 a continuación:

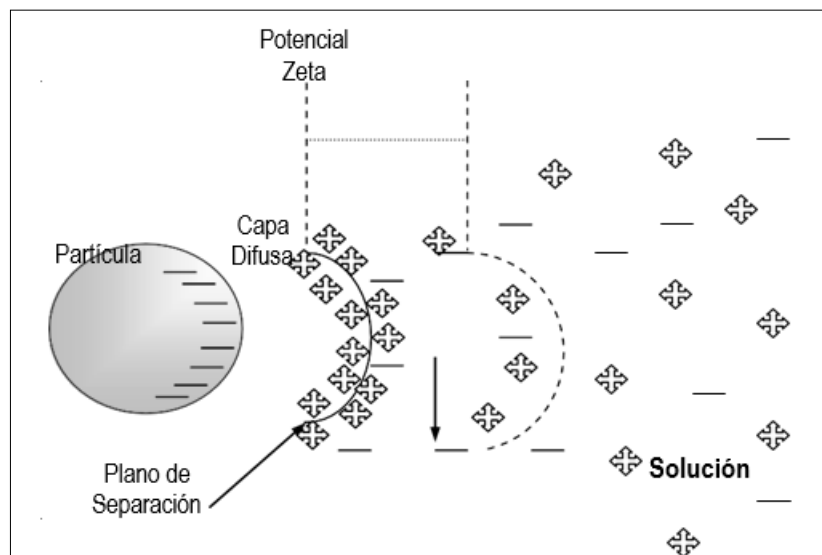


Figura No. 2. Equilibrio de capas en una partícula coloidal. Fuente: EPA, 2016.

3.3. COLOIDES HIDROFÍLICOS

Los coloides de naturaleza hidrofílica (generalmente sustancias orgánicas) debe su estabilidad a las capas de las moléculas de agua encadenadas a la superficie de la partícula. Las cadenas son de naturaleza química y las cargas electrostáticas juegan solo un papel secundario. Las capas de moléculas de agua previenen cualquier

aglomeración entre las partículas. En este caso, no existe una interfase real entre la partícula y el medio solvente. Las cargas tienen una influencia en la solubilidad de los coloides hidrofílicos. La importancia que juegan las cargas depende del grado de ionización de las partículas de los diferentes grupos funcionales. El grado de ionización por sí mismo depende del pH del medio. En general, la solubilidad es mínima con relación al punto de equilibrio eléctrico, el cual corresponde a un pH de entre 4.0 y 6.5

Las suspensiones coloidales electrofílicas por eso son una especie de solución de moléculas muy grandes o una totalidad de moléculas pequeñas, con una muy alta afinidad por el solvente. En algunos casos, los coloides hidrofílicos pueden ser absorbidos en la superficie del coloide hidrofóbico, como es el caso de las arcillas, y de esta manera imparte una naturaleza hidrofílica a la partícula hidrofóbica. Tales suspensiones coloidales son entonces muy difíciles de desestabilizar.

3.4. MEDICIÓN DE LA CONCENTRACIÓN COLOIDAL

No hay medición directa de la concentración coloidal. Las partículas coloidales pueden ser directamente observadas con un microscopio. Estas son indirectamente visibles por la refracción de la luz o por el efecto Tyndall, el cual se da cuando las soluciones coloidales son turbias.

La turbidez puede ser cuantificada por nefelometría, una medición relativa expresada en Unidades de Turbidez Nefelométrica (NTU, Nephelometric Turbidity Unit por sus siglas en inglés) la cual se correlaciona a una solución de calibración de formacina en agua el cual corresponde al cero de turbidez.

3.5. SISTEMA DE DESESTABILIZACIÓN

Los métodos convencionales de separación sólido-líquido, como la filtración, sedimentación, centrifugación o flotación, no pueden ser usados directamente en una

suspensión estabilizada. Las partículas son demasiado finas y permanecen separadas unas de otras. La coagulación y floculación desestabiliza estas suspensiones y permite la separación sólido-líquido.

Los mecanismos principalmente usados, son la neutralización de la carga y la adsorción.

3.5.1. Neutralización de la carga

En medios acuosos, las partículas coloidales hidrofóbicas están generalmente cargadas negativamente. El incremento del contenido de cationes en una solución reduce la potencial zeta y con ello el espesor de la doble capa la cual rodea la partícula coloidal.

Cuando la protección eléctrica de la partícula ha sido removida o suficientemente reducida, las partículas en movimiento pueden colisionar entre ellas debido a la inercia del movimiento Browniano, el movimiento del fluido en el cual están contenidas y al movimiento relativo de las partículas por sedimentación.

Las fuerzas de Van Der Waals y el fenómeno de adsorción superficial entonces llegan a prevalecer otra vez. A partir de que las partículas pueden unirse entre ellas, la suspensión es desestabilizada.

El mecanismo de neutralización de la carga es reversible. Hay un límite en la concentración de cationes el cual permite que la desestabilización ocurra. Más allá de esta concentración crítica, si los cationes continúan siendo añadidos, ocurre un nuevo desbalance iónico entre las partículas y la solución, dirigiéndolo a la formación de una nueva doble capa y a la reestabilización de la suspensión.

La eficiencia en la neutralización de la carga de un electrolito se incrementa con su valencia (la regla de Schulze y Hardy). Esto explica el uso predominante de electrolitos divalentes y trivalentes para desestabilizar las suspensiones coloidales.

3.5.2. Adsorción

La adsorción es un mecanismo superficial el cual permite que dos partículas entren en contacto para que se unan entre ellas debido a las fuerzas de Van Der Waals o por enlaces de hidrógeno.

La medición de la cantidad de polímero adsorbido por una suspensión coloidal como una función del tiempo permite una curva característica, llamada isoterma de Langmuir, en la Figura No. 3 se muestra una Isoterma de Adsorción.

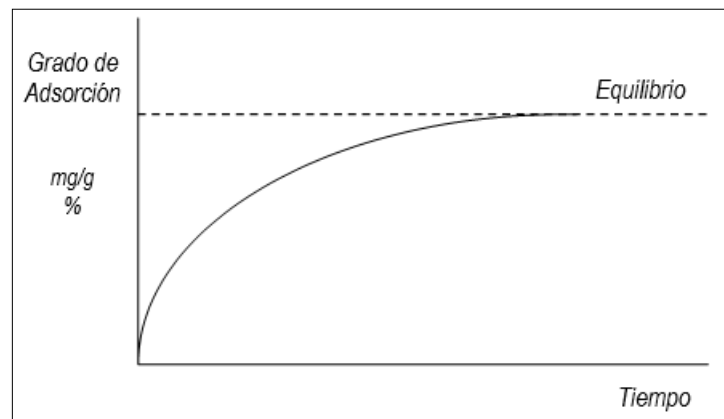


Figura No. 3. Isoterma de Adsorción. Fuente: Van Der Waals, 2010.

La curva característica es llamada isoterma debido a que la adsorción depende fuertemente de la temperatura y cualquier medición debe ser tomada a temperatura constante. La adsorción es un mecanismo irreversible el cual se lleva a cabo en dos etapas. Primeramente, después de algunos segundos, la mayor parte de la reacción se realiza. Después se da una relativa larga segunda etapa, se llega a un equilibrio, el cual es limitado por el número de sitios disponibles en la superficie de la partícula.

Cuando todos los sitios disponibles son ocupados, ninguna molécula adicional puede ser adjuntada a la superficie de la partícula. La adsorción es un mecanismo complejo que involucra un amplio número de parámetros relacionados a:

El coagulante:

- Estructura de la cadena molecular
- Densidad de la carga iónica
- Peso molecular

Los coloides:

- Número de sitios disponibles
- Cargas superficiales
- Área superficial específica
- Concentración de la partícula

El medio acuoso:

- pH Conductividad
- Presencia de otras sustancias
- Turbulencia
- Rango de temperatura
- Mezcla de productos

3.5.3. Desestabilización de las suspensiones por coagulación

La coagulación es la desestabilización de las suspensiones coloidales usando productos con una alta densidad de carga iónica. Dos tipos de mecanismos son los que pueden ocurrir:

1. Los cationes son adicionados a la suspensión coloidal en una cantidad justamente equivalente para neutralizar las cargas negativas. La coagulación ocurre directamente por la neutralización de la carga. Este tipo de coagulación

es comúnmente usada en los tratamientos de agua potable con cationes de hierro o aluminio.

2. El segundo tipo de coagulación es llevado a cabo usando polímeros de bajo peso molecular (20,000 a un millón) con una alta carga catiónica. Cuando este tipo de polímeros está en contacto con partículas de anilina, estas cadenas pueden ser adsorbidas enteramente en parte de la superficie de la partícula coloidal de esta manera se forman regiones de naturaleza catiónica como se puede observar en la Figura No. 4:

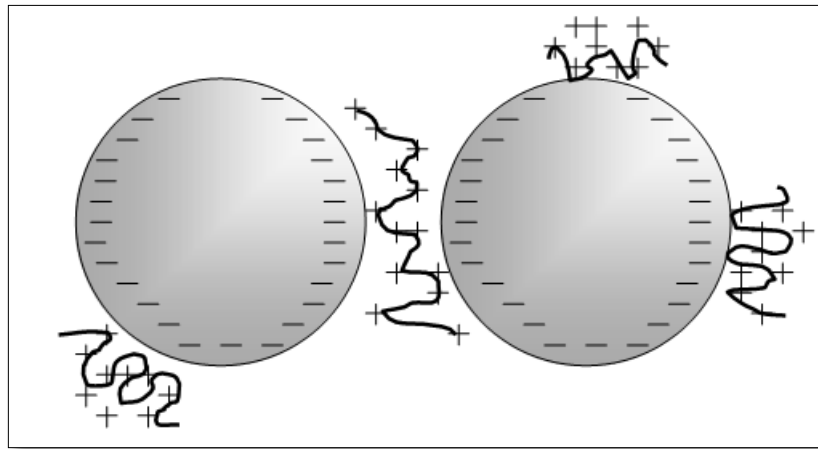


Figura No. 4. Coagulación usando polímero de bajo peso molecular. Fuente: Cárdenas, 2015.

Esta adsorción de iones de carga opuesta reduce el potencial de superficie y la protección de las partículas. Tendiendo en convertirse en verdaderos dipolos. Estas partículas se atraen entre ellas y colisionan unas con otras. Las fuerzas de Van Der Waals entonces entran en juego, uniendo las dos partículas y desestabilizando la suspensión. La coagulación por este tipo de mecanismo tiene un mayor grado de agregación que los mecanismos de simple neutralización eléctrica.

3.5.4. Desestabilización de la suspensión por floculación

La floculación es la desestabilización de las suspensiones coloidales hidrofóbicas por la unión entre partículas coloidales usando polímeros de cadena larga. Esto requiere el uso de polímeros con alto peso molecular (superior al millón) y toma lugar en dos etapas principales: creación y crecimiento del flóculo.

3.6. CREACIÓN DEL FLÓCULO

Para la creación del flóculo, el polímero esencialmente actúa por vía de un mecanismo de adsorción irreversible de los coloides a lo largo de su cadena molecular. El efecto de este mecanismo depende de la concentración del polímero, la concentración de las partículas y del tamaño de la partícula.

Si un exceso de polímero cubre la superficie de la partícula, la partícula puede una vez más estar separada y la suspensión se restabilizaría como se observa en la Figura No. 5.

