

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA

FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA Y TEXTIL



**“ESTUDIO COMPARATIVO Y OPTIMIZACIÓN DEL USO DE
POLIELECTROLITOS EN LA DESHIDRATACIÓN DE LODOS
DE PROCESO DE TRATAMIENTO DE EFLUENTES
ACEITOSOS”**

TESIS

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:

INGENIERO QUÍMICO

PRESENTADO POR:

INÉS HAYDÉE JOYO CASTAÑEDA
EDUARDO PAULINI VILLANUEVA

LIMA – PERÚ

2013

Dedicatoria

A Dios, por darme la oportunidad de vivir y por estar conmigo en cada paso que doy, por fortalecer mi corazón e iluminar mi mente y por haber puesto en mi camino a aquellas personas que han sido mi soporte y compañía durante todo el periodo de estudio.

A mis padres por ser el pilar fundamental en todo lo que soy, en toda mi educación, tanto académica, como de la vida, por su incondicional apoyo perfectamente mantenido a través del tiempo.

Todo este trabajo ha sido posible gracias a ellos.

Agradecimientos

A DIOS:

Por habernos dado sabiduría, fortaleza, salud, coraje, y no dejarnos solos en los momentos difíciles, y habernos permitido llegar a la meta en este gran proyecto.

A NUESTROS PADRES:

Con profundo agradecimiento ustedes, por ayudarme a la construcción de mi proyecto de vida y hacer que verdaderamente crea en mí. Gracias papá y mamá por tu amor, por tu comprensión y por ser el mejor amigo, son ustedes quienes hicieron que todo esto fuera posible, a ustedes les debo gran parte de lo que soy.

A NUESTRO ASESOR DE TESIS:

Al Ing. José Huapaya Barrientos por su amabilidad, buena disposición, paciencia, por el tiempo que me dedico para que este trabajo culminara exitosamente, mi agradecimiento sincero.

RESUMEN

La actual legislación ambiental promueve que las industrias busquen mejores métodos para el tratamiento de sus efluentes, con el fin de que estos tengan un impacto mínimo sobre el medio ambiente. Por ello el presente tema trata sobre la optimización de un proceso de tratamiento de efluentes aceitosos de una refinería. En una planta de tratamiento de efluentes industriales además de los procesos básicos de gravimetría se hace uso de unidades de coagulación, floculación, flotación por aire disuelto y centrifugación.

En la actualidad en la planta de tratamiento de efluentes aceitosos no se están obteniendo los resultados esperados por lo que ha habido la necesidad de recircular los efluentes para poder cumplir con los estándares requeridos por el decreto supremo D.S. -037-2008 PCM. El presente estudio tiene por objetivo evaluar la efectividad del cambio del uso del polielectrolito aniónico en la centrifuga por un polielectrolito catiónico, debido a que el primero se viene utilizando por un largo periodo de años y se estima que haya la posibilidad de que las características del agua a tratar hayan cambiado y actualmente haya un mayor requerimiento de la cantidad de polielectrolito catiónico usado.

Se espera que el polielectrolito catiónico en la centrifuga de un mejor resultado; además, se estimará su dosificación óptima.

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN	1
ÍNDICE GENERAL	2
INTRODUCCIÓN	5
Capítulo 1 ASPECTOS GENERALES	8
1.1. Planteamiento del Problema	8
1.2. Objetivos de la investigación	10
1.3. Justificación de la investigación	10
Capítulo 2 PARTE TEÓRICA	11
2.1. Diagrama general de la planta de Tratamiento de Efluentes	11
2.2. Descripción de la planta de tratamiento de aguas aceitosas	14
2.1.1 Arqueta de paso A45 y A2	14
2.1.2 Separadores API.....	15
2.1.3 Separadores CPI	21
2.1.4 Separadores CPS	23
2.1.5 Arqueta de Coagulación.....	28
2.1.6 Arqueta de Floculación	31
2.1.7 Unidad de Flotación por aire disuelto (DAF).....	34
2.1.8 Decantador centrífugo.....	40
2.3. Caracterización de la corriente de agua aceitosa	46
2.4. Características del Vertido Final	48
2.5. Reactivos	49
2.5.1. Polielectrolitos.....	49
2.5.2. Coagulante	51
2.5.3. Soda caústica	52
2.5.4. Floculante catiónico para las unidades de flotación	54
2.5.5. Deshidratante aniónico para el tratamiento de Lodos.....	55
2.6. Marco Conceptual	57

2.6.1.	Emulsiones	57
2.6.2.	Lodos	59
2.6.3.	Coloides	60
2.6.4.	Flóculos	61
2.6.5.	La capa de Stern y su influencia en la desestabilización de las cargas.....	61
2.6.6.	El potencial Zeta	65
2.6.7.	Teoría de deshidratación de lodos	70
2.6.8.	Teoría de Centrifugación.....	75
2.7.	Metodología Experimental.....	81
2.7.1.	Listado y descripción de Equipos y Auxiliares	82
Capítulo 3 ANÁLISIS EXPERIMENTAL Y RESULTADOS		84
3.1.	Determinación de las variables que influyen en el proceso	84
3.1.1	Variables independientes.....	84
3.1.2	Variables dependientes o de respuesta	84
3.2.	Pruebas preliminares para determinar el grado de influencia de cada variable y el tamaño de muestra.....	85
3.2.1.	Grado de influencia de los variables e interacción	85
3.2.2.	Elección del tamaño de la muestra.	89
3.3.	Comparación del desempeño entre el polielectrolito catiónico y el polielectrolito aniónico con respecto al tiempo de agitación.....	93
3.4.	Estudio de la relación y optimización de la concentración del polielectrolito catiónico vs. el tiempo de agitación a diferentes velocidades de centrifugación.....	98
3.4.1.	Análisis de la concentración del polielectrolito catiónico vs. el tiempo de agitación a diferentes velocidades	99
3.4.2.	Determinación de los sólidos suspendidos totales en el lodo separado	102
3.4.3.	Determinación del porcentaje de remoción de sólidos del agua clarificada.....	103
3.4.4.	Efecto de la velocidad de centrifugación en el acondicionamiento de lodos	106
3.4.5.	Optimización primaria de la concentración del polielectrolito catiónico a escala de laboratorio	109

3.4.6. Optimización de la concentración del polielectrolito catiónico y tiempo de centrifugación a escala industrial.....	119
3.4.7. Estudio de la compactación de los lodos deshidratados con respecto al tiempo de centrifugación.....	123
3.4.8. Comparación de volumen de lodos producidos mediante el acondicionamiento con los polielectrolitos estudiados	127
Capítulo 4 ANÁLISIS ESTADÍSTICO	128
4.1. Resultados obtenidos.....	128
4.2. Pruebas de hipótesis	129
Capítulo 5 DISCUSIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS	132
5.1. Influencia de la naturaleza química del polielectrolito	132
5.2. Influencia de la concentración del polielectrolito	133
5.3. Influencia del tiempo de agitación o centrifugación.....	133
5.4. Influencia de la velocidad de agitación o centrifugación	134
Capítulo 6 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	135
6.1. Conclusiones y recomendaciones técnicas	135
6.2. Conclusiones y recomendaciones económicas	136
Capítulo 7 BIBLIOGRAFÍA	137
Índice De Gráficos.....	138
Índice De Figuras	140
Índice De Tablas	142
ANEXOS	145

INTRODUCCIÓN

La actual legislación ambiental en el país exige que las industrias nacionales busquen mejores métodos para el tratamiento de sus efluentes, con el fin de que estos tengan un impacto mínimo sobre el ambiente. Por ello, el presente tema trata sobre la optimización de un proceso de tratamiento de efluentes aceitosos de una refinería. En este tipo de planta de tratamiento además de los procesos básicos de gravimetría se hace uso de unidades de coagulación, floculación, flotación por aire disuelto y centrifugación.

Los efluentes de las refinerías contienen aceite, hidrocarburos y sales en altas concentraciones. Por lo anterior, las interacciones químicas y mecánicas entre el agua y estas sustancias son muy complejas y frecuentemente se presentan dificultades para su remoción (API, 1985; EPA, 1984). El aceite puede estar presente en el agua en diferentes formas: libre, dispersión de gotas finas, emulsión químicamente estable y sólidos aceitosos (NALCO, 1989). El tratamiento de las aguas residuales aceitosas consiste primero, en la separación del aceite libre que flota fácilmente y de los sólidos aceitosos.

Generalmente se usan métodos y equipos que involucran la sedimentación y la flotación natural (EC, 2000; WEF, 1994). En el efluente de este tratamiento primario quedan el aceite disperso y el emulsificado. Este efluente se somete entonces a una segunda y una tercera etapa de separación con el fin de remover el aceite disperso y el emulsificado. Para romper la emulsión aceite/agua y así acelerar la remoción del aceite disperso y del emulsificado, se pueden utilizar reactivos químicos y el proceso de flotación con aire disuelto (Eckenfelder, 2000; EC, 2000).

Para la deshidratación de lodos, comúnmente son utilizados dos tipos de centrifugas, la de eje vertical (“basket”) y la de eje Horizontal (“solid bowl” o “decanter”). Estas se diferencian entre sí por el método de alimentación del

lodo, magnitud de la fuerza centrífuga aplicada, método de alimentación y de descarga de la torta deshidratada y residuos líquidos de la deshidratación, sus costos y desempeño.

En el principio de funcionamiento de las centrífugas, la aceleración centrífuga actúa en la dirección radial, en el sentido del centro de rotación. Si el recipiente de la centrífuga es cilíndrico, su contenido ejerce sobre él una fuerza igual y opuesta a la fuerza centrífuga, dirigida a las paredes del recipiente; es esta fuerza la que causa la sedimentación de las partículas sólidas más densas (Grandin 1992).