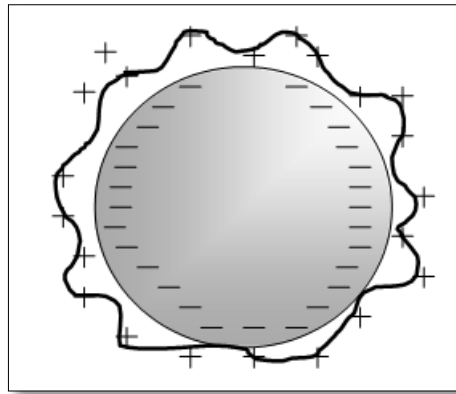


Figura No. 5. Separación de una partícula por un polímero. Fuente: Cárdenas, 2015.

En el caso de las suspensiones que contienen partículas con una amplia gama de tamaños, la suspensión puede ser desestabilizada por diferentes concentraciones de polímeros correspondientes a la distribución de los diferentes tamaños de partículas.

De esta manera, los buenos resultados pueden ser obtenidos usando un polímero particular para un tamaño de partícula, pero no para otro tamaño. Como una regla general, cuando este fenómeno ocurre, relativamente una buena floculación es observada pero la solución permanece muy turbia. Si la concentración de polímero es tal que los sitios de adsorción permanecen libres en las partículas, la misma cadena

polimérica puede ser capaz de ser adsorbida en dos diferentes partículas, como se muestra en la Figura No. 6.

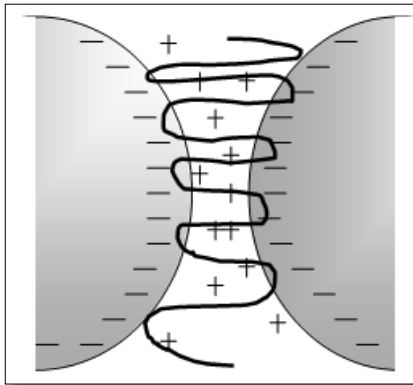


Figura No. 6. Enlace entre dos partículas. Fuente: Cárdenas, 2015.

En este mecanismo, el polímero permite que parte de esta cadena molecular se desdoble en la solución más allá de la doble capa de la partícula. El final de la cadena molecular es introducido y adsorbido en la superficie de una segunda partícula, la cual de esta manera crea un enlace entre las dos partículas.

En general, es sabido que la concentración óptima de polímero debe ser tal que más de la mitad de los sitios de adsorción permanezcan disponibles en las partículas. El largo de la cadena del polímero completamente desdoblada es de cerca de $1\ \mu\text{m}$, posiblemente tanto como unas cuantas decenas de μm en el caso de las más largas cadenas. Estas longitudes deben ser comparadas con las dimensiones de las partículas, las cuales son de cerca de $1\ \mu\text{m}$.

El enlace interpartícula puede ocurrir con polímeros no iónicos, catiónicos o aniónicos. En estos mecanismos, el fenómeno de neutralización de carga tiene una influencia secundaria. Esto explica por qué las reacciones de floculación pueden ocurrir con polímeros que contienen cargas del mismo signo que el de la suspensión coloidal.

Las cargas pueden tener una influencia que promueva un mejor desdoblamiento de la cadena del polímero debido al efecto de la repulsión

electrostática. La parte de la cadena polimérica puede ser también un factor clave en este proceso. La ionización en una solución puede también influir en el desenvolvimiento de la cadena debido a la limitación o eliminación del efecto de repulsión. Este fenómeno es conocido como el efecto de la sal.

Para un polímero dado, el enlace principalmente depende de dos parámetros: el número de sitios disponibles para adsorción en la superficie de la partícula y la velocidad de colisión de las partículas.

3.7. CINÉTICA DEL CRECIMIENTO DEL FLÓCULO

Dependiendo de los mecanismos descrito anteriormente, el desarrollo de los flóculos se da en varios pasos subsecuentes:

- Dispersión del polímero en el medio.
- Difusión del polímero cerca de la interfase sólido – líquido.
- Adsorción del polímero en la superficie de la partícula. La colisión de partículas ocasiona que el floculante se adsorba con otra partícula.
- Adsorción del floculante en la segunda partícula para formar el enlace y un micro flóculo.
- Crecimiento de los micro flóculos por una serie de colisiones y adsorciones sucesivas.
- Separación de los flóculos formados por rompimiento.

Cada paso toma lugar de acuerdo con su propia cinética y el resultado final, en términos del flóculo, dependen de la velocidad relativa de cada uno de los pasos. De esta manera, por ejemplo, si la fase de adsorción es mucho más rápida que la fase de crecimiento allí habrá muchos pequeños flóculos mientras, si la velocidad de crecimiento es más alta, los flóculos serán más largos y menores en número.

En general, las reacciones de adsorción son extremadamente rápidas. La etapa limitante en el desarrollo de los flóculos es la frecuencia de colisión entre partículas y colisiones con los flóculos ya formados.

3.8. CONSISTENCIA DE LOS FLÓCULOS

Los flóculos pueden tener dos tipos de consistencia, la llamada “suave” que es reversible, y “dura”, la cual es irreversible, además provee una buena retención de partículas por una baja velocidad de rompimiento en la zona de quietud, así como cuando se incrementa la velocidad de rompimiento la retención de las partículas finas disminuye. De regreso a las condiciones originales de rompimiento, si el flóculo retorna a su estructura inicial, es llamado un flóculo suave, los flóculos suaves son generalmente obtenidos con polímeros de bajo peso molecular.

Un flóculo duro, es más fuerte, mantiene una buena retención de partículas finas sobre la turbulencia existente y la velocidad de rompimiento elevada. Sin embargo, cuando este es sujeto a una alta turbulencia por un excesivo periodo de tiempo, la retención de las partículas decrece.

El flóculo se convierte en suave. Las razones asumidas para este fenómeno resultan de la configuración de la cadena polimérica en la superficie de la partícula. Un flóculo duro este compuesto de partículas conectadas por enlaces vía cadena molecular, las cuales se desdoblan en el espacio alrededor de la partícula, esto se observa en la siguiente Figura No. 7.

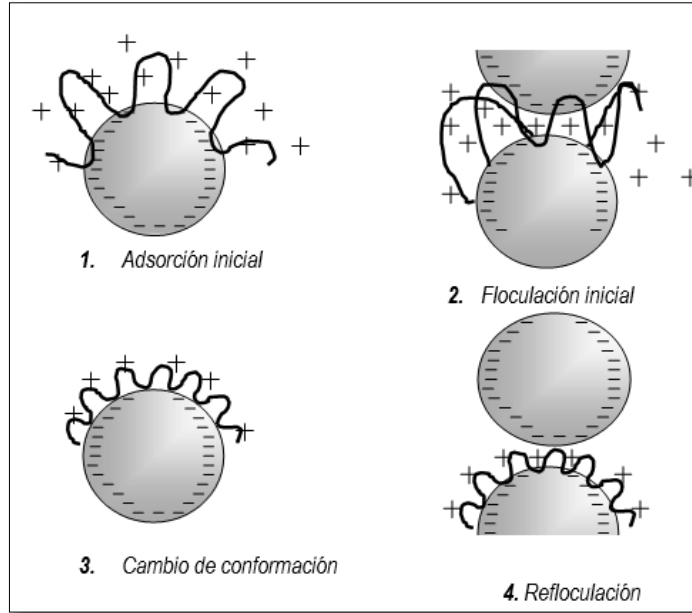


Figura No. 7. Flóculo duro por doble floculación. Fuente: Cárdenas, 2015.

Después del rompimiento, la cadena molecular, debido a la influencia de las fuerzas iónicas, tiene la tendencia de cubrir más de la superficie de la partícula, resultando por la unión un flóculo de consistencia suave.

3.9. EFICIENCIA DE LA COAGULACIÓN Y LA FLOCULACIÓN

La eficiencia de la coagulación y la floculación es esencialmente medida por el tamaño de los flóculos y sus características, la cantidad de materia coagulante y floculante en suspensión y la turbidez del líquido sobrenadante.

Estos parámetros dependen de las características específicas de los flóculos y del sistema de separación usado. A fin de medir la eficiencia de floculación, se hace necesario correr pruebas de eficiencia de los procesos de separación empleados. En la Tabla No. 12 se indican algunas de las características de los flóculos resultantes de diversos procesos de separación:

Tabla No. 12. Tipos de flóculos resultantes de diversos procesos de separación. Fuente: Cárdenas, 2015.

Método de Separación	Características del flóculo
Filtración	Poroso, fuerte y permeable
Sedimentación	Denso, fuerte, largo, de forma uniforme, mínima porosidad.
Centrifugación	Fuerte, denso y largo
Floculación	Baja densidad, fuerte, tamaño uniforme, largo

3.10. PARÁMETROS QUE TIENEN UNA INFLUENCIA EN LA EFICIENCIA DE COAGULACIÓN Y FLOCULACIÓN

La eficiencia de la coagulación y la floculación depende de varios parámetros relacionados a las partículas, los polímeros usados y la solución a ser tratada.

3.11. INFLUENCIA DE LAS PARTÍCULAS

Usualmente la floculación ocurre para partículas individuales más pequeñas que 50µm. Las partículas más grandes (más de 100 µm) generalmente no floculan ya que la velocidad de colisión es muy lenta. Es difícil para el polímero anclarse a la superficie de la partícula durante la colisión y la velocidad de fractura de los flóculos a la que se van formando es muy alta.

Sin embargo, la floculación de partículas grandes puede ocurrir usando polímeros aptos con un muy alto peso molecular. Dependiendo de su naturaleza y de su concentración, la floculación de materia suspendida es:

- Completamente difuso, en el cual todos los flóculos están separados y tienen diferente tamaño. Los flóculos grandes se asientan rápidamente, dejando a los

flóculos finos y micro flóculos en suspensión, estos son incapaces de asentarse y a menudo en lugar de asentarse en el tanque quedan como sobrenadantes.

- Homogéneo, en el cual los flóculos son de un tamaño similar y se asientan a la misma velocidad, dejando un agua clara.

En el caso de arcillas, por ejemplo, la floculación es difusa por una concentración de menos de 2 g/L y del tipo homogéneo por una concentración de alrededor de 2 a 5 g/L. Arriba de una cierta concentración, la mezcla de floculante en suspensión no ocurre y los flóculos dejan de aparecer, es decir existe también un límite de concentración de un floculante antes de que deje de tener un efecto en el agua tratada.

La concentración de las partículas en la suspensión tiene un efecto en la naturaleza del fenómeno de floculación. En general, es sabido que a bajas concentraciones de partículas el fenómeno dominante involucra las cargas de neutralización, mientras que, para altas concentraciones el fenómeno de adsorción y enlazamiento son los dominantes. Además, la formación de flóculos con una alta concentración de partículas es fuerte y contienen una alta concentración de materia suspendida.

3.12. INFLUENCIA DE LOS POLÍMEROS

La naturaleza del polímero es el principal elemento en la floculación. En este caso, tres principales características están involucradas, el peso molecular, la concentración y la carga iónica.

En general, la eficiencia del polímero es más grande si la cadena molecular es más grande a su vez, el tamaño de la cadena molecular depende del peso molecular y de la configuración espacial de la molécula. Mientras más grande es la longitud de la cadena da mayores posibilidades de crear enlaces, y mientras más pequeño sea el tamaño del polímero usado dará a su vez menores posibilidades.

En adición, los polímeros con alto peso molecular pueden tener un efecto secundario: el efecto de filtro, en el cual una partícula no floculada viene a ser atrapada en la malla del flóculo, lo que se muestra en la Figura No. 8. La estructura de la cadena (lineal, ramificada o entrecruzada) también juega un papel importante.

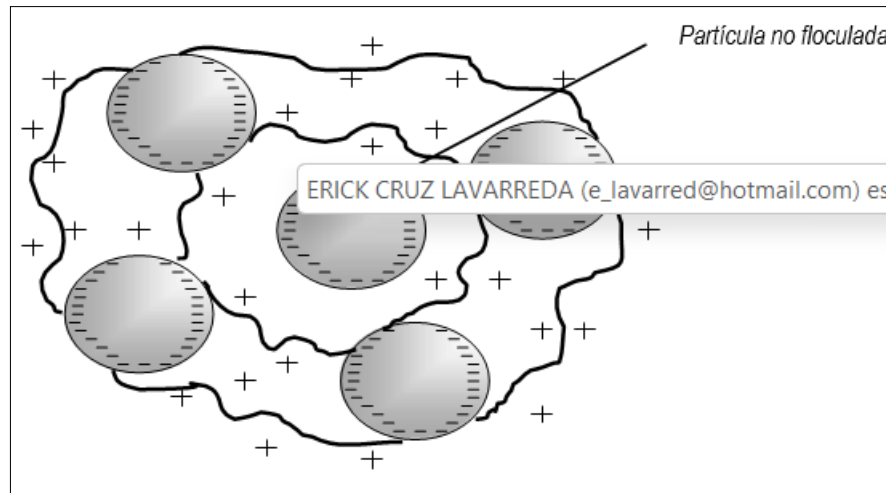


Figura No. 8. Efecto de filtro. Fuente: Cárdenas, 2015.

Sin embargo, la cadena molecular no debe de ser bastante larga como para que su eficiencia se vea limitada por problemas de difusión en la solución y por estorbo estérico. Además, incrementar la longitud de la cadena tiene el efecto de incrementar la viscosidad de la solución y el tiempo requerido para disolver el polímero. Los problemas de difusión y disolución de estos polímeros también dependen de la dosificación necesaria a ser usada (la cantidad de polímero por tonelada de materia seca). La apariencia del flóculo permite que la correcta dosificación sea determinada. Por ejemplo, en un filtro, una apariencia opaca indica una buena floculación, mientras que una apariencia brillante indica que demasiado polímero ha sido añadido.

En la práctica, para una alta o moderada dosificación (cantidades de polímero de entre 1 kg y 10 kg por tonelada de materia seca de lodo municipal), el tamaño en las partículas de flóculos está directamente relacionado al peso molecular del polímero. Entre mayor peso molecular, más largo será el flóculo. Por otra parte, para bajas dosificaciones, los polímeros de moderado peso molecular dan mejores

resultados debido a la pobre mezcla de polímeros de alto peso molecular y su tendencia a retener partículas no floculadas.

La influencia de la carga del polímero en los flóculos es expresada con relación a la demanda iónica del medio. Cargas débiles producen flóculos flexibles, teniendo una buena fuerza en contra del rompimiento, pero sus propiedades de filtración no son muy buenas. Por otra parte, una fuerte o moderada carga da mejores propiedades de filtración, pero los flóculos obtenidos son más sensibles al rompimiento.

Un caso en particular consiste en la floculación por una centrifuga de alta presión. En este caso, el polímero debe de estar presente en forma libre en la carga de lodos para permitir primeramente la floculación y posteriormente la refloculación. En este caso, cualquier exceso de polímero no produce el efecto de redispersión en los lodos.

3.13. INFLUENCIA DE UNA MEZCLA DE POLÍMEROS EN SOLUCIÓN

Las condiciones bajo las cuales el polímero es mezclado en la solución son fundamentales para llevar a cabo una buena coagulación y floculación. Dado que las reacciones de adsorción son irreversibles y muy rápidas, la calidad de la mezcla debe de ser tan alta como para permitir una rápida difusión del polímero en la suspensión. Además, dado que los polímeros son generalmente usados en forma concentrada y en pequeñas cantidades, estos deben ser distribuidos en forma uniforme a través del medio.

Por lo anterior, una actividad en campo es el establecer los puntos en los cuales el polímero va a ser inyectado, ya que si la calidad de mezclado es satisfactoria no habrá formación de flóculos que tiendan a romperse. Debido a su fuerza intrínseca de rompimiento y a la velocidad de corte del medio, los flóculos pueden quebrarse y convertirse en pequeños flóculos o incluso en partículas individuales. Tiempo

después, un equilibrio es establecido entre la formación y la desaparición de los flóculos.

El estado hidrodinámico de la solución es también importante para el mezclado. La floculación da buenos resultados en flujo laminar. Mientras que, en el turbulento, los flóculos pequeños son producidos debido al rompimiento, por lo tanto, el funcionamiento es impredecible.

3.14. INFLUENCIA DEL pH Y LA TEMPERATURA EN LA SOLUCIÓN

Se ha visto que el pH en la solución tiene un efecto directo en la conducta de las cadenas poliméricas. Este también puede tener otros efectos:

Ajustar el pH en una solución permite que los hidróxidos de metales se precipiten y evita que puedan interferir directamente con la floculación, por ejemplo, para capturar los coloides. La hidrólisis, y por eso la carga iónica del polímero, depende del pH.

Polímeros fuertemente aniónicos son muy eficientes en medios básicos, pero su eficiencia no es tan buena en medio ácido por que los carboxilatos y los grupos funcionales carboxílicos no se disocian en este tipo de medios. Polímeros no iónicos y moderadamente catiónicos tienen las mejores eficiencias en medios ácidos.

La temperatura en una solución directamente influye en la cinética de las reacciones involucradas y en la actividad de los coloides. De esta manera, el reducir la temperatura reduce por consecuencia la floculación.

3.15. INFLUENCIA DE LA NATURALEZA ORGÁNICA EN LA SOLUCIÓN

El último factor de importancia observado en la suspensión es su naturaleza orgánica. En general, entre mayor sea su naturaleza orgánica de la suspensión el

polímero tenderá más a ser catiónico. Consecuentemente, los polímeros aniónicos son más efectivos en soluciones inorgánicas.

3.16. PRINCIPALES PARÁMETROS NORMALMENTE USADOS PARA CARACTERIZAR POLÍMEROS

- a. Por la naturaleza de los monómeros y de los polímeros:
 - Poliacrilamidas.
 - Copolímeros del acrilamida - dimetilaminoetil acrilato.
 - Poliaminas.
 - Poliamidoaminas.
 - Oxido de polietileno.
- b. Por su peso molecular:
 - Bajo peso molecular: 1 a 3 millones de uma.
 - Peso molecular medio: 3 a 6 millones de uma.
 - Peso molecular estándar: 6 a 10 millones de uma.
 - Alto peso molecular: 10 a 15 millones de uma
 - Muy alto peso molecular: arriba de 15 millones de uma.
- c. Distribución molecular:
 - Baja polidispersión.
 - Alta polidispersión.
- d. Por la naturaleza de sus cargas:
 - No iónico.
 - Aniónico.
 - Catiónico.
 - Anfotérico.
- e. Por su densidad de carga:
 - Baja: de 1 a 10%.
 - Medio: de 10 a 40%.
 - Alta: de 40 a 80%.

- Muy alta: 80 a 100%.
- f. Por su distribución de carga
- Polímeros aleatorios
 - Bloques de polímeros
- g. Por su viscosidad, la cual depende de la carga y del peso molecular.
- h. Por su forma física:
- Emulsión.
 - Solución.
 - Polvo.
 - Granular.
- i. Por su estabilidad:
- Estabilidad al almacenamiento.
 - Estabilidad a la temperatura.
 - Estabilidad al pH.
 - Estabilidad en gel.
 - Estabilidad a la humedad.

CAPÍTULO IV. MÉTODOS Y TÉCNICAS

4.1. SEPARACIÓN DE GRASAS Y ACEITES

Las grasas y los aceites son un contaminante frecuente en las aguas residuales de cualquier planta industrial, por lo que se han desarrollado técnicas y procesos específicos para su eliminación.

El proceso de separación consiste en la eliminación del agua residual de las grasas y aceites contaminantes que cumplan básicamente con las siguientes condiciones:

- Estén en fase líquida.
- Se encuentren en estado libre (no eliminándose, en consecuencia, aquellos aceites y grasas que se encuentren disueltos o emulsionados).
- Tengan una densidad menor que la del agua.
- El tamaño de la gota sea superior a un valor predeterminado en el diseño. Generalmente el punto de corte se fija en 0,15 mm.

Entre los principales objetivos que busca el proceso de separación de grasas y aceites, se encuentran:

- Eliminación de la mayor parte de este contaminante del agua residual
- Por tratarse en un número importante de casos de hidrocarburos volátiles, evitar la posible formación de atmósferas tóxicas o peligrosas
- Disminuir riesgos de incendios por acumulación de compuestos potencialmente combustibles en las superficies.
- Evitar su presencia en los procesos biológicos por la toxicidad de una gran parte de estos compuestos.

4.2. EQUIPOS UTILIZADOS PARA LA SEPARACIÓN DE GRASAS Y ACEITES

Para llevar a cabo el proceso de separación de las grasas y aceites presentes en un efluente, comúnmente se hace uso de los equipos que a continuación se indican en la Tabla No. 13.

Tabla No. 13. Equipos utilizados para la separación de grasas y aceites. Fuente: PEMEX, 2021.

TIPO	RENDIMIENTO	COSTO INICIAL	APLICACIONES
Trampas de aceite	Bajo	Bajo	Pequeñas instalaciones, talleres, etc.
Separadores API	Bueno	Alto	Grandes instalaciones, refinerías, petroquímicas, etc.
Separadores de placas	Muy bueno	Alto	Amplia gama de modelos, desde pequeñas instalaciones a muy grandes
Tanques gravimétricos	Muy bueno	Muy Alto	Grandes instalaciones, refinerías, petroquímicas, etc.

El rendimiento de estos equipos no suele ser suficiente para alcanzar los límites exigidos por la normativa legal en el vertido, al no eliminar las grasas y aceites que se encuentran emulsionados o disueltos, de tal forma que en las plantas depuradoras que precisan eliminar este tipo de compuestos, posteriormente a estas unidades se suele precisar tratamientos posteriores de afino. Este proceso es considerado un pretratamiento.

4.3. RESIDUOS GENERADOS

Las grasas y aceites separados en los diferentes equipos indicados anteriormente están clasificados como residuos tóxicos y peligrosos, lo que conlleva su retiro de la planta depuradora y su eliminación final a través de un gestor de residuos autorizado.

En el caso de las refinerías y petroquímicas, las grasas y aceites separados en estos equipos se recuperan mandándolas a las unidades de destilación mezcladas con el crudo.

4.4. SEPARADORES API

Los efluentes generados en una Refinería reciben un tratamiento primario en donde se les eliminan los hidrocarburos y lodos presentes, después las aguas residuales son descargadas al cuerpo de agua. Este tratamiento primario se realiza en seis separadores del tipo API. A pesar de contar con seis separadores tipo API, estos separadores no se encuentran en condiciones óptimas de operación, no cuentan con equipo para manejo de lodos y no tienen control de emisiones de compuestos volátiles.

Un separador de aceite API es un dispositivo diseñado para separar grandes cantidades de aceite y sólidos suspendidos provenientes de aguas residuales tales como efluentes de refinerías de petróleo, plantas petroquímicas, plantas químicas, plantas de procesamiento del gas natural entre otros procesos industriales.

El nombre deriva del hecho de que estos separadores fueron diseñados según los estándares de publicados por el Instituto Americano del Petróleo (American Petroleum Institute, API). En general, este separador puede manejar flujos muy grandes. Sin embargo, su desventaja es el largo tiempo de retención requerido para la separación eficiente del aceite.

La eliminación de la mayor parte de los aceites libres de grasas y de las corrientes de la planta de aguas residuales reduce los problemas de sobrecarga y otros procesos de tratamiento de aguas abajo. Los separadores API son la elección correcta para las aguas residuales de refinería en general, tanque de lavado, residuos de desalación, así como de aguas residuales pluviales. En las Figuras No. 9 y 10 se presentan esquemas generales de un Separador tipo API.