El lodo de plantas de tratamiento de efluentes aceitosos requiere de algún tipo de acondicionamiento químico para producir una efectiva separación líquido / sólido. Los polímeros son eficientes como acondicionadores químicos y son ampliamente utilizados en la deshidratación con centrífugas. Los polímeros tienen dos funciones en el acondicionamiento del lodo para deshidratación. La primera es desestabilizar las cargas de las partículas sólidas, para favorecer la aglomeración. La segunda función es aglomerar esas partículas en flocs, por medio de mecanismos de adsorción y formación de puentes entre las partículas y el polímero. Un exceso de polímero puede causar reestabilización de las partículas y bajas concentraciones serán insuficientes para el fortalecimiento de los puntos de cohesión de los flocs, tornándolos incapaces de resistir las altas fuerzas cortantes existentes dentro de la centrífuga (Hagstrom, 1996).

Sin embargo, procedimientos para la optimización de la concentración de polímero, en aplicaciones de deshidratación mediante el uso de centrífugas no son ampliamente conocidos. En otras aplicaciones de deshidratación como la filtración al vacío, procedimientos como el ensayo del embudo de Buchner es usado para determinar la concentración óptima de polímero (Hagstrom, 1996).

El estudio a escala de laboratorio permite determinar la eficiencia de un polímero como acondicionador y determinar la concentración aproximada necesaria para deshidratar un lodo en particular. En la centrifuga a escala real, los ensayos de desempeño permitirán determinar la dosis óptima observándose la mejora o deterioro en la torta seca o en el efluente clarificado.

Algunos polímeros pueden requerir períodos de retención más largos para ser dispersos y mezclados efectivamente con las partículas. La importancia de la optimización de la dosis de polímero utilizada para el acondicionamiento de un lodo antes de la deshidratación, radica principalmente en los cambios de las características del lodo, un polímero inicialmente seleccionado puede ser ineficiente posteriormente. De esta forma, es fundamental que la optimización del polímero sea realizada dentro de la centrifuga, para garantizar una eficiente y económica separación líquido / sólido.

En términos generales, el polímero requerido para deshidratar un lodo específico depende de:

- Concentración de sólidos totales.
- Características del lodo a ser deshidratado.
- Tasa de alimentación del lodo para la centrifuga.
- Resultados de desempeño esperados (turbiedad del efluente líquido de la centrifugación, concentración de la torta de lodo o ambos).
- Temperatura del lodo.

Mientras una selección a escala de laboratorio y ensayos de desempeño no se realicen; el tipo y dosis de polímero para acondicionar un lodo particular no pueden ser determinados con seguridad.

Capítulo 1 ASPECTOS GENERALES

1.1. Planteamiento del Problema

La Refinería La Pampilla se dedica a la refinación del crudo para la obtención de destilados medios en especificación. La Refinería cuenta con un sistema de tratamiento de las agua aceitosa proveniente de las áreas de procesos y drenajes de tanques, diseñado con el fin de conseguir un efluente final con concentración de aceites menor o igual a 20 ppm, una planta de tratamiento de deslastre de buques, una planta compacta de tratamiento de agua residual, un sistema de deshidratación de lodos generados y un sistema de bombeo de productos químicos.

La planta de tratamiento de efluentes aceitoso inaugurada en 1999 usa procesos básicos de gravimetría en sus 2 API's, CPI, CPS, además se hace uso de unidades de coagulación, floculación, flotación por aire disuelto y centrifugación.

Actualmente mediante este proceso no se están obteniendo los resultados esperados por lo que ha habido la necesidad de recircular los efluentes para poder cumplir con los estándares requeridos por el decreto supremo D.S. - 037-2008 PCM. A lo largo de la operación en la Refinería se ha realizado diversas ampliaciones de capacidad de refinación (ampliación de las unidades de destilación I/II, unidad de FCC) así como también se ha realizado la instalación y operación de nuevas unidades de procesos como la unidad de Visbreaking (2003), las unidades de sodas gastadas (2009), instalación de calderas (42B1/2/39. Sin embargo, la planta está diseñada para un caudal máximo de diseño que se vio excedida tanto en caudal como en especificaciones (A&G, STT, DQO, DBO, etc.), se optó por recircular parte del

efluente aceitoso para llegar a las especificaciones, sin embargo se terminó por rebasar las diferentes arquetas de tratamiento especialmente la arqueta S-8 (arqueta de floculación) el cual tiene el volumen de diseño más bajo, a pesar de ello no se cumplen los estándares requeridos por la legislación peruana.

El presente estudio tiene por objetivo evaluar la efectividad del cambio del uso del polielectrolito aniónico en la centrifuga por un polielectrolito catiónico, debido a que el primero se viene utilizando por un largo periodo de años y se estima que las características del agua a tratar para la cual la planta de efluentes fue diseñada, pueden variar en el tiempo y actualmente se requiere un cambio del tipo de polielectrolito.

1.2. Objetivos de la investigación

Objetivo general:

Evaluar los factores que afectan la deshidratación del efluente aceitoso en la planta de tratamiento de efluentes aceitosos.

Objetivos específicos:

- Realizar prueba preliminares a escala de laboratorio (Prueba de jarras) para determinar la concentración óptima del polímero, tiempo y velocidad óptima.
- Realizar prueba en la centrifuga 37K9 en la Refinería La Pampilla para confirmar la concentración óptima de polielectrolito.
- Proponer mejoras en el proceso de la planta, que permitan tener un efluente que cumpla con los requisitos según la legislación peruana.

1.3. Justificación de la investigación

La actividad consistió en la evaluación de dos polielectrolitos (catiónico – aniónico), con el objeto de determinar cuáles son las principales causas que influyen sobre el proceso, debido a que estos factores provocan problemas operacionales como exceso de aceites y grasas, sólidos suspendidos, emulsión inversa, que en ocasiones limita su posterior vertido al mar. En base a esto la investigación propuso mejoras en la dosificación de químicos al proceso, que van a contribuir a optimizar la remoción de A&G, SST (Sólidos suspendidos totales), fenoles, etc. Así como también el impacto económico que genera el cambio de polielectrolito.

Capítulo 2 PARTE TEÓRICA

2.1. Diagrama general de la planta de Tratamiento de Efluentes

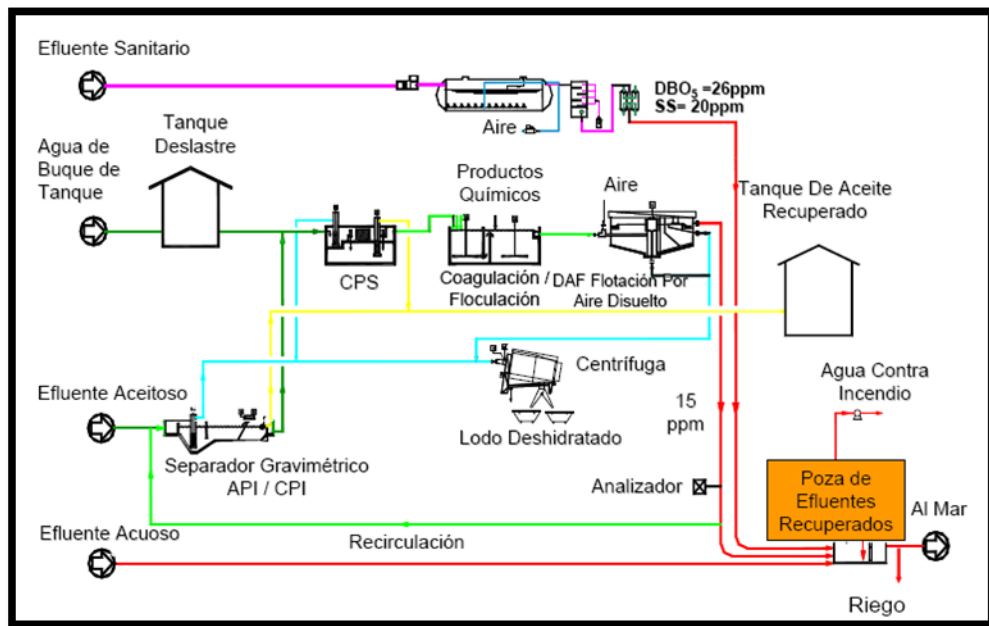


Figura 2. 1. Diagrama esquemático de la planta de tratamiento de efluentes

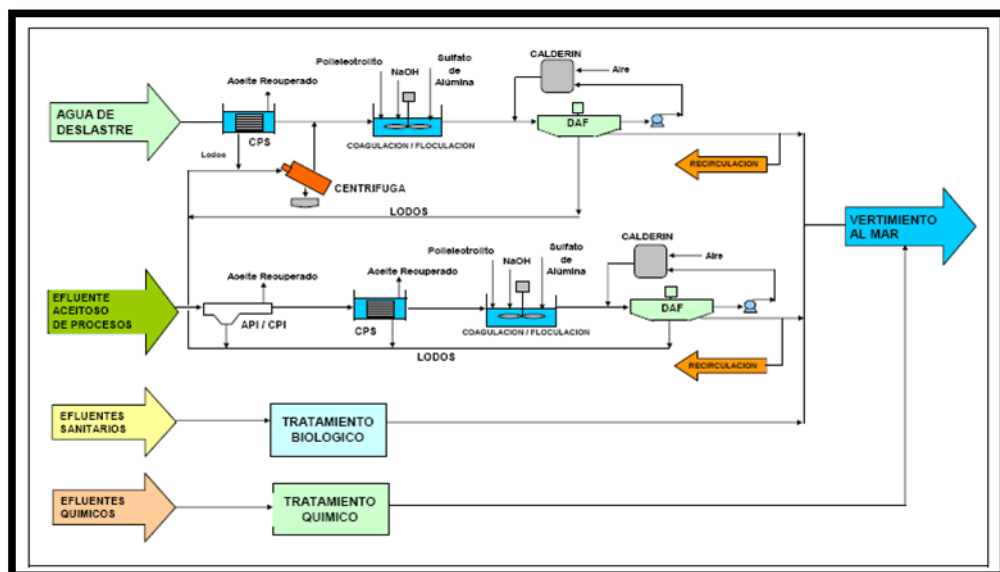


Figura 2. 2. Diagrama esquemático de la planta de tratamiento de efluentes

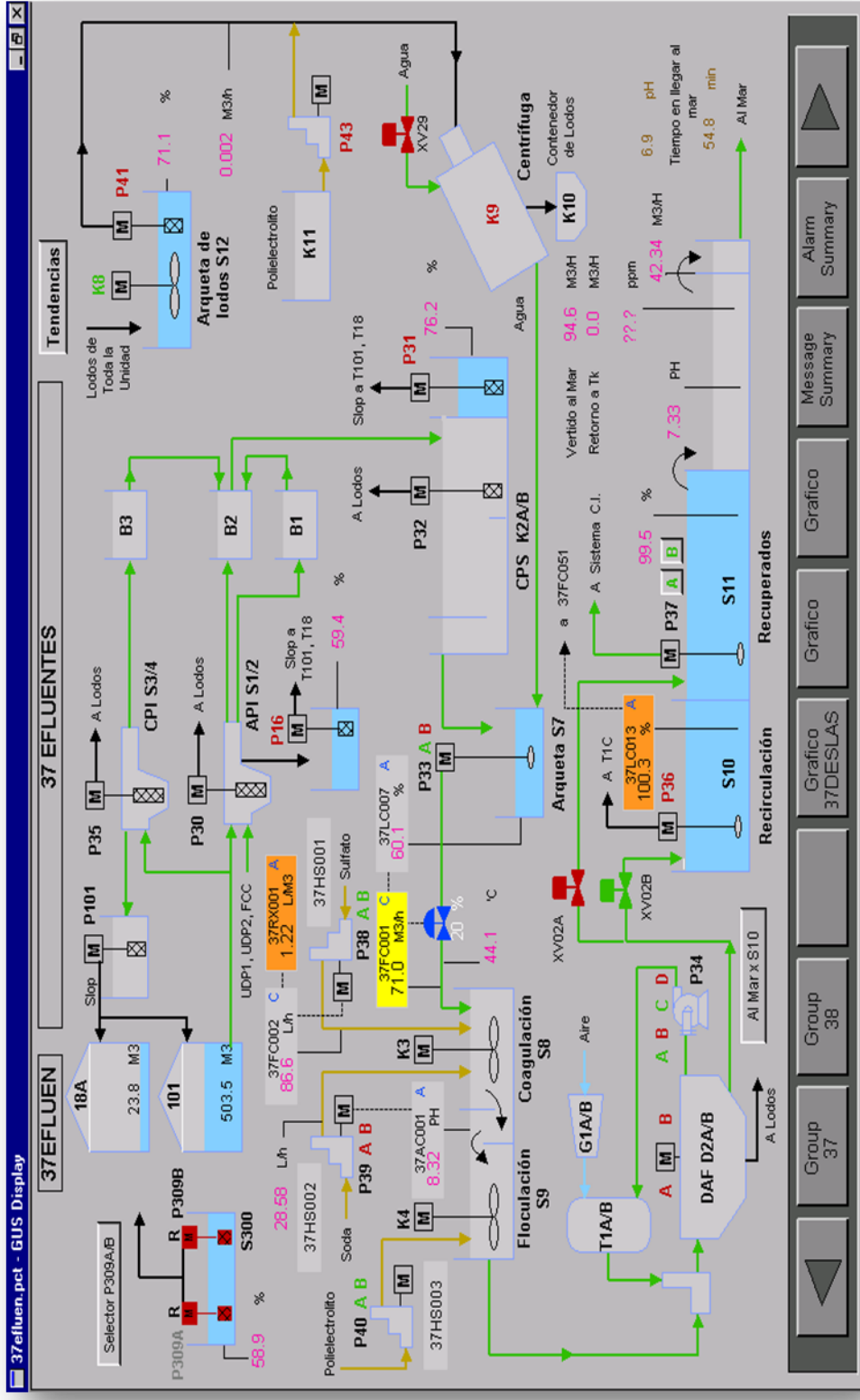


Figura 2. 3. Diagrama esquemático de la planta de efluentes en la pantalla nativa GUS

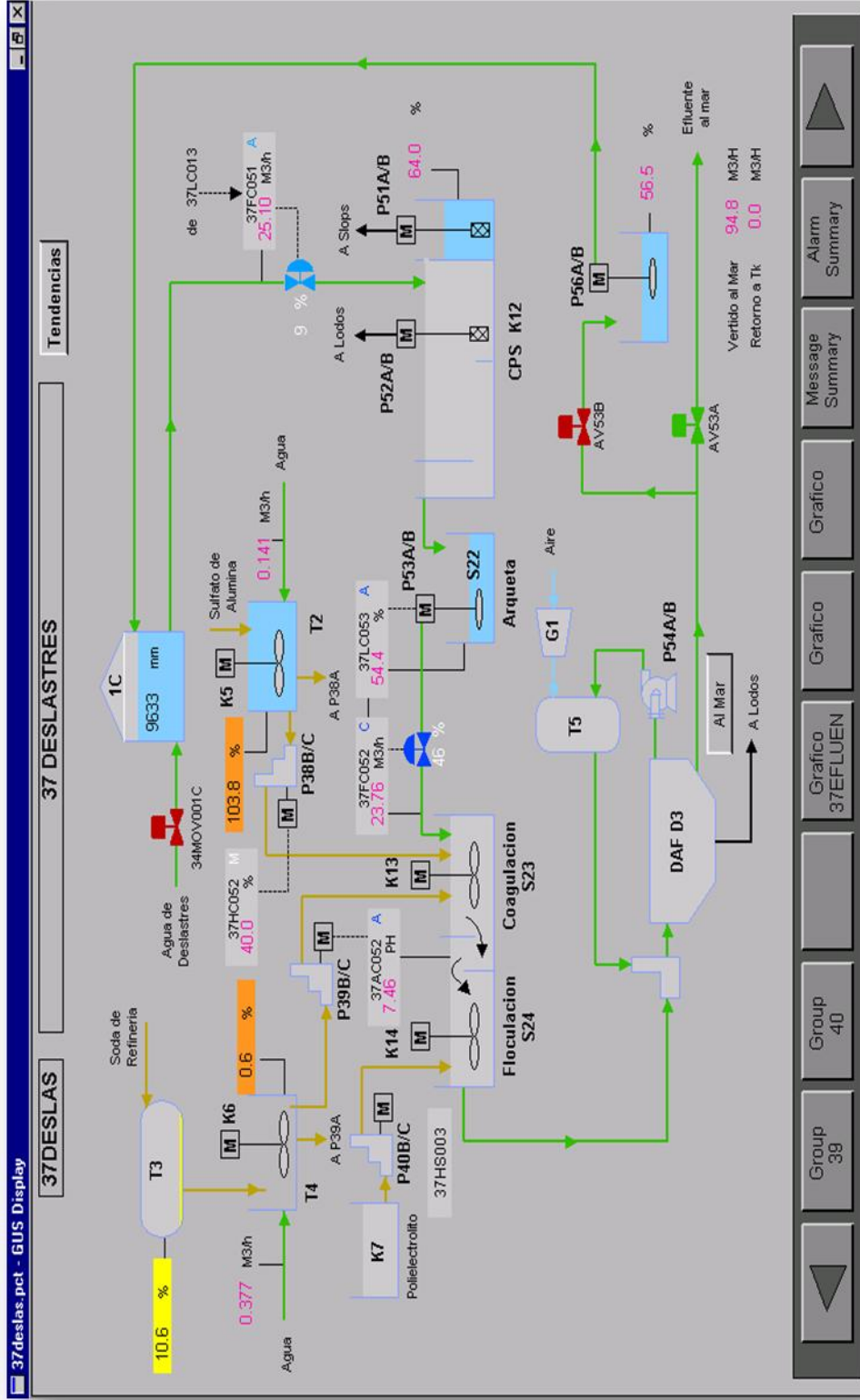


Figura 2. 4. Diagrama esquemático de la planta de efluentes en la pantalla nativa GUS

2.2. Descripción de la planta de tratamiento de aguas aceitosas

2.1.1 Arqueta de paso A45 y A2

Las aguas aceitosas llegan a través de la red de tuberías de drenajes hacia dos arquetas de paso A45 y A2 que sirven como arquetas de paso a los separadores API y CPI respectivamente.

- La arqueta de paso A45 reciben los efluentes aceitosos provenientes de las unidades:
 - o Unidad de destilación primario I (UDP I)
 - o FCC
 - o Unidad de destilación al vacío I (UDV I)
 - o UF-PT
 - o URG
 - o SSII
 - o OPDES
 - o Drenajes de tanque zona centro y del 31T-1 A/B.
- La arqueta de paso A2 reciben efluentes aceitosos provenientes de las unidades:
 - o Unidad de destilación primario II (UDPII)
 - o Unidad de destilación al vacío (UDVII)
 - o Unidad de visbreaking (UVB)
 - o Cogeneración, Aguas acidas, Sodas gastadas y drenajes del tanque 31T-1D al 31T-1Q.

Adicionalmente, las arquetas A2 y A45 también reciben los drenajes provenientes del tanque 31T-101 y de la arqueta de drenajes S- 300.

Las arquetas A2 y A45 tienen indicaciones de nivel, estas señales son observadas en sala de control en el esquemático 37 EFLUEN y tiene alarmas de alto HL y HHL con los valores de 82% y 88%.

Las alarmas de nivel instaladas tiene como objetivo evitar el rebose de las arquetas A2 y A45.