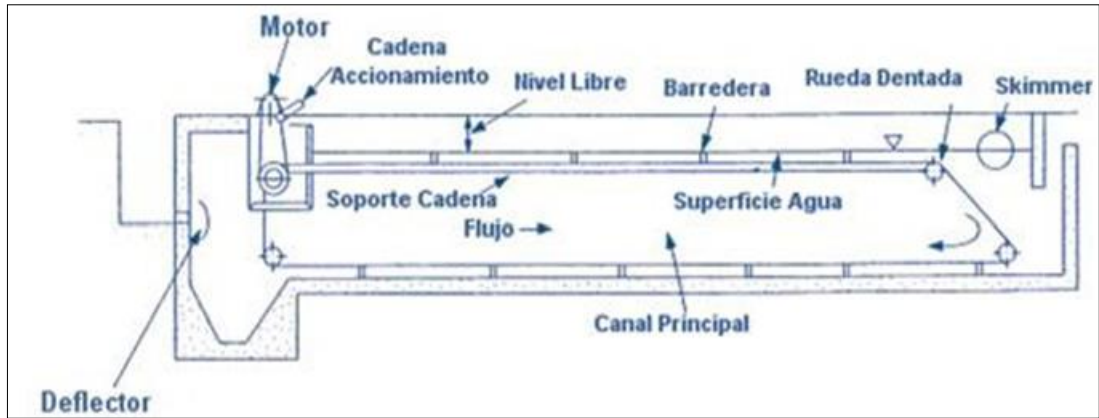


Figura No. 9. Esquema general de un separador tipo API. Fuente: IMP, 2016.

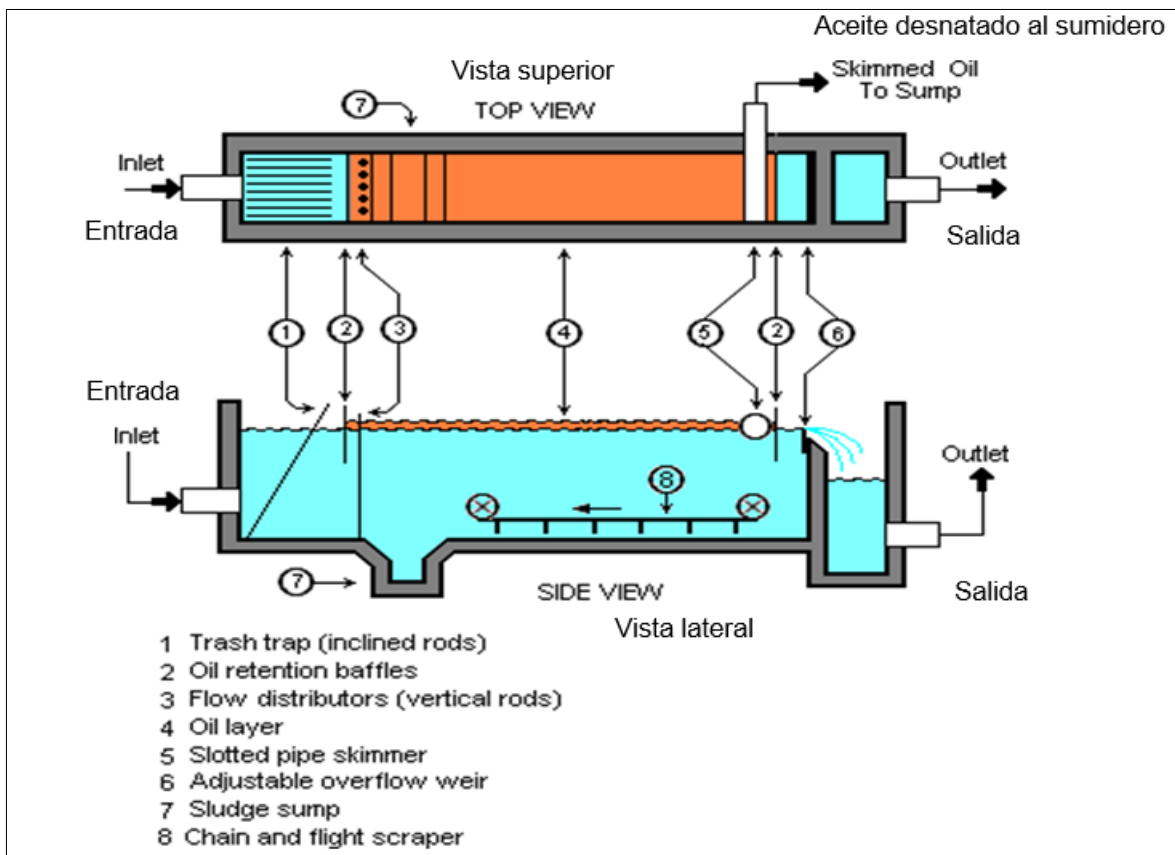


Figura No. 10. Esquema general de un separados tipo API. Fuente: Cárdenas, 2015.

4.5. TRAMPAS DE ACEITE

En todos aquellos casos en que sea precisa la eliminación de grasas y aceites en cantidades y volúmenes reducidos, como puede ser el caso de garajes, talleres,

restaurantes, etc., el empleo de trampas de aceite puede ser suficiente, requiriendo estos equipos una limpieza y atención frecuente, con el fin de conseguir unos rendimientos aceptables.

El parámetro más importante para definir de estos equipos es el volumen requerido. El volumen de la trampa debe calcularse para un tiempo de retención mínimo de 30 minutos a caudal máximo.

Existe una amplia gama de estos equipos prefabricados en el mercado, estando contruidos de diferentes materiales (hormigón, poliéster reforzado con fibra de vidrio, otros plásticos, etc.), así como de diferentes capacidades. Su ubicación es enterrada. En la Figura No. 11 se muestra un esquema general de una trampa de aceite.

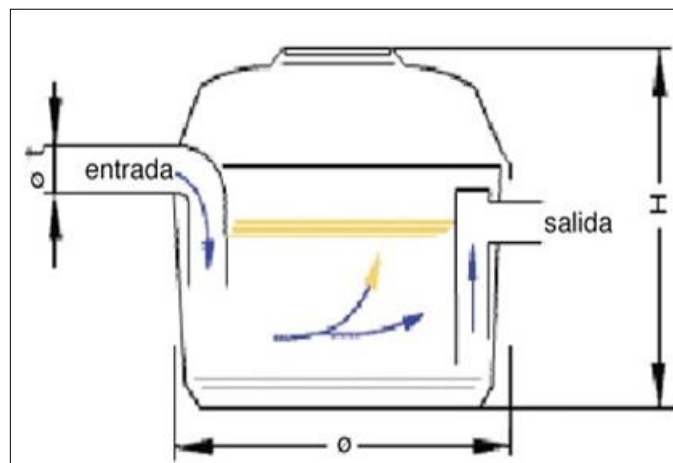


Figura No. 11. Trampa de aceite. Fuente: IMP, 2016.

4.6. SEPARADORES DE PLACAS

Una opción para aumentar la eficacia de los separadores tipo API es darles un mayor tiempo de retención. A medida que las plantas han incrementado su capacidad de producción y, en consecuencia, su generación de aguas residuales es preciso aumentar el tamaño o el número de los separadores tipo API.

Con el fin de aumentar el rendimiento y la capacidad de estos procesos, se desarrollaron los separadores de placas, que aumentan los rendimientos de operación. En la Figura No. 12 se presenta un esquema general de un separador de placas.

Entre las ventajas que presentan los separadores de placas, se encuentran:

- Aumenta la superficie de separación de las grasas y aceites, lo que lleva consigo una reducción importante en el ahorro del terreno preciso para su instalación.
- Se generan menos turbulencias lo que conlleva una disminución de la posibilidad de formación de cortacircuitos hidráulicos.
- Requieren menor tiempo de retención.

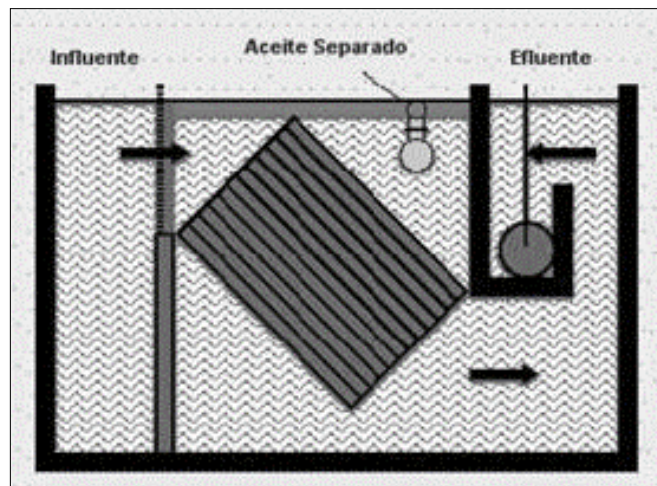


Figura No. 12. Separador de placas. Fuente: Cárdenas, 2015.

4.7. TANQUES GRAVIMÉTRICOS

Un problema que presentan los separadores de grasas y aceites tipo API, y en menor medida los de placas, es que presentan elevadas superficies cubiertas de hidrocarburos, lo que da lugar a su evaporación, sobre todo en verano, y, en consecuencia, la aparición de olores, así como atmósferas contaminadas, insalubres y peligrosas.

A mediados de los años ochenta, en EE. UU. se comenzaron a utilizar un nuevo tipo de separadores por gravedad, los denominados tanques gravimétricos, que básicamente constan de:

- Tanque de forma cilíndrica, construido en acero al carbono, cerrado por su parte superior mediante techo fijo o flotante.
- Skimmer flotante sobre boyas para separación de la capa de aceite separada en superficie, unido al exterior del tanque mediante una línea flexible o bien con tubería metálica provista de una rótula, que permita el movimiento del skimmer cuando haya variaciones en el nivel de líquido en el tanque.
- Sistema de evacuación de los gases desprendidos hasta la antorcha de la instalación.

Entre las ventajas que presentan los tanques gravimétricos frente a los otros tipos de separadores, se encuentran:

- Al disponer de un volumen elevado, además de la separación de aceites, tiene lugar una cierta capacidad de homogeneización del influente, lo que redundará en una mayor eficacia de los tratamientos posteriores.
- La posibilidad de dosificación en la línea de alimentación (zona de máxima turbulencia) de algún producto con propiedades desemulsionantes, que va a mejorar el rendimiento de separación de aceites.

Es frecuente en estos equipos llevar a cabo la dosificación de ácido sulfúrico diluido para ajustar el pH ligeramente ácido como agente desemulsionante. Debe tenerse en cuenta que habitualmente las aguas residuales del refino del petróleo son alcalinas.

- Al no tener partes mecánicas móviles, como ocurre en los separadores API, las necesidades de mantenimiento son mínimas.

- Pueden trabajar a nivel fijo o bien a nivel variable, lo que posibilita en este último caso que actúen como tanque de regulación de caudal.
- Eliminan una parte muy importante de la contaminación atmosférica generada por la evaporación de aceites en la planta de tratamiento, así como aumentan de forma notable la seguridad y salubridad de las instalaciones.
- El mayor problema que presentan estos equipos es su elevado costo de primera instalación, muy superior a cualquiera de los sistemas mencionados con anterioridad.

CAPÍTULO V. RESULTADOS

El presente trabajo fue realizado tomando como base un Sistema de Efluentes primario (separadores API y fosas de retención) de una Refinería, localizada en las costas de la República y con descarga a un río que pasa a la margen izquierda de la Refinería. Los efluentes generados en una Refinería reciben un tratamiento primario en donde se les eliminan los hidrocarburos y lodos presentes, después las aguas residuales son descargadas al cuerpo de agua. Este tratamiento primario se realiza en separadores del tipo API. Las pruebas experimentales se realizaron con el agua residual procedente de la Refinería “Lázaro Cárdenas del Río”, en la Ciudad de Minatitlán, Veracruz.

La refinería cuenta con un sistema de tratamiento primario el cual recibe el agua residual procedente del drenaje aceitoso y del drenaje pluvial. Posteriormente el agua tratada se envía a una planta de tratamiento biológico operada por la empresa Grupo EMA, S. de R.L. de C.V. conocida como GEMA, esta empresa devuelve el agua tratada a la refinería con la calidad necesaria para su utilización en los sistemas de enfriamiento.

Las descargas que la refinería vierte al canal deben cumplir con la normatividad vigente en materia de agua (NOM-001 SEMARNAT-2021). Además, la refinería tiene establecidos límites máximos de contaminantes en sus descargas como parte de su control interno, los cuales fueron fijados en convenio con la empresa GEMA. Los parámetros y sus valores se muestran en la Tabla No. 14.

Tabla No. 14. Características del agua establecida en la Refinería y límites máximos permisibles de acuerdo con la NOM-001-SEMARNAT-2021.

Parámetro	Condiciones de la Planta GEMA			Descarga de la Refinería	
	Influente de Refinería	Influente Laguna de Patos	Efluente tratado en GEMA	Límite máximo permisible NOM-001-SEMARNAT-2021	Límites máximos establecidos por la refinería

				(P.M)	
Flujo nominal, L/s	105	35	133		
Flujo mínimo, L/s	105	10	109		58
Flujo máximo, L/s	105	49	146		139
Ca (ppm CaCO ₃)	360	200-300	120		
Mg (ppm CaCO ₃)	300	80-180	60		
Na (ppm CaCO ₃)	1000	100-175	60		
HCO ₃ ⁻ (ppm CaCO ₃)	240	140-170	98		
CO ₃ ⁼ (ppm CaCO ₃)	100	20-30	15		
Cr (ppm CaCO ₃)	560	85-130	53		
SO ₄ ⁼ (ppm)	960	140-300	75		
DT (ppm CaCO ₃)	850	280-480	180		
DC (ppm CaCO ₃)	340	160-200	0		
STD (ppm)	2156	500-822	255-300		
SST (ppm)	30	19	0	40/60 (75/125)	120
SiO ₂ (ppm)	45	18	12		
Fenoles (ppm)	6	0	-		
N-NH ₃ (ppm)	21	0	0.04	15	
Coliformes Fecales (NMP/100 ml)	40000	-	0		
Conductividad (mmhos/cm)	2800	-	600-800		
SAAM (ppm)	82	-	0		
DBO total (ppm)	85	2	15		
DQO total (ppm)	470	40	45	30	
G y A (ppm)	70	0	0	15	20
pH	6 a 9	8.3	6.8	5 a 10	7 a 9
S ⁼ (ppm)	30	-	0.5		
PO ₄ ⁼ (ppm)	30		0.5	5	
Color (unidades Pt-Co)	No se incluyen				100
Temperatura °C	No se incluyen			40	

Condiciones climatológicas:

Presión Atmosférica:	760 mm Hg
Humedad Relativa:	89% Máxima 51% Mínima
Dirección de los vientos reinantes: dominantes:	SE a NO Dirección de los vientos NE a SO
Velocidad de los vientos:	Media anual de 10 a 30 Km/h Máxima de 210 Km/h
Temperatura máxima extrema:	38°C
Temperatura mínima extrema:	2°C
Temperatura máxima promedio:	32°C
Temperatura mínima promedio:	16°C
Temperatura de bulbo húmedo promedio:	28°C
Precipitación pluvial máx. en 24 hrs:	210 mm
Precipitación pluvial máx. en 1 hora:	72 mm
Atmósfera:	Corrosiva, ambiente húmedo y salino, con contaminantes de gases ácidos.
Zona sísmica:	Cero (sin daños).

Descripción del Sistema de Efluentes: Los efluentes generados por una refinería, así como los resultantes de las precipitaciones pluviales son conducidos hasta las unidades de tratamiento de los drenajes, de los Sistemas 1, 2 y 3; en donde se les elimina un alto porcentaje de los hidrocarburos y lodos que arrastran, para finalmente enviar las aguas residuales al río.

La separación de agua, hidrocarburos y lodos se efectúa en separadores tipo API y uno de placas corrugadas; aprovechando la diferencia entre las densidades de los fluidos a separar. En estos separadores se tiene un tiempo de residencia suficiente

para lograr que los hidrocarburos floten en la superficie y los lodos precipiten hacia el fondo del separador.

Los hidrocarburos que flotan en la superficie son removidos por tubos desnatadoras hacia cárcamos de bombeo y posteriormente enviados a tanques de aceite recuperado para su reproceso. El agua de la interfase rebosa en el extremo de salida de los separadores. Periódicamente los separadores deben salir de operación para extraer los lodos acumulados en el fondo. En la Figura No. 13 se muestra un diagrama de distribución del sistema.

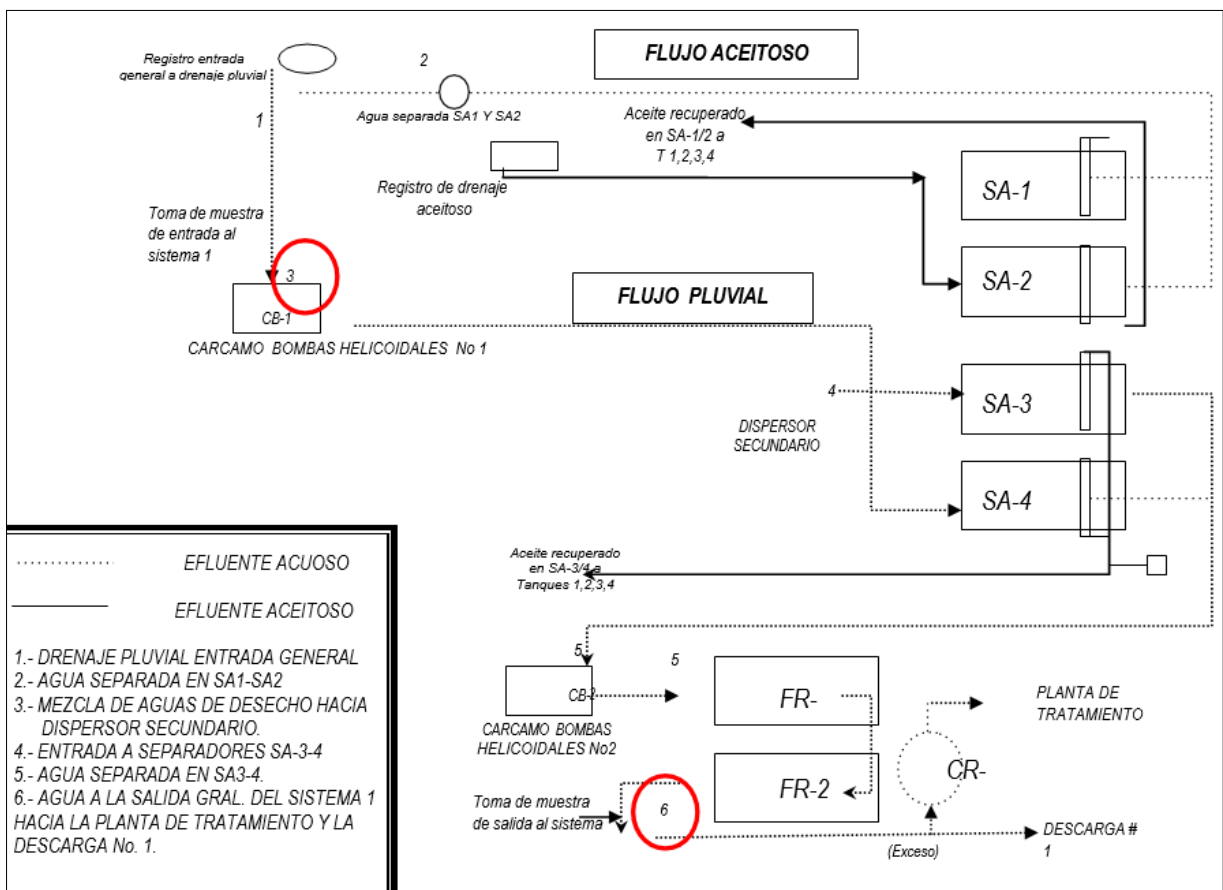


Figura No. 13. Puntos de muestreo en el Sistema 1. Fuente: Popio, 2021.

A continuación, se describe el funcionamiento del sistema 1 mostrado en la Figura No. 13. El drenaje pluvial procedente del área de las plantas de proceso se recibe directamente en el Sistema 1, en el cárcamo regulador CR-1 lado norte y el

agua separada se alimenta a los separadores API-SA-3 y API-SA-4 mediante las bombas de tornillo del cárcamo CB-1.

El drenaje aceitoso procedente del área de las plantas de proceso se recibe directamente en los separadores API-SA-1 y API-SA-2, el agua separada se envía al cárcamo de bombeo CB-1 para alimentarse mediante las bombas de tornillo a los separadores API-SA-3 y API-SA-4. El agua separada de los API-SA-3 y API-SA-4 se envía por ducto al cárcamo de bombeo CB-2 para posteriormente alimentar mediante bombas de tornillo a las fosas de retención FR-1 y FR-2, de donde el agua separada libre de hidrocarburos se envía al cárcamo CR-3 y de aquí se bombea a una planta tratadora, el exceso va al canal de descarga No. 1 con destino final al río.

El aceite recuperado de cada uno de los separadores API en el Sistema 1 se envía a los tanques T-1, 2, 3 y 4. En la Figura No. 14 se tiene el diagrama del sistema 2 y se indican los puntos de muestreo. Los efluentes del Sistema 2 de tanques son enviados al separador API correspondiente. Actualmente, el agua separada se envía mediante bombeo de achique a la interconexión con la línea de drenaje pluvial de la casa de bombas 8 y finalmente al ducto de salida del drenaje pluvial de la descarga No. 2 hacia el río.

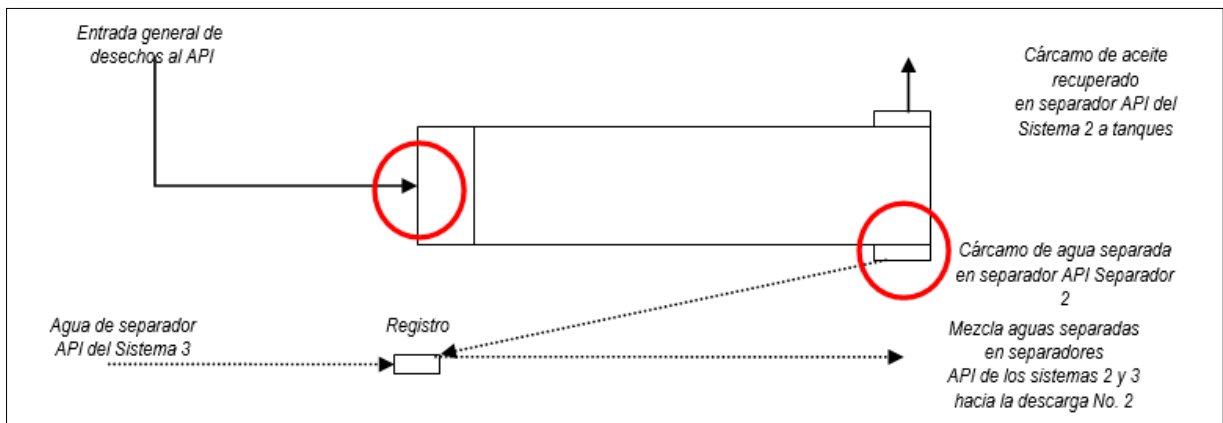


Figura No. 14. Puntos de muestreo en el Sistema 2. Fuente: Propio, 2021.