2.1.2 Separadores API

Base teórica

El separador API se basa en los principios de los trabajos desarrollados en la Universidad de Wisconsin, así como en la gran experiencia adquirida en las múltiples unidades instaladas, principalmente en la industria del petróleo.

Este tipo de separadores consiste en un canal de sección rectangular, trabajando en régimen del flujo laminar y con un tiempo de retención que permita a las gotas de aceite a separar alcanzar la superficie, de donde serán eliminadas. Con el fin de facilitar la separación, se instalan unas barrederas superficiales perpendiculares a las paredes laterales del canal y arrastradas por unas cadenas sinfín, que se desplazan en la misma dirección del flujo, acumulando el aceite en las proximidades de un *skimmer*, que facilita la eliminación.

Debido a la disminución de la velocidad del agua, en estos equipos tiene lugar una decantación de parte de los sólidos en suspensión presentes en el agua residual. Estos sólidos son arrastrados a uno de los extremos del separador, por las barrederas en el camino de regreso, acumulándose en unos pocetos de donde son extraídos por bombeo y enviados a tratamiento de fangos.

Con el fin de no producir turbulencias en el seno del líquido, la velocidad de las rasquetas debe ser muy lenta.

En la siguiente figura 2.5 se describe esquemáticamente, un separador de este tipo.

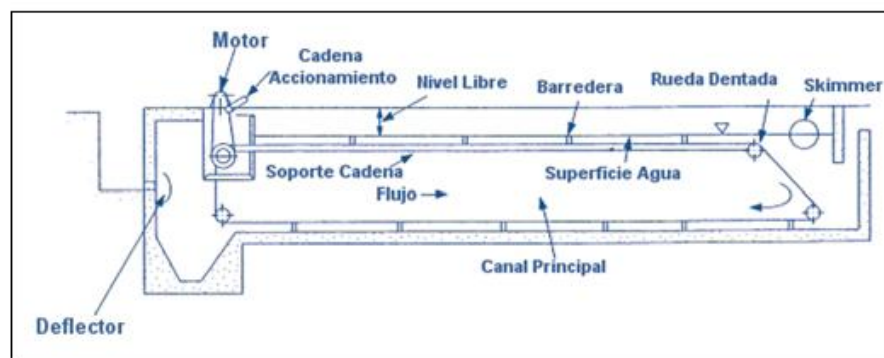


Figura 2. 5. Esquema de un separador API

Los aceites acumulados en la superficie del separador y arrastrados hacia uno de sus extremos por las rasquetas son extraídos de la superficie mediante un *skimmer*.

Estos pueden ser:

- Tubería rasgada o ranurada.
- Cilindros olefínicos.
- Bandas continuas.

El primero puede observarse en la figura 2.6.

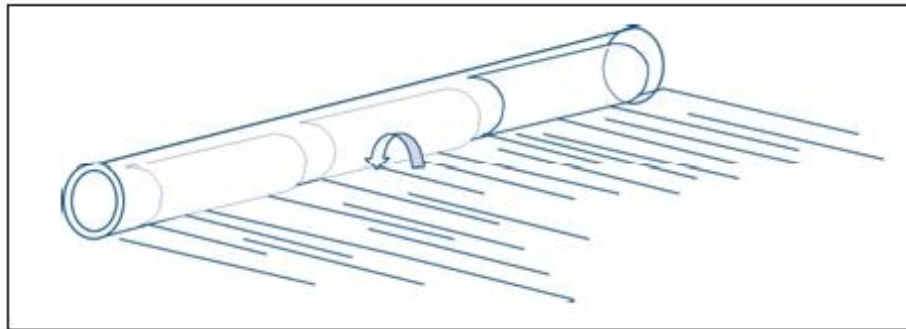


Figura 2. 6. Esquema de un Skimmer tipo tubería ranurada

En el diseño de los separadores API, la base de partida es la velocidad ascensional de las gotas de aceite de acuerdo con la ecuación de Stokes. Por otra parte, habrá que tener en cuenta la correlación entre los diferentes parámetros y dimensiones fijados por el Instituto Americano del Petróleo, de acuerdo con la experiencia en múltiples plantas operativas.

Los factores más importantes a tener en cuenta son los siguientes:

- El valor de la velocidad longitudinal (V) que se adopta es de $15 \times v$ (velocidad ascensional de las gotas de aceite), siendo el valor máximo que puede alcanzar de 1,7 cm/s.
- La relación profundidad/anchura del canal deberá estar comprendida entre 0,3 y 0,5.
- La anchura del canal estará comprendida entre 2 y 6 m.
- La profundidad mínima del agua será de 1 m y la máxima de 2,5 m.

Normas generales de diseño

En el diseño de estos equipos hay que tener, también, en cuenta las siguientes condiciones:

- El agua debe llegar a los separadores por gravedad, con el fin de evitar la formación de emulsiones, lo que llevaría consigo una pérdida importante de rendimiento.
- Las variaciones bruscas de caudal conllevan a alteraciones importantes en el régimen de funcionamiento de la unidad y, en consecuencia, en el rendimiento; siendo aconsejable en aquellos casos que se prevea esta posibilidad la instalación de una unidad de regulación previa del caudal.
- No es habitual el empleo de agentes desemulsionantes en este tipo de equipos.
- Deben evitarse turbulencias en la entrada del equipo, para lo que se instalarán entradas múltiples y disipadores de energía.
- Los principales inconvenientes de estas unidades radican en la gran superficie que requieren para caudales elevados y la influencia de las condiciones meteorológicas, como viento (generación de turbulencias en superficie por oleaje) o temperatura. Igualmente estas superficies van a dar lugar a evaporaciones de aquellas grasas y aceites más volátiles, creando contaminación atmosférica, así como dar lugar a atmósferas peligrosas.
- Entre sus ventajas se encuentran su simplicidad, su efectividad para eliminar el grueso de la contaminación por aceites, seguridad en su funcionamiento y la facilidad de mantenimiento y operabilidad.

En la Refinería

A estas unidades llegan los efluentes procedentes de las unidades UDP I, UFCC, UDV I, UF-PT, Aminas, Cogeneración, Energía, Torre de Enfriamiento o del tanque 31-T-101. Los efluentes antes del ingreso a los Separadores

API/CPI, confluyen con el efluente de UDP II y nuevas Unidades de ampliación cuando este se encuentra fuera de servicio.

El efluente a tratar llegan a los dos (2) separadores API, o bien al CPI. En estas unidades de tratamiento se produce una primera separación de hidrocarburos y de lodos. Los hidrocarburos, de densidad menor que el agua se separan en la superficie del líquido, mientras que los lodos, más pesados, se depositarán en el fondo.

Con el fin de facilitar la separación de estos hidrocarburos y lodos, y conseguir un efluente clarificado, que pase a la siguiente etapa de tratamiento, en los Separadores API 31S-1 y 31-S-2 de forma rectangular de concreto armado, tiene montado un Mecanismo Barredor, cuya descripción se realiza a continuación.

Consiste en un mecanismo de barrido alternativo 37-D-01 A/B, que está montado en la parte superior de los muros laterales de cada Separadores API, sobre los que se desplaza un puente metálico con ruedas de poliuretano, bajo el cual y solidarios con el mismo se encuentran unos brazos para barrer el aceite de la superficie del líquido contenido en el interior del Separador hasta el extremo opuesto, donde son recogidos por un skimmer regulable lateralmente con volante, husillo, evacuándolos por un pasamuros a una arqueta lateral adosada. También dispone de puente, de una rasqueta de fondo, que arrastrará los sólidos sedimentados del fondo, en el sentido inverso de marcha, hacia un foso central.

Poza API con Sistema automático de recogida de aceites y lodos



Figura 2. 7. Separador API de la planta de tratamiento de aguas aceitosas.

Accionamiento.- El desplazamiento del carro se realiza mediante un motor reductor eléctrico que transmite el movimiento a un eje que une las dos (2) ruedas motrices, situadas una en cada carro; la transmisión del movimiento se realiza mediante acoplamiento directo imprimiendo una velocidad final al carro por debajo de los 3 m/min.

El carro se traslada en el sentido contrario al de la corriente arrastrando los lodos y al llegar al extremo los evacua a un foso de extracción. Un final de carrera instalado en dicho extremo actúa sobre el accionamiento invirtiendo su funcionamiento y por tanto el sentido de la marcha del carro; al mismo tiempo que un mecanismo electromagnético eleva los brazos de limpieza de fondo y baja los de superficie. Una vez realizadas estas operaciones, el carro reinicia su marcha esta vez en sentido favorable al del agua arrastrando los **aceites** flotantes y evacuándolos por el otro extremo sobre el skimmer. Al mismo tiempo, otro final de carrera hace descender los brazos de limpieza de lodos y eleva los de flotantes, invirtiendo el sentido de desplazamiento del

carro, iniciándose otra vez el ciclo. El agua libre de flotantes y lodos es evacuada por una tubería.

Los Separadores API norte y sur, reciben los efluentes aceitosos y se encargan de separar por gravimetría el aceite del agua y los sólidos en suspensión por sedimentación primaria precipitan al fondo. Estos Separadores (37-K-27 lado norte / 37-K-29 lado sur) disponen de carros barredores con dispositivos articulados que se encargan del traslado del aceite de la superficie en sentido del flujo por arrastre hacia el tubo recuperador (Skimmer) y en sentido inverso al flujo se encarga del traslado del lodo sedimentado por arrastre hacia un foso ubicado en punto de ingreso.

El aceite recuperado es bombeado al tanque 31-T-101, el lodo es bombeado a la arqueta 37-S-12 y el agua que sale del Separador API norte es recogida en la arqueta 37-B-1 y el sur en la arqueta 37-B-2. Desde esta arqueta, el efluente pasa por gravedad a la arqueta B3.