En caso de contingencias por lluvia se utilizan bombas de achique de mayor capacidad para desalojar el agua de salida del separador API hacia las fosas de retención de la descarga No.2.

En la Figura No. 15 se muestran los elementos del sistema 3 y se indican los puntos de muestreo. Los efluentes del Sistema 3 provenientes de la sección de tanques de crudo se envían al tanque deshidratador Gun – Barrel el agua purgada va al separador API. El agua separada se envía a la interconexión del ducto del drenaje pluvial (colector numero 5) que, a termina en la salida de la descarga No. 2 hacia el río.

El aceite recuperado se envía mediante bombeo hacia tanques de recibo de crudo. Periódicamente se programa la salida de operación de los separadores API para llevar a cabo la extracción de lodos y limpieza general de sus celdas o secciones.

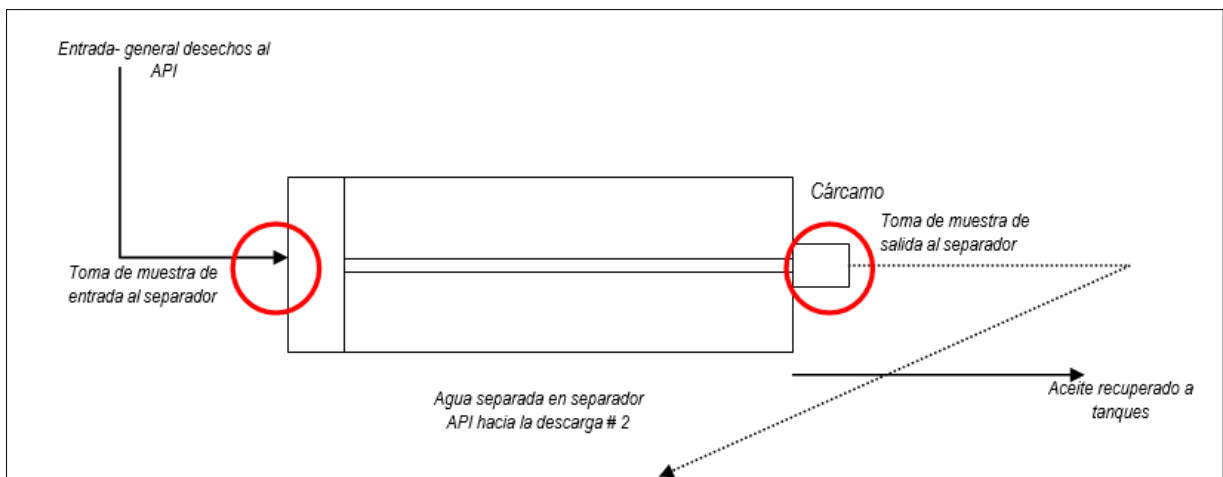


Figura No. 15. Puntos de muestreo en el Sistema 3. Fuente: Propio, 2021.

Condiciones de operación de los separadores: Las condiciones de trabajo de los diferentes separadores se mencionan en la Tabla No. 15, a continuación:

Tabla No. 15. Capacidad de alimentación en cada Separador API. Fuente: Propio, 2021.

Separador	Capacidad de alimentación
API-SA-1	2250 gal/min

API-SA-2	2250 gal/min
API-SA-3	3000-4500 gal/min
API-SA-4	3000-4500 gal/min
API-SA-1 (sistema 2)	2500-3000 gal/min
API-SA-1 (sistema 3)	4755 gal/min

Condiciones comunes de operación en los separadores.

Presión: Atmosférica.
 Temperatura Normal: 32°C
 Temperatura Mínima: 23°C
 Temperatura Máxima: 38°C

Características típicas de los fluidos: En las Tablas No. 16, 17 y 18 se mencionan las características de cada equipo.

Tabla No. 16. Corrientes de entrada. Fuente: Propio, 2021.

Separadores	pH	% de Hidrocarburo
API-SA-1	6 - 8	10 - 15
API-SA-2	6 - 8	10 - 15
API-SA-3	6 - 8	2 - 8
API-SA-4	6 - 8	2 - 8
API del Sistema 2	6 - 8	30 - 50
API del Sistema 1	6 - 8	10 - 15

Tabla No. 17. Aceites recuperados. Fuente: Propio, 2021.

Separadores	Gravedad Específica	Flujo Estimado	Viscosidad
API-SA-1	0.860 - 0.925	200 gal/min	24 - 28 cP
API-SA-2	0.860 - 0.925	200 gal/min	24 - 28 cP
API-SA-3	0.860 - 0.925	200 gal/min	24 - 28 cP
API-SA-4	0.860 - 0.925	200 gal/min	24 - 28 cP

API del Sistema 2	0.860 - 0.925	200 gal/min	24 - 28 cP
API del Sistema 3	0.860 - 0.925	200 gal/min	24 - 28 cP

Tabla No. 18. Lodos. Fuente: Propio, 2021.

Separadores	Gravedad Especifica	Cantidad delodos	Viscosidad de loslodos	% Sólidos
API-SA-1	1.0 - 1.3	150 gal/min	40 cP	15 - 30 % en peso
API-SA-2	1.0 - 1.3	150 gal/min	40 cP	15 - 30 % en peso
API-SA-3	1.0 - 1.3	150 gal/min	40 cP	15 - 30 % en peso
API-SA-4	1.0 - 1.3	150 gal/min	40 cP	15 - 30 % en peso
API del Sistema 2	1.0 - 1.3	150 gal/min	40 cP	15 - 30 % en peso
API del Sistema 3	1.0 - 1.3	150 gal/min	40 cP	15 - 30 % en peso

Definición de los puntos de toma de muestra:

Los puntos de muestreo deben de ser representativos de todo el sistema a evaluar y los puntos de dosificación propuestos para el tratamiento del efluente influyen directamente en el efecto de cada uno de los agentes químicos aplicados a las corrientes a tratar. Los resultados del análisis de las pruebas de jarras no proporcionarían datos confiables si el muestreo no se realiza adecuadamente, y tomando en cuenta entre otros factores los que a continuación se indican:

- Capacidad de operación de la planta
- Programas de limpieza en las fosas de retención

Sistema 1:

El sistema 1 recibe carga del drenaje pluvial y aceitoso de plantas de proceso, tiene una capacidad de operación de:

- Máximo 12,000 m³/día
- Normal 8,000 m³/día
- Mínimo 5,000 m³/día

En esta área se realizaron tomas de muestra en dos puntos de la planta:

- A la entrada del cárcamo de bombeo CB-1
- A la salida de la fosa de retención FR-2.

Sistema 2:

El Sistema 2 tiene una capacidad de: Máximo 2,000 m³/día.

- Normal 1,000 m³/día.
- Mínimo 200 m³/día.

En este separador API se recibe efluente de los tanques ubicados en el patio poniente de la Refinería. En el sistema 2 se efectuó una serie de tomas de muestra para la realización de pruebas similar a la del sistema 1.

Sistema 3:

El sistema 3 recibe efluentes de la sección tanques de crudo y del agua purgada del tanque deshidratador Gun Barrel, este sistema tiene una capacidad de operación de:

- Máximo 2,000 m³/día.
- Normal 1,000 m³/día.
- Mínimo 200 m³/día.

En el caso del Patio Norte se realizaron tomas de muestra en los siguientes puntos:

- El punto de entrada al separador API se tomó como entrada de efluente al sistema 3.
- La salida del separador API se consideró como salida del separador API del sistema 3.

A continuación, se presentan nuevamente las Figuras No. 16, 17 y 18 para ubicar los puntos de muestreo en cada uno de los sistemas.

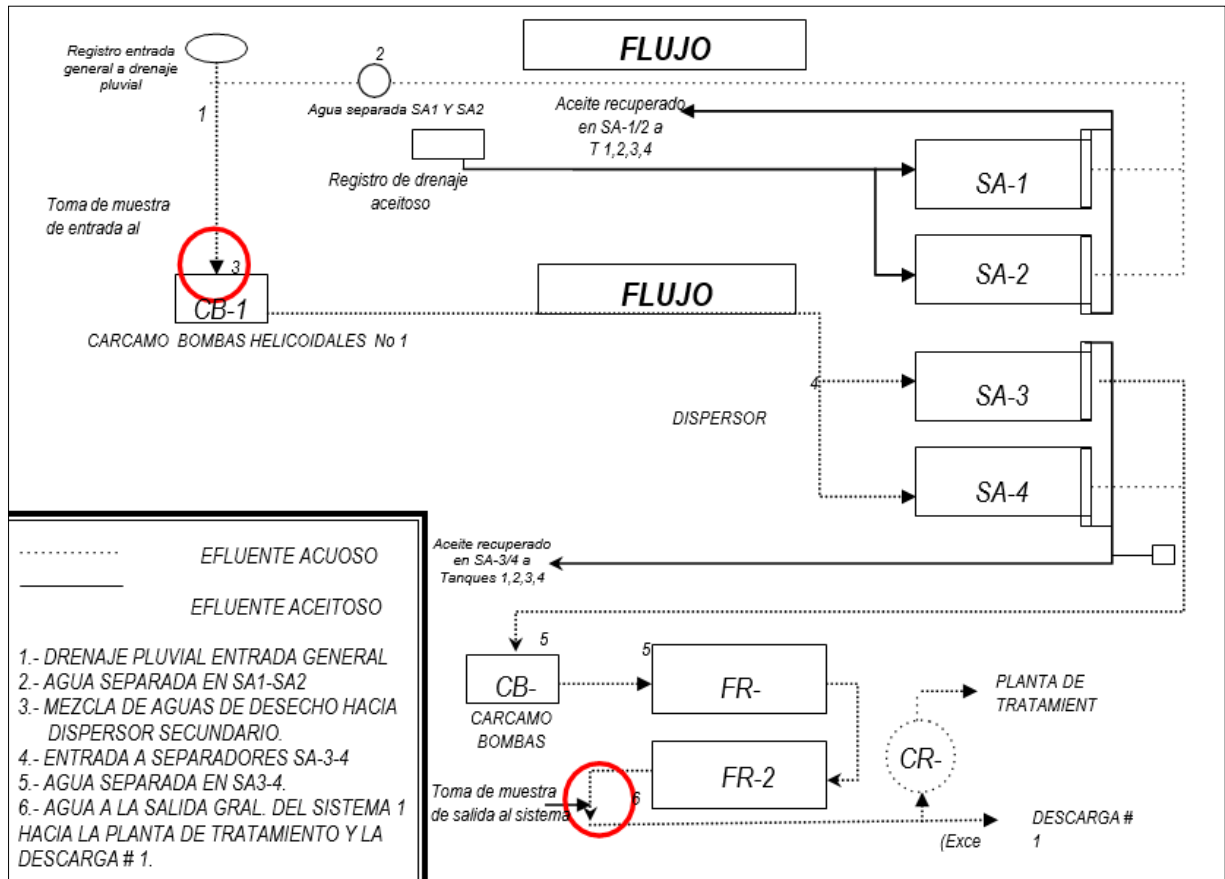


Figura No. 16. Puntos de muestreo en el Sistema 1. Fuente: Propio, 2021.

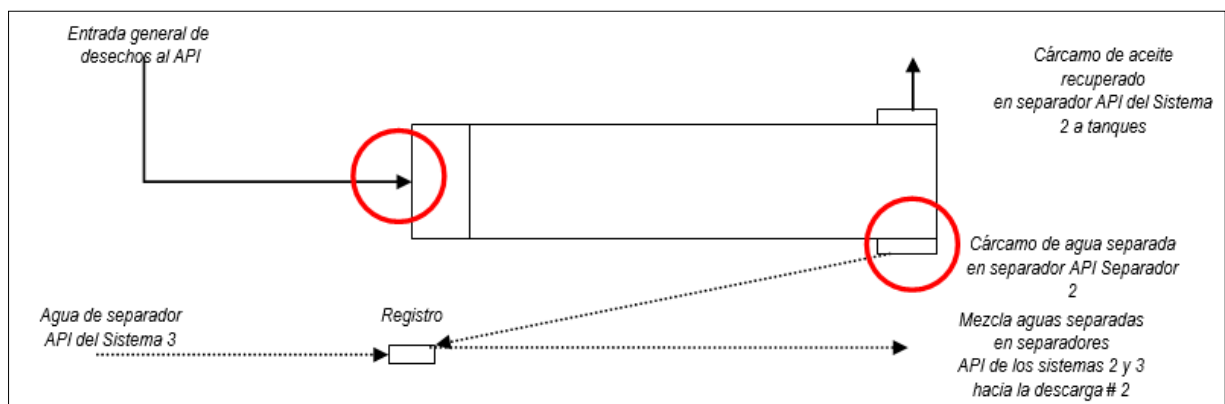


Figura No. 17. Puntos de muestreo en el Sistema 2. Fuente: Propio, 2021.

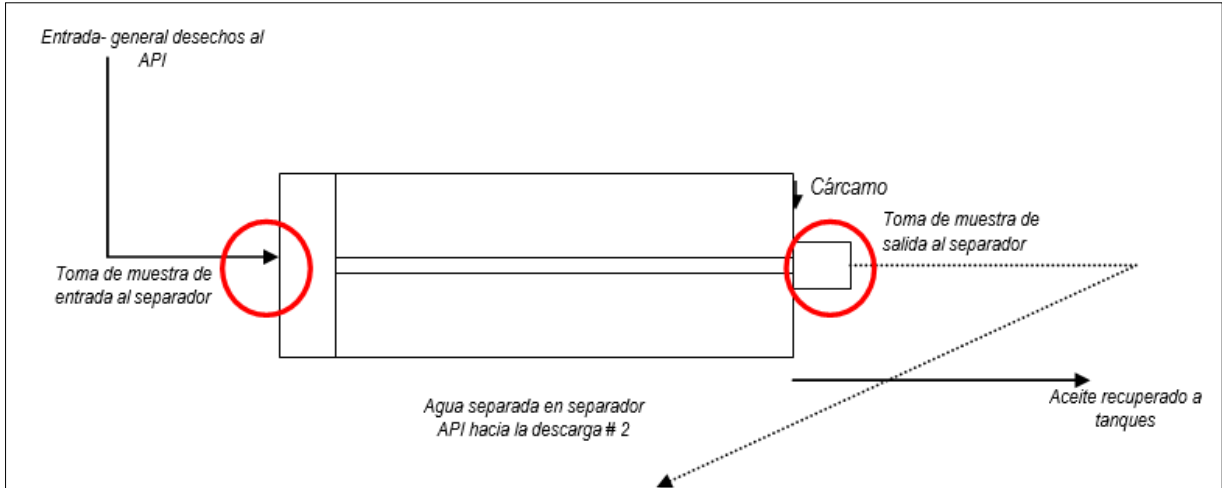


Figura No. 18. Puntos de muestreo en el Sistema 3. Fuente: Propia, 2021.

Productos químicos: Al definirse los puntos de muestreo tanto a la entrada como a la salida de cada uno de los tres sistemas de efluentes de la Refinería, se realizó la dosificación de los productos coagulante y floculante para el tratamiento químico aplicado al efluente.

Agente Coagulante: El agente coagulante aplicado al sistema de efluentes debe cumplir con lo establecido por la Refinería para las descargas de esta corriente, las especificaciones y metodología se reportan en la Tabla No. 19:

Tabla No. 19. Especificaciones de los efluentes de una refinería. Fuente: PEMEX, 2021.

Parámetro	Método	Especificación
Grasas y Aceites (G y A)	Espectrofotométrico	20 ppm Máx.
Color	Espectrofotométrico	100 Pt-Co máx.
Sólidos Suspendidos Totales (SST)	Espectrofotométrico	120 ppm máx.

Además de la medición de los parámetros expuestos en la tabla anterior se tomó en cuenta otros dos criterios de selección para el agente coagulante, los cuales son ruptura de emulsión y separación de hidrocarburos, estos se describen a continuación:

RUPTURA DE EMULSIÓN

Clasificación	Apariencia
1	Completo rompimiento de la emulsión
2	Rompimiento de la emulsión con trazas de hidrocarburo en el agua.
3	Emulsión sin rompimiento completo, separación parcial del hidrocarburo.
4	Sin rompimiento de emulsión, no existe separación de hidrocarburos.

SEPARACIÓN DE HIDROCARBURO

Clasificación	Apariencia
1	Completa separación del hidrocarburo y el agua, definición de las dos fases.
2	Pequeñas trazas de hidrocarburo en la fase acuosa.
3	Existencia de emulsión y/o contenido de hidrocarburo en la fase acuosa o adheridas en las paredes del vaso de precipitado.
4	Completa emulsión sin distinción de fases definidas.

El desempeño del agente coagulante se evaluó de acuerdo con el Método de jarras, utilizando como medio de prueba muestra de carga al Sistema de Efluentes de la Refinería, considerando que, en las cargas a dicho sistema, se observan concentraciones de contaminantes muy variables, teniendo en promedio en las muestras trabajadas los siguientes valores:

Sólidos Suspendidos Totales	210.36 ppm
Grasas y Aceites	135.21 ppm
Color	71.93 unidades de Pt-Co

Esta evaluación permitió establecer la capacidad de coagulación y rompimiento de la emulsión inversa hidrocarburo – agua en las cargas a los sistemas de efluentes de la refinería. Las condiciones de prueba son las siguientes:

Temperatura	ambiente
Tiempo	16 minutos
Agitación	120 ± 30 rpm

Finalizadas las pruebas aplicando el coagulante se seleccionó el coagulante que aportó los mejores rendimientos, los resultados se muestran en la Tabla No. 20:

Tabla No. 20. Resultados de la aplicación del Agente Coagulante. Fuente: Propia, 2021.

Compuesto Químico	Ruptura de emulsión	Separación de hidrocarburo	Dosificación ppm	G y A (20 ppm máx.)	Sólidos (120 ppm máx.)	Color 100 Pt-Co
Coagulante A	1	1	70	18	16	25

* Coagulante A.- Coagulante Catiónico de un peso molecular de entre 3 y 5 millones de una

Agente floculante: En el caso del agente floculante aplicado al sistema de efluentes se toma también como base lo indicado en la Tabla No. 19 Especificaciones de los efluentes de una Refinería. Además de la medición de los parámetros expuestos en la tabla antes citada, se considera otros dos criterios para la selección del agente floculante, los cuales se describen a continuación:

TAMAÑO DE FLÓCULO

Clasificación	Apariencia
1	Flóculo grande, definido
2	Flóculo grande con pocos flóculos de menor tamaño.
3	Flóculo disperso sin un volumen definido.
4	No existe la formación de un flóculo estable.

CLARIFICACIÓN DEL AGUA

Clasificación	Apariencia
1	Ausencia generalizada de partículas suspendidas en la fase acuosa.

- 2 Pequeñas partículas suspendidas en la fase acuosa.
- 3 Partículas suspendidas visiblemente notorias y de tamaño regular.
- 4 Fase acuosa saturada de partículas suspendidas.

Se evaluó el comportamiento del agente floculante de acuerdo con el método de jarras, utilizando como medio de prueba muestra de carga al Sistema de Efluentes de la Refinería. Finalizadas las pruebas aplicando el floculante, el que mejores resultados proporcionó se reportan en la Tabla No. 21:

Tabla No. 21. Resultados de la aplicación del Agente Floculante. Fuente: Propia, 2021.

Compuesto Químico	Ruptura de emulsión	Separación de hidrocarburo	Dosificación ppm	G y A (20 ppm máx.)	Sólidos (120 ppm máx.)	Color 100 Pt-Co
Floculante A	1	1	1.9	18	55	71

* Floculante A.- Acrilato-acrilamida aniónica, peso molecular de entre 15 a 25 millones de uma.

Desempeño del Agente Coagulante y Floculante en función del pH: Posteriormente a seleccionar el mejor coagulante y floculante se procede a evaluar su respuesta, para lo cual se manejaron diferentes valores de pH, un parámetro importante ya que los efluentes varían normalmente en este valor, obteniéndose el siguiente rango de operación óptimo de éstos, los cuales se muestran en las siguientes Tablas No. 22 y 23.

Tabla No. 22. Funcionalidad del Agente Coagulante a diferentes valores de pH. Fuente: Propia, 2021.

pH del efluente	Ruptura de Emulsión	Separación de Hidrocarburo	Dosificación ppm	Grasas y Aceites (20 ppm máx.)	Sólidos Totales Disueltos (120 ppm máx.)	Color (100 Pt-Co máx.)
6.00	1	2	40	15	87	81
7.00	1	2	40	12	58	31
8.00	1	1	40	18	46	46
9.00	1	1	40	12	55	54
10.00	1	1	40	6	38	62

11.00	2	1	40	11	51	71
12.00	1	1	40	14	67	88
13.00	2	2	40	13	104	94

Tabla No. 23. Funcionalidad del Agente Floculante a diferentes valores de pH. Fuente: Propia, 2021.

pH del efluente	Tamaño de floculo	Clarificación del agua	Dosificación ppm	Grasas y Aceites (20 ppm máx.)	Sólidos Totales Disueltos (120 ppm máx.)	Color (100 Pt-Co máx.)
6.00	1	2	2	15	87	81
7.00	1	2	2	12	58	31
8.00	1	1	2	18	46	46
9.00	1	1	2	12	55	54
10.00	1	1	2	6	38	62
11.00	2	1	2	11	51	71
12.00	1	1	2	14	67	88
13.00	2	2	2	13	104	94

Como se puede observar en las tablas anteriores, ambos productos tienen una aceptable eficiencia en rangos de pH de 6 a 13, notándose que su mejor funcionalidad la alcanzan entre valores de pH que van de 7 a 11.

Prueba de funcionamiento en sitio para cada uno de los sistemas: En el laboratorio de campo, se determinó a cada muestra el contenido de grasas y aceites, sólidos suspendidos, color y turbidez, aplicando técnicas espectrofotométricas. Así mismo, a las muestras de entrada se les aplicó la prueba de jarra dosificando 70 ppm del agente coagulante y 5 ppm del agente floculante y se determinaron los parámetros de control al agua clarificada.

Con los datos obtenidos en las muestras de entrada, salida y los obtenidos después de dosificar los productos químicos, se calculó el por ciento de eficiencia de acuerdo con la fórmula:

$$\% = \frac{V_E - V_T}{V_E} (100)$$

$$\% = \frac{V_E - V_S}{V_E} (100)$$

Donde:

V_E = Valor de la muestra a la entrada.

V_S = Valor de la muestra a la salida.

V_T = Valor en la muestra tratada con productos IMP.

Los resultados obtenidos se encuentran en las Tablas No. 24, 25 y 26.

Tabla No. 24. Sistema 1, parámetros de control en el agua clarificada. Fuente: Propia, 2021.