Los lodos decantados son extraídos mediante dos 2 bombas (37-P-30A/B), y enviados a la arqueta de lodos 37-S-12, para ser tratados junto con el resto de los lodos generados en la Planta de Tratamiento.

Los aceites recuperados, se recogen en la arqueta de aceites recuperado, desde la que se pueden enviar a los siguientes destinos:

- A tanque 31-T-18
- A tanque 31-T-101

Para el envío de estos aceites se utilizarán las bombas 37-P-16 A/B.

Condiciones normal de los API Norte/Sur:

a) Corriente N° 2: Entrada API "Sur"	
Caudal (m ³ /h):	35
Aceite (ppm):	10,000-25,000 (*)
pH:	6.5-9.5
Total sólidos disueltos (ppm):	2,800
Sólidos en suspensión (ppm):	490 (*)
b) Corriente N° 3: Entrada API "Norte"	
Caudal (m ³ /h):	35

Aceite (ppm):	20,000-65,000 (*)
pH:	6.5-9.5
Total sólidos disueltos (ppm):	2,800
Sólidos en suspensión (ppm):	490 (*)

NOTA: Los valores marcados con (*) son estimados.



Figura 2. 8. Separador API de la planta de tratamiento de aguas aceitosas.

2.1.3 Separadores CPI

Base teórica

Los separados CPI tiene la misma base teórica que los separadores API mencionados previamente, estos separadores disponen de un “sistema gravitacional”.

Su diseño utiliza la fuerza de flotación: diferencia de gravedades específicas entre los dos fluidos intensificada por el uso de las placas coalescentes fabricadas en polipropileno oleofílico. No tiene ninguna parte móvil.

En la cámara de entrada o preparación se produce la separación de las gotas de aceite de mayor tamaño y los sólidos más pesados. El aceite fluye hacia la parte superior y queda flotando sobre la superficie del agua, luego es recogido y enviado hacia una arqueta, donde se encuentran las bombas para su envío hacia los tanques de slop. Los sólidos decantan en el fondo de la cámara, formando un lodo debajo de los paquetes de placas, que es necesario extraer intermitentemente para enviarlos a la arqueta de lodos. El agua limpia discurre por la parte inferior de la cámara de salida, y abandona el separador hacia las pozas CPS.

En la Refinería

Las aguas aceitosas llegan a través de tuberías hasta el Separadores CPI, procedentes de las siguientes unidades:

- Efluentes de la Unidades: UDP II, UDV II y VB.
- Efluentes de las Plantas: Aguas Ácidas y Sodas Gastadas.

El efluente es recogido en la arqueta B-3 y los lodos separados son extraídos mediante las bombas 37-P-35 A/B y enviados a la arqueta de lodos 37-S-12.

Los aceites recuperados, se recogerán en la arqueta de recogida existente, desde donde se envían, mediante las bombas 37-P-101 A/B, a los siguientes destinos:

- Al tanque de Slop 31-T-18
- Al tanque de Slop 31-T-101

Los aceites almacenados en el tanque 31-T-101 y 18 son bombeados, mediante las bombas de Slop 37-P-17 y 37-P-20, a los tanques de crudo 31-T-1A/B/C/D/E.

Condiciones normales del CPI:

a) Corriente N° 1: Entrada CPI

Caudal (m ³ /h):	60
Aceite (ppm):	5,000-30,000 (*)
pH:	6.5-9.5

Total sólidos disueltos (ppm):	2,800
Sólidos en suspensión (ppm):	490 (*)

NOTA: Los valores marcados con (*) son estimados.



Figura 2. 9. Separador CPI de la planta de tratamiento de aguas aceitosas.

2.1.4 Separadores CPS

Base teórica

Un sistema para aumentar la eficacia de los separadores tipo API sería darles un mayor tiempo de retención. Por otra parte, 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 mencionados APIs, lo que lleva consigo un aumento importante de la superficie necesaria, no siempre disponible, además de que, a mayor superficie de lámina de agua, mayor influencia de agentes meteorológicos como temperatura y viento, con los problemas que ello conlleva.

Con el fin de aumentar el rendimiento y la capacidad de estos procesos, se desarrollaron los separadores de placas, que aumentaron los rendimientos y disminuyeron la superficie requerida. 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 menos tiempo de retención, al tener que recorrer la gota de aceite a separar solamente la distancia vertical entre las dos placas.

La separación entre placas y el ángulo con la horizontal varían de unos fabricantes a otros, situándose entre 2 y 4 cm. Entre los separadores de placas, están los denominados CPI, consistentes en un conjunto de placas corrugadas paralelas, formando un paquete con un ángulo con la horizontal de 45 grados. Las gotas de aceite se acumulan en las crestas de las placas, facilitando el ascenso a la superficie de las mismas al formar gotas de mayor tamaño por coalescencia.

Los sólidos en suspensión decantados deslizarán por los valles de las placas hasta la zona de evacuación mediante bombeo

Bases de diseño

En estos equipos, al igual que los separadores tipo API, la separación se basa en la diferencia de peso específico entre el agua residual y la grasa y aceite a separar.

Dimensionado de estos equipos

El dimensionado de estos equipos es llevado a cabo por el suministrador de los paquetes de placas, pues son ellos los que conocen sus unidades y los parámetros de diseño precisos. Para que el suministrador pueda llevar a cabo

el diseño correcto de su unidad, los datos mínimos que es preciso suministrarle son los siguientes:

- Caudal máximo y medio a tratar.
- Temperatura del agua media y máxima.
- Concentración media y máxima de grasas y aceites en estado libre.
- Concentración de sólidos en suspensión media y máxima.
- Rendimiento que se desee obtener.

Hay que tener en cuenta que en estos equipos, al igual que en todos los indicados en este capítulo, no se van a eliminar aquellas grasas y aceites que no estén en estado libre.

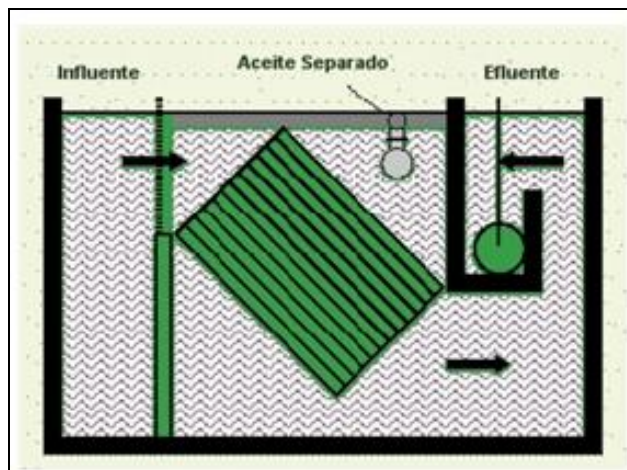


Figura 2. 10. Dibujo esquemático de un separador CPS

En la Refinería

El efluente recogido en el buzón B3 pasa por gravedad a los separadores de placas coalescentes "CPS" (37-K-02A/B), cuya finalidad es realizar una segunda separación del aceite, recuperar el mayor contenido de aceite posible y disminuir el contenido de aceite en el efluente a fin de asegurar un correcto funcionamiento de las Unidades de Flotación.

Los Separadores de Placas Corrugadas tienen por finalidad realizar una segunda separación del aceite contenido en el efluente para asegurar un correcto funcionamiento de la Unidad de Flotación.

Los Separadores de Placas Corrugadas consisten en dos arquetas, trabajando en paralelo, en las que se disponen unos paquetes de placas para facilitar la separación de los aceites. El principio de funcionamiento es el mismo que se describió para el separador CPI.

Los aceites se separan en la superficie y son recogidos mediante *skimmers* hasta una zona central, donde se encuentran las bombas de aceite, la descarga se realiza en los tanques de slop. Los lodos que quedan retenidos en el fondo son purgados y enviados a la arqueta de lodos.



Figura 2. 11. Separador CPS de la planta de tratamiento de aguas aceitosas.

En cada CPS se tiene instalado separadores de placas coalescentes, con un caudal de diseño unitario de 65 m³/h y trabajando ambas unidades en paralelo tienen 130 m³/h de capacidad total.

Los aceites recuperados en los CPS, son enviados mediante las bombas 37-P-31 A/B a los siguientes destinos:

- Al tanque de Slop 31-T-18
- Al tanque 31-T-101

Los lodos separados en los CPS son extraídos, mediante las bombas 37-P-32 A/B, y enviados a la arqueta de lodos 37-S-12.

El efluente de los CPS es enviado por gravedad hasta la arqueta de recogida del de agua 37-S-7.

Las unidades de tratamiento CPS, disponen de sobre paso, para desviar el flujo de alimentación, hasta las siguientes unidades:

- A la arqueta de agua de recogida (37-S-7)
- Al CPS de la línea de Deslastre 37-K-12
- A la arqueta de recirculación 37-S-10, solo en caso de emergencia por fallos de: corte de energía eléctrica, aire de planta, aire de instrumentos y falla de las bombas 37-P-33 A/B.

El efluente de salida del separador CPS, es enviado a la arqueta de bombeo al tratamiento físico - químico, que consta de un proceso de coagulación - floculación, previo al tratamiento de Flotación por Aire Disuelto.



Figura 2. 12. De la planta de tratamiento de aguas aceitosas.

2.1.5 Arqueta de Coagulación

Base Teórica

La coagulación puede entenderse como la desestabilización eléctrica de algunas partículas mediante la adición de sustancias químicas que son los coagulantes. Esta operación se efectúa en unidades y tanques de mezcla rápida, en los cuales el agua se somete a agitación muy intensa para formar una solución homogénea de los coagulantes con el agua en el menor tiempo posible.

Este proceso se usa para:

- Remoción de turbiedad orgánica o inorgánica que no se puede sedimentar rápidamente.
- Remoción de color verdadero y aparente.
- Eliminación de bacteria, virus y organismos patógenos susceptibles de ser separados por coagulación.
- Destrucción de algas y plancton en general.
- Eliminación de sustancias productoras de sabor y olor, en algunos casos de precipitados químicos suspendidos en otros.

El uso de cualquier otro proceso para la remoción de partículas muy finas, como la sedimentación simple, resulta muy poco económico y en ocasiones imposible, debido al alto tiempo requerido.

Para la evaluación de este proceso es necesario tener en cuenta las características físicas y químicas del agua, la dosis del coagulante, la concentración del coagulante, el punto de aplicación del coagulante, la intensidad y el tiempo de mezcla y el tipo de dispositivo de mezcla.

Teoría de la Coagulación

Las partículas que forman la turbiedad y el color de las aguas naturales, poseen cargas eléctricas que normalmente son negativas, pero como también

existen cargas eléctricas positivas, se puede afirmar que el agua y las soluciones son eléctricamente neutras. Las cargas eléctricas de las partículas generan fuerzas de repulsión entre ellas, por lo cual se mantienen suspendidas y separadas en el agua. Es por esto que dichas partículas no se sedimentan. El conjunto formado por estas partículas constituye un sistema coloidal, formado por una doble capa de iones, el cual es sometido a un potencial en la superficie inferior del doble lecho, denominado *potencial Z*. Este potencial tiene un valor crítico, por encima del cual los coloides son estables, y por debajo de él, la repulsión en las partículas se reduce a un grado tal que chocando con cierta velocidad pueden unirse y flocular. El problema en la coagulación consiste en disminuir el potencial Z por uno de los siguientes métodos:

- Coagulación por neutralización de la carga: Esta se realiza cuando coloides de diferente signo se mezclan en el agua. Esto es lo que sucede cuando se agrega alumbre o sales de hierro al agua.
- Coagulación por disminución del espesor de la doble capa (distancia d). Al incrementarse la concentración de iones en el agua la “distancia d ” disminuye, hasta hacer el valor del potencial Z inferior al punto crítico.

El fenómeno de la desestabilización se efectúa mediante una serie de reacciones químicas bastante complejas, de las cuales algunas no se han podido entender lo suficiente. Dentro de esas reacciones se encuentran las que se efectúan con las diversas formas de alcalinidad, por lo cual su contenido disminuye. Además, algunas de estas reacciones producen CO_2 , cuyo efecto consiste fundamentalmente en el incremento de la acidez del agua y por consiguiente la disminución del pH.

Factores que influyen en la Coagulación

- **Valencia:** Entre mayor sea la valencia del ion, más efectivo resulta como coagulante.

- **Capacidad de cambio:** Es una medida de la tendencia a reemplazar cationes de baja valencia por otros de mayor valencia, provocando la desestabilización y aglomeración de partículas en forma muy rápida.
- **Tamaño de las partículas:** Las partículas deben poseer el diámetro inferior a una micra. Las partículas con diámetro entre una y cinco micras, sirven como núcleos de floc, en cambio de diámetro superior a cinco micras, son demasiado grandes para ser incorporadas en el floc.
- **Temperatura:** La temperatura cambia el tiempo de formación del floc, entre más fría el agua, la reacción es más lenta y el tiempo de formación del floc es mayor.
- **Concentración de iones H^+ o pH:** Para cada coagulante hay por lo menos una zona de pH óptima, en la cual una buena floculación ocurre en el tiempo más corto y con la misma dosis de coagulante.
- **Relación cantidad-tiempo:** La cantidad de coagulante es inversamente proporcional al tiempo de formación del floc.
- **Alcalinidad:** La alcalinidad guarda la relación con el pH y por lo tanto el contenido de alcalinidad del agua es uno de los factores por considerar en la coagulación.

2.1.4 Clases de Coagulantes

Los coagulantes que se utilizan en la práctica para agua potable son los siguientes:

- **Sales de Aluminio:** Forman un floc ligeramente pesado. Las más conocidas son:
El Sulfato de Aluminio, $Al_2(SO_3) \times 14H_2O$, que en la práctica se le denomina como Alumbre; el Sulfato de Aluminio Amoniacal y el Aluminato Sódico. El primero es el que se usa con mayor frecuencia dado su bajo costo y manejo relativamente sencillo.
- **Sales de Hierro:** Se utiliza el Cloruro Férrico, $FeCl_3$, y los Sulfatos de Hierro Férrico y Ferroso, $Fe(SO_4)_3$ y $FeSO_4$. Forman un floc más pesado y de mayor velocidad de asentamiento que las sales de aluminio.

- **Polímeros o polielectrolitos:** Son compuestos complejos de alto peso molecular que se utilizan no propiamente como coagulantes sino como ayudantes de coagulación. La dosificación de estas sustancias se lleva a cabo en concentraciones muy bajas, lo cual es una gran ventaja y compensa el costo del polímero. Están siendo ampliamente empleados en el tratamiento de aguas potables ya que se produce una menor cantidad de lodos, adicionalmente el lodo producido es más fácilmente tratable.

En la Refinería

En la arqueta de 37-S-8 se adiciona el coagulante, la cual, se encarga de desestabilizar las partículas microscópicas coloides contenidas en el efluente. En caso de ser necesario, se inyecta soda cáustica diluida al 10% de concentración, para regular el pH del vertimiento en el rango de 6 a 9 según Norma Técnica Peruana.

2.1.6 Arqueta de Floculación

Base Teórica

La floculación consiste en la aglomeración, mediante la agitación moderada del agua, de las partículas que se desestabilizaron durante la coagulación, formando otras de mayor tamaño y peso específico –flóculos. Los objetivos básicos de la floculación son reunir microflóculos para formar partículas con peso específico superior al del agua y compactar el flóculo disminuyendo su grado de hidratación para producir baja concentración volumétrica, lo cual produce una alta eficiencia en los procesos posteriores como sedimentación y filtración.

Cinética de la Floculación

Tan pronto como se agregan coagulantes a una suspensión coloidal, se inician una serie de reacciones hidrolíticas que adhieren iones a la superficie de las partículas presentes en la suspensión, las cuales tienen así

oportunidad de unirse por sucesivas colisiones hasta formar flóculos que crecen con el tiempo. La rapidez con que esto ocurre depende del tamaño de las partículas con relación al estado de agitación del líquido, de la concentración de las mismas y de su “grado de desestabilización”, que es el que permite que las colisiones sean efectivas para producir adherencia.

Los contactos pueden realizarse por dos modos distintos:

- **Floculación Pericinética:** Contactos por bombardeo de las partículas producidos por el movimiento de las moléculas del líquido (movimiento browniano) que sólo influye en partículas de tamaños menores a un micrón. Sólo actúa al comienzo del proceso, en los primeros 6 a 10 s y es independiente del tamaño de la partícula.
- **Floculación Ortocinética:** Contactos por turbulencia del líquido, esta turbulencia causa el movimiento de las partículas a diferentes velocidades y direcciones, lo cual aumenta notablemente la probabilidad de colisión. Efectivo sólo con partículas mayores a un micrón. Actúa durante el resto del proceso, de 20 a 30 min.

Factores que influyen en la Floculación

- **Concentración y naturaleza de las partículas**
La velocidad de formación del floc es proporcional a la concentración de partículas en el agua y del tamaño inicial de estas.
- **Tiempo de detención**
La velocidad de aglomeración de las partículas es proporcional al tiempo de detención. Debe estar lo más cerca posible al óptimo determinado por medio de ensayos de jarras, esto se puede lograr dividiendo la unidad de floculación en cámaras. Se puede decir que una eficiencia dada, se obtiene en tiempos cada vez menores a medida que se aumenta el número de cámaras de floculación en serie. Por razones de orden práctico el número de cámaras no puede ser muy grande, estableciéndose un mínimo de tres 3 unidades.
- **Gradiente de velocidad**

Este es un factor proporcional a la velocidad de aglomeración de las partículas. Existe un límite máximo de gradiente que no puede ser sobrepasado, para evitar el rompimiento del floc. El gradiente a través de las cámaras debe ser decreciente y no se deben tener cámaras intermedias con gradientes elevados.

En la Refinería

En la arqueta de 37-S-9 se adiciona floculante de carga catiónica a fin de facilitar la aglomeración las partículas desestabilizadas de microfloculos en floculos mas grandes.

El proceso de coagulación-floculación facilita el retiro de los sedimentos en suspensión y de las partículas coloidales. Los factores, que promueven la coagulación-floculación, son el gradiente de la velocidad, el tiempo de residencia, y el pH. El tiempo y el gradiente de velocidad son importantes al aumentar la probabilidad de que las partículas se junten. Por otra parte el pH es un factor prominente en el retiro de coloides.



Figura 2. 13. Unidad de floculación de la planta de tratamiento de aguas aceitosas.

2.1.7 Unidad de Flotación por aire disuelto (DAF)

Base teórica

La flotación es una “operación física unitaria”, esto es, un método de tratamiento en el que predominan los fenómenos físicos, que se emplea para la separación de partículas de una fase líquida. La separación se consigue introduciendo finas burbujas de gas, normalmente aire, en la fase líquida. Las burbujas se adhieren a las partículas, y la fuerza ascensorial que experimenta el conjunto partícula-burbuja de aire hace que suban hasta la superficie del líquido. De esta forma, es posible hacer ascender a la superficie partículas cuya densidad es mayor que la del líquido, además de favorecer la ascensión de las partículas cuya densidad es inferior, como el caso del aceite en el agua. Una vez las partículas se hallan en superficie, pueden recogerse mediante un raspado superficial.

En el tratamiento de aguas residuales, la flotación se emplea para la eliminación de la materia suspendida y para la concentración de los fangos biológicos. La principal ventaja del proceso del proceso de flotación frente al de sedimentación consiste en que permite eliminar mejor y en menos tiempo las partículas pequeñas o ligeras cuya deposición es lenta. Su uso está generalizado para las aguas industriales y no tanto para las urbanas.