Punto de muestreo	Dosificación en prueba de jarra (ppm)		Vol. de aceite separado (%)	Turbiedad s/especif.		Solidos Susp. (120 ppm máx)		Grasas y aceites (20 ppm máx.)		Color (100 Pt-Co máx.)	
	Coagulante	Floculante		FTU	% Reduc.	ppm	% Reduc.	ppm	% Reduc.	Pt-Co	% Reduc.
Entrada a la Planta			6	156		263		225		74	
Salida de la Planta				59	62.2	76	71.1	35	84.4	42	43.2
Con Tratamiento	70	5	10	32	79.5	43	83.6	25	88.8	9	87.8
Entrada a la Planta			9	76		117		40		66	
Salida de la Planta				52	31.6	59	50.4	38	5	49	25.7
Con Tratamiento	70	5	12	12	84.3	16	86.3	25	37.5	6	90.9

Tabla No. 25. Sistema 2, parámetros de control en el agua clarificada. Fuente: Propia, 2021.

Punto de muestreo	Dosificación en prueba de jarra (ppm)		Vol. de aceite separado (%)	Turbiedad s/especif.		Solidos Susp. (120 ppm máx)		Grasas y aceites (20 ppm máx.)		Color (100 Pt-Co máx.)	
	Coagulante	Floculante		FTU	% Reduc.	ppm	% Reduc.	ppm	% Reduc.	Pt-Co	% Reduc.
Entrada a la Planta			25	461		686		4700		511	
Salida de la Planta				308	33.2	355	48.2	105	97.7	260	49.1
Con Tratamiento	70	5	30	34	92.6	30	95.6	50	98.9	32	93.7
Entrada a la Planta			5	194		204		850		440	
Salida de la Planta				122	37.1	189	7.4	300	64.7	334	24.1

Con Tratamiento	70	5	5	39	79.9	38	81.4	59	93	162	63.2
Entrada a la Planta			10	766		1110		1425		1078	
Salida de la Planta				236	69	395	64.4	900	36.8	300	72.1
Con Tratamiento	70	5	15	112	85.3	132	88.1	50	96.4	326	69.7
Entrada a la Planta			10	1215		2145		900		1915	
Salida de la Planta				720	40.7	468	78.1	400	55	1845	3.6
Con Tratamiento	70	5	13	675	44	427	80	75	91.6	1650	13.8

Tabla No. 26. Sistema 3, parámetros de control de agua clarificada. Fuente: Propia, 2021.

Punto de muestreo	Dosificación en prueba de jarra (ppm)		Vol. de aceite separado (%)	Turbiedad s/especif.		Solidos Susp. (120 ppm máx)		Grasas y aceites (20 ppm máx.)		Color (100 Pt-Co máx.)	
	Coagulante	Floculante		FTU	% Reduc.	ppm	% Reduc.	ppm	% Reduc.	Pt-Co	% Reduc.
Entrada a la Planta			2	66		66		420		185	
Salida de la Planta			N/O	43	34.8	58	12.1	30	92.8	33	82.2
Con Tratamiento	70	5	3	6	90.9	4	93.9	5	98.8	10	94.6
Entrada a la Planta			5	141		240		250		50	
Salida de la Planta				22	84	24	90	12	95.2	46	8
Con Tratamiento	70	5	5	15	89.3	12	95	2	99.2	17	66
Entrada a la Planta	NO FUE REPRESENTATIVA LA MUESTRA DE ENTRADA A LA PLANTA, DEBIDO A QUE ESTA CONTENIA EN SU TOTALIDAD ACEITE.										
Salida de la Planta											
Con Tratamiento											
Entrada a la Planta			5	73		108		150		38	
Salida de la Planta			0	41	43.8	47	56	30	80	36	5.2
Con Tratamiento	70	5	8	13	82.1	20	81.4	25	83.3	10	73.6

Optimización de las condiciones en campo: Realizadas las pruebas de jarras con corrientes frescas de la Refinería se llevó a cabo la optimización de la dosificación de los productos químicos y se comprobaron los resultados utilizando muestras frescas, se trabajó en el laboratorio de campo y en el laboratorio de Sede en la ciudad de México. La dosificación utilizada en estas pruebas fue de 40 ppm del coagulante y 4 ppm del floculante. Los resultados se muestran en la Tabla No. 27.

Los resultados obtenidos de acuerdo con la Tabla No. 27 indican que el agua clarificada está dentro de la especificación de los parámetros de control que requiere la Refinería, teniendo resultados similares tanto en el laboratorio de campo como en el de Sede.

Tabla No. 27. Optimización de las dosificaciones. Fuente: Propia, 2021.

Sistema muestreado	Punto de muestreo	Dosificación en prueba de jarra (ppm)		Vol. de aceite separado (%)	Turbiedad s/especif.		Solidos Susp. (120 ppm máx)		Grasas y aceites (20 ppm máx.)		Color (100 Pt-Co máx.)	
		Coagulante	Floculante		FTU	% Reduc.	ppm	% Reduc.	ppm	% Reduc.	Pt-Co	% Reduc.
Sistema 1 (Lab Campo)	Entrada a la Planta				98		121		275		82	
	Con Tratamiento	40	4	8	15	84.7	5	95.9	20	92.7	12	85.4
Sistema 1 (Lab Sede)	Entrada a la Planta				112		128		287		87	
	Con Tratamiento	40	4	8	15	86.6	4	96.9	22	92.3	14	83.9
Sistema 2 (Lab Campo)	Entrada a la Planta				125		184		312		85	
	Con Tratamiento	40	5	12	16	87.2	12	93.5	18	94.2	22	74.1
Sistema 2 (Lab Sede)	Entrada a la Planta				85		128		162		52	
	Con Tratamiento	40	5	8	13	84.7	22	82.8	16	90.1	20	61.5
Sistema 3 (Lab Campo)	Entrada a la Planta				760		1170		2350		3150	
	Con Tratamiento	40	3	12	36	95.3	40	96.6	10	99.6	112	96.4
Sistema 3 (Lab Sede)	Entrada a la Planta				930		1270		2350		5190	

	Con Tratamiento	40	3	8	40	95.7	17	98.7	10	99.6	200	96.1
--	--------------------	----	---	---	----	------	----	------	----	------	-----	------

5.1. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Para la evaluación y durante el desarrollo del tratamiento químico aplicado al sistema de efluentes de la refinería, se realizaron algunas adecuaciones, las cuales comprenden los siguientes puntos:

- **Sistemas de Inyección.** Para la dosificación de los productos químicos (agentes coagulante y floculante) se optimizaron los sistemas de inyección que permitieran incrementar la eficiencia de éstos al ser incorporados a la corriente de carga de los sistemas de efluentes de la Refinería.
- **Optimización de los puntos de dosificación.** Se propuso un punto adicional de dosificación en cada sistema, lo que permitió una mejor distribución de los productos químicos y con ello una mejor eficiencia de funcionalidad de estos.
- **Optimización de la operación de los separadores tipo API y el de placas.** De la optimización tanto de los sistemas de inyección de los productos químicos aplicados en el sistema de efluentes como de la adición de puntos de dosificación a los ya manejados, se logró mejorar el rendimiento de operación de los separadores tipo API y el de placas con los que cuenta la refinería y con ello mejorar el proceso de recuperación de aceite y el clarificado de las aguas.

Finalmente se logra disminuir los contaminantes presentes en el efluente y con ello mejorar la calidad del agua residual para su descarga en los cuerpos receptores y/o su reúso.

CONCLUSIONES

Para el caso particular de la Industria de Refinación del Petróleo se debe tener especial atención en el funcionamiento del tratamiento primario que se aplica a los efluentes de este sector industrial a fin de disminuir el impacto ambiental que estos tengan al ser descargados a los cuerpos receptores. La selección de los productos químicos integrantes del tratamiento químico (agente coagulante y floculante) que fueron aplicados al sistema de efluentes de la refinería, evidenció una mejora en el desempeño de estos.

Los resultados obtenidos mediante las pruebas de jarras realizadas con muestras de los efluentes de la refinería in situ permitieron corroborar que los productos seleccionados de coagulante y floculante efectivamente trabajan logrando elevar la eficiencia en la separación de hidrocarburos. Un elemento importante en la valoración de productos químicos por pruebas de jarras es la selección de los puntos de muestreo los cuales deben de ser representativos de todo el sistema a evaluar.

La correcta aplicación de los productos químicos que en este caso fue inyección de los productos previa disolución, al sistema de efluentes ayudó a obtener valores para grasas y aceites, turbidez, sólidos suspendidos y color, por debajo de los que se estaban presentando en los mismos sistemas de efluentes sin contar con un tratamiento químico. La adecuada distribución de los puntos de dosificación, considerando su distribución en el plano de la refinería, permitió que se favoreciera la eficiencia de éstos en el efluente y con ello un mejor rompimiento de las emulsiones inversas hidrocarburo – agua mejorando la calidad de separación de las fases tanto acuosa como la de hidrocarburo.

La adecuada aplicación de un tratamiento químico que fue establecido en función de las características propias del efluente a tratar deriva en una mayor recuperación de aceite crudo y en el clarificado de las aguas, el primero pudiéndose retornar al proceso de refinación y las segundas con una mejor calidad para su reuso.

BIBLIOGRAFÍA

- Álvarez, Joel. *Los orígenes de la industria petrolera en México 1900 – 1925*.
- Andía, Yolanda. *Tratamiento de agua: Coagulación y Floculación, SEDAPAL Evaluación de Plantas y Desarrollo Tecnológico. Perú, Lima, Abril del 2015*.
- Betz Laboratories, Inc., *Water Chemistry (Effluent Treatment). USA 1992*.
- Comisión Nacional del Agua, *Inventario Nacional de Plantas de Tratamiento. Ciudad de México, 2021*.
- Comisión Nacional del Agua, *Diagnósticos de las acciones de Saneamiento a Nivel Nacional. Ciudad de México, 2021*.
- Comisión Nacional del Agua, *Escenarios a largo plazo del papel del agua en la economía a través del uso en la industria, generación de energía y otros usos. Ciudad de México, abril de 2020*.
- EPA, *Treatability Manual, Industrial Description, Volume II, Washington D.C, USA, 2016*.
- EPA, *Treatability Studies for the Inorganic Chemicals Manufacturing Point Source Category, Springfield, VA, 2016*.
- Freeman M. Harry, *Manual de prevención de la Contaminación Industrial. McGraw Hill/Interamericana, Ciudad de México, 2019*.
- Frits Van der Leeden, Fred L. Troise, David Kerth Todd, *The Water Encyclopedia, Lewis Publishers, Second Edition, Chelsea, Mich., USA, 2017*.
- Industria Petrolera (Refinación), IMTA
- INEGI, *Clasificación Mexicana de Actividades y Productos. Ags., Ags., 2020*
- INEGI, *La Industria Química en México, Ags, Ags., 2020*.

- INEGI, *Sistema de Cuentas Nacionales de México, Tomo II. Ags., Ags., 2020.*
- Kurita Water Industries LTD, *Kurita Handbook of Water Treatment, Second English Edition. Tokyo, Japan, 2016.*
- LennTech (*Purificación del aire y tratamiento del agua*),
<http://www.lenntech.com/espanol/home-esp.htm>
- Pemex, *Anuario estadístico, D.F., 2021*
- Petróleos Mexicanos, *Bases de diseño "Rehabilitación de separadores API y Placas Corrugadas y Tratamiento y Disposición final de lodos en la Refinería Francisco I. Madero, Cd. Madero, Tamps. 2018.*
- Petróleos Mexicanos, *Guía informativa para desarrollo de proveedores y contratistas, actuales y potenciales de Petróleos Mexicanos. 2012 las reservas de hidrocarburos de México. 2012 Pemex Exploración Producción.*
- Petróleos Mexicanos, *Manual de Operación del sistema de Tratamiento de Aguas Residuales de la Refinería Ing. Antonio M. Amor, Salamanca, Gto.*
- SNF Floerger, *Water Soluble Polymers Manual. EUA, 2001.*
- SRH, *Estudio sobre usos del agua, métodos y costos para el control de la contaminación del agua residual en la industria petrolera. Ciudad de México, 2019.*