Descripción

La flotación como proceso de descontaminación se realiza con microburbujas, de diámetros del orden de 15-100 micrómetros (μm) y con burbujas medianas (100-600 μm). En el primer caso, la capacidad de remoción de carga de estas burbujas es muy pequeña, sin embargo, hoy en día existen técnicas y equipos que generan burbujas de tamaño intermedio. Las burbujas se añaden, o se induce su formación, mediante uno de los siguientes métodos:

1. Aireación a presión atmosférica (flotación por aireación).

2. Saturación con aire a la presión atmosférica, seguido de la aplicación del vacío al líquido (flotación por vacío).
3. Inyección de aire en el líquido sometido a presión y posterior liberación de la presión a que está sometido el líquido (flotación por aire disuelto FAD).

Normalmente, se suelen añadir determinados compuestos químicos para facilitar el proceso de flotación. En su mayor parte, estos reactivos químicos funcionan de manera que crean una superficie o una estructura que permite absorber o atrapar fácilmente las burbujas de aire. Los reactivos químicos inorgánicos, tales como las sales de hierro o de aluminio y la sílice activada, se emplean para agregar las partículas sólidas, de manera que se cree una estructura que facilite la absorción de las burbujas de aire. También se pueden emplear diversos polímeros orgánicos para modificar la naturaleza de las interfases aire-líquido, sólido líquido, o de ambas a la vez. Por lo general, estos compuestos actúan situándose en la interfase para producir los cambios deseados.

Flotación Por Aire Disuelto

En los sistemas Flotación por Aire Disuelto (FAD), el aire se disuelve en el agua residual a una presión de varias atmósferas, y a continuación se libera la presión hasta alcanzar la atmosférica. En las instalaciones de pequeño tamaño, se puede presurizar a 275- 230 kPa mediante una bomba la totalidad del caudal a tratar, añadiéndose el aire comprimido en la tubería de aspiración de la bomba. El caudal se mantiene bajo presión en un calderín durante algunos minutos, para dar tiempo para dar tiempo a que el aire se disuelva. A continuación, el líquido presurizado se alimenta al tanque de flotación a través de una válvula reductora de presión, lo cual provoca que el aire deje de estar en disolución y que se formen diminutas burbujas distribuidas por todo el volumen de líquido.

En las instalaciones de mayor tamaño, se recircula parte del efluente del proceso de FAD (entre el 15% y el 20 %), el cual se presuriza, y se semi-

satura con aire. El caudal recirculado se mezcla con la corriente principal sin presurizar, antes de la entrada al tanque de flotación, lo que provoca que el aire deje de estar en disolución y entre en contacto con las partículas sólidas a la entrada del tanque. Las principales aplicaciones de la flotación por aire disuelto se centran en el tratamiento de vertidos industriales y en el espesado de fangos.

En la Refinería

En esta etapa de tratamiento se produce una última separación de hidrocarburos del agua residual ya tratada anteriormente en las unidades API/CPI y CPS, ayudada por la adición de reactivos químicos. El mecanismo de separación en esta etapa será mediante un proceso de flotación por aire disuelto con dosificación previa de reactivos químicos en una arqueta de coagulación-floculación.

El sistema de flotación se compone básicamente de los siguientes elementos:

- a) Tanque de flotación
- b) Bombas de presurización
- c) Compresor de aire
- d) Panel de control de aire
- e) Tanque de retención
- f) Válvula reguladora de presión.

a) Tanque de flotación

En los tanques de flotación 37-D-02 A/B se separan las materias flotables del líquido de alimentación. El líquido de alimentación es mezclado con el caudal presurizado y saturado de aire, justamente después de la válvula reguladora de presión. Este caudal combinado entra en el tanque de flotación a baja velocidad en el centro y debajo de la superficie. Las minúsculas burbujas de aire se adhieren a las partículas sólidas y líquidas, originando la ascensión de estas a la superficie del líquido. El mecanismo de barrido superficial arrastrará

los flotables hasta una caja colectora. Este mecanismo generalmente opera en continuo.

El líquido clarificado pasa por debajo de una pantalla deflectora, y vierte dentro del canal periférico de descarga.

b) Bombas de Presurización

Las bombas de presurización 37-P-34 A/B y C/D reciclan el líquido clarificado del flotador y/o el efluente de la planta. Las bombas operan aproximadamente a 5,1 Kg/cm².

c) Compresor de aire

El compresor 37-G-01 A/B envía el aire necesario para saturar el caudal de líquido.

d) Panel de control de aire

El panel de control de aire consta fundamentalmente de una válvula de solenoide, que permanece abierta solamente mientras la bomba de presurización funciona, una válvula manual de aguja sirve para regular el caudal de aire, un rotámetro, un regulador de presión y una válvula de seguridad. El objeto de este panel de control es asegurar una aportación precisa de aire al sistema de 4.4 Bar.

e) Tanque de retención (calderín)

El caudal presurizado pasa a través del tanque de retención 37-T-01 A/B, donde se realiza una solución óptima del aire en el agua. El nivel de agua en el tanque de retención es controlado automáticamente por medio de una válvula de desahogo, por purga continua de aire. Esta válvula debe purgar continuamente aire para mantener el líquido al nivel de operación apropiado, nunca debe purgar un chorro continuo de agua.

f) Válvula reguladora de presión

El caudal presurizado y saturado de aire pasa a través de la válvula reguladora de presión, produciéndose a la salida de la misma la despresurización. La presión requerida es mantenida por la válvula reguladora de presión, la cual es ajustada manualmente. Esta válvula no debe utilizarse nunca como válvula de aislamiento. Su objeto es únicamente efectuar una regulación de presión.

El efluente clarificado procedente, bien de las pozas del CPS: 37-S-5 y 37-S-6, ó del "by-pass" del CPS, llegan a la arqueta de recogida de agua del CPS (37-S7). A esta arqueta drena también el colector de drenajes de la Planta. Desde esta poza se alimenta a la Unidad de Flotación con Tratamiento Físico - Químico.

El efluente que sale de las arquetas de floculación pasa por gravedad a la unidad de Flotación por aire disuelto (DAF). La unidad de Flotación tiene por finalidad realizar la separación de los flóculos de aceite y sedimentos con el fin de lograr un efluente con una concentración de aceite < 20 ppm. La Unidad de Flotación está formada por dos 2 celdas de flotación por aire disuelto (DAF) (37-D-02 A/B) que trabajan en paralelo, los cuales han sido diseñados para un caudal unitario de 65 m³/h, siendo la capacidad total de tratamiento de 130 m³/h. Cada unidad de flotación dispone de un calderín de presurización 37-T-01 A/B y cada calderín dispone de dos bombas de presurización 37-P-34 A/B y 37-P-34 C/D respectivamente.

El aire necesario para las Unidades de Flotación, es suministrado por dos 2 compresores 37-G-01 A/B, (uno en funcionamiento y otro de reserva). También suministran el aire necesario para la unidad de flotación de la Planta de Deslastre.

Las natas y lodos recogidos en las dos 2 celdas de flotación DAF, son enviados por gravedad a la arqueta de lodos 37-S-12. El efluente que sale de los DAF's son recogidos en una línea de 8"Ø y puede desembocar a los siguientes destinos:

- Vertedero (canalillo) para luego ir a los emisores submarinos aceitosos

- Arqueta 37-S-10 de recirculación o a los emisores submarinos aceitosos.

Desde la arqueta 37-S-10, el efluente puede ser enviado a los siguientes destinos:

- Red de vertido al mar, cuando el contenido de aceite es menor a 20 ppm
- Retornar al tanque de Slop 31-T-101, cuando sea necesario retornar por corto tiempo para su posterior drenaje a la entrada de separadores primarios.
- Retornar al tanque de crudo 31-T-1C, cuando el contenido de aceite supere los 20 ppm.

En el vertedero (canalillo), aparte del rebose de la arqueta de efluentes recuperados, se recogen los efluentes aceitosos, efluentes de la Planta de Aguas Sanitarias y el efluente de la Planta de Deslastre.

En el vertedero, se tienen instalados un medidor de caudal tipo ultrasónico 37-FI-007, para conocer el caudal de vertido, un medidor de pH. El efluente, también es enviado directo por a la arqueta 37-S-13 (canalillo), hacia el sistema de tuberías del emisor submarino aceitoso.

A esta arqueta también puede rebosar de la Arqueta de Recirculación 37-S-11 en casos de emergencia.

Finalmente el sistema de vertido al mar va por un sistema de tuberías hasta el mar denominado emisores submarinos. El efluente aceitoso de del Planta de Aceitosos y Deslastre más los efluentes sanitarios van por el emisor submarino aceitoso, mientras que los efluentes químicos neutralizados en el área de Energía va de manera separada por los emisores submarino de químicos.



Figura 2. 14. Unidad de flotación por aire disuelto de la planta de tratamiento de aguas aceitosas.

2.1.8 Decantador centrífugo

Base teórica

Las centrifugas son instrumentos que permiten someter a las muestras a intensas fuerzas que producen la sedimentación en poco tiempo de las partículas que tienen una densidad mayor que la del medio que las rodea. En general se diferencian en función de los márgenes de aceleración a que someten a las muestras en:

- a) Centrifugas (de pocas g a aprox. 3,000 g),
- b) Súper-centrifugas (o centrifugas de alta velocidad, rango de 2,000 g a 20,000 g)
- c) Ultracentrifugas (de 15,000 g a 600,000 g)

En las centrifugas se suele controlar la temperatura de la cámara para evitar sobrecalentamiento de las muestras debido a la fricción. En las ultracentrífugas, la velocidad extrema (más de 100,000 rpm), hace que sea necesario hacer un intenso vacío en la cámara de la centrifuga para evitar el calentamiento de rotor y muestra.

Tipos de centrifugas

1. Centrifuga Tubular

- Capaz de separar partículas hasta de 0.1 μm .
- Modelos industriales:
 - 15000 rpm
 - 12000 G
 - Entre 500 y 3500 l/h
 - 2 a 4 kg sólido por lote

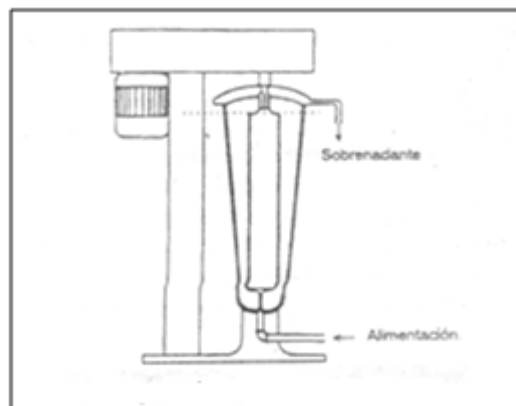


Figura 2. 15. Centrifuga tubular

2. Centrifuga de cámara múltiple

- Diámetro de 335 a 615 mm
- Entre 5000 y 8400 rpm
- 5000 y 9000 G
- Capacidad de sólidos entre 2.5 y 60 litros.

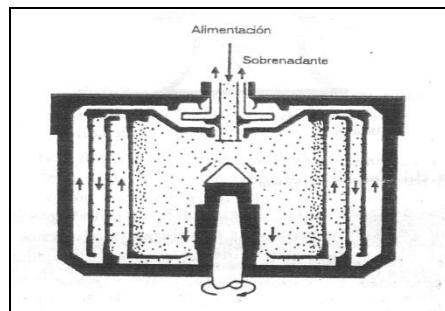
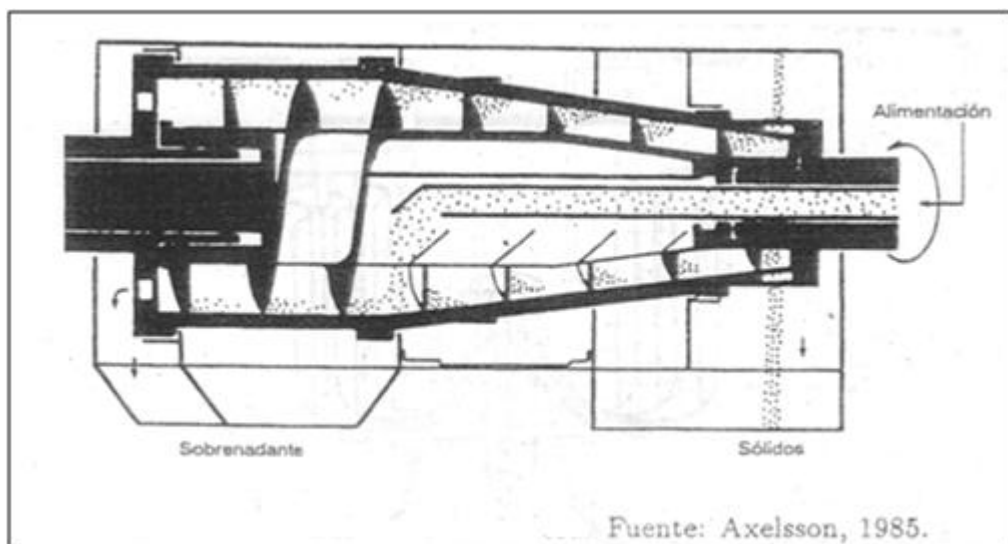


Figura 2. 16. Centrifuga de cámara múltiple

3. Centrifuga de Tornillo

- Velocidades entre 1600 a 6000 rpm
- Campos centrífugos menores.
- Diámetro de 15 a 140 cm.
- Descarga de sólidos de 30 kg/h hasta 60 ton/h
- Alimentaciones entre 3.8 a 1890 l/min.



Fuente: Axelsson, 1985.

Figura 2. 17. Centrifuga de tornillo

4. Centrifuga de Discos

Clasificación según la forma de descarga de sólidos:

- Retención de sólidos.

- Tazón abierto de descarga intermitente de sólidos.
- Válvula tipo boquilla de descarga intermitente de sólidos.
- Boquilla para la descarga continua de sólidos

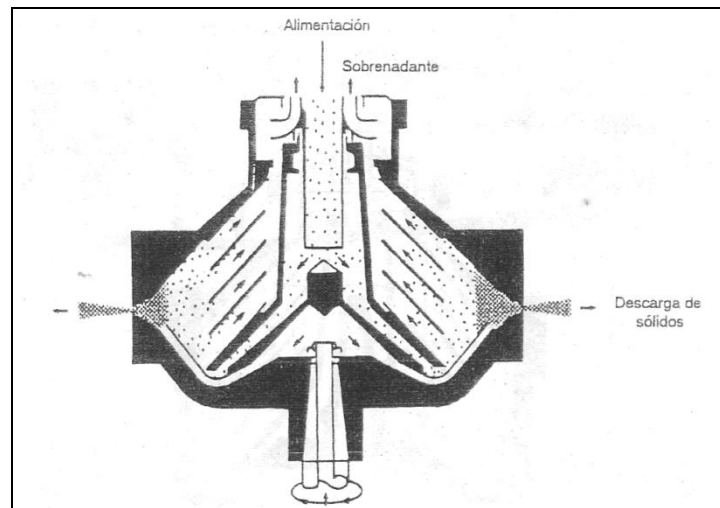


Figura 2. 18. Centrifuga de discos

En la Refinería

Separación de lodos deshidratados

Los lodos separados en las diferentes etapas de tratamiento de la Planta de Efluentes, se recogen en la arqueta 37-S-12. Estas corrientes que llegan a esta arqueta son las siguientes:

- Lodos de los Separadores API/CPI. Llegan impulsadas por las bombas 37-P-30 A/B /35A/B.
- Lodos del CPS de Efluentes Aceitosas. Llegan impulsadas por las bombas 37-P-32 A/B.
- Natas de los DAF 37-D-02A/B. Llegan por gravedad.
- Lodos fondos de los DAF 37-D-02A/B. Llegan por drenaje.
- Natas del DAF de Deslastre 37-D-03. Llegan por gravedad.
- Lodos de fondos del DAF de Deslastre 37-D-03. Llegan por drenaje.
- Lodos del CPS de Deslastre. Llegan impulsadas por la bomba 37-P52A.

Con un nivel de 70 % en la arqueta 37-S-12, se pone en servicio el agitador 37-K-08 para su homogenización a fin de contar con una concentración de 19% de sedimentos como máximo para un buen centrifugado.

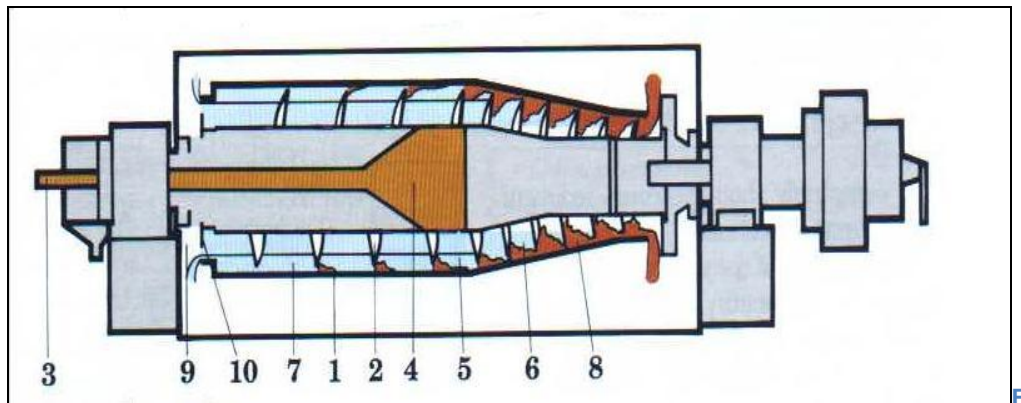


figura 2. 19. Esquema de las partes de una centrífuga del tipo tornillo

Partes de la centrífuga:

- | | |
|---|------------------------------|
| 1. Cono cilíndrico cónico | 6. Producto de Sedimentación |
| 2. Tornillo Extracción helicoidal (rotor) | 7. Nivel de líquido |
| 3. Alimentación | 8. Zona de secado |
| 4. Distribuidor | 9. Líquido clarificado |
| 5. Espacio entre anillo | 10. Límite ajustamiento |

El lodo a ser tratado (3) se introduce axialmente en la unidad mediante un distribuidor apropiado (4). Es propulsado en el espacio anillo (5) que se forma en la superficie interna de la cámara y el cuerpo del rotor. El proceso de agitación tiene lugar dentro de la sección cilíndrica de la cámara. La velocidad relativa del rotor empuja los productos sedimentados (6) a lo largo de la cámara. El arrastre de los sólidos en la longitud del cono permite los sedimentos pasar fuera de la fase líquida clarificada. Mientras la entrada de agua sea continua se establece un nivel líquido (7) en la unidad siguiendo la superficie cilíndrica que constituye la superficie externa del anillo líquido. Una vez han pasado los sólidos fuera del anillo líquido la sección restante del cono produce el drenaje final hasta salida: esta sección se conoce como zona de

secado (8). El líquido clarificado (9) se colecta al otro extremo de la cámara mediante un flujo dentro de un límite ajustable (10), que limite el anillo de líquido de la unidad. Una tapa permite la colección del líquido clarificado (agua aceite) y los sedimentos y protege el rotor.

El fluido clarificado se envía con una bomba portátil al tanque 31-T-18 para su drenaje al Separador API. Para mejorar la separación se adiciona **actualmente** BETZDEARBORN polielectrolito aniónico.

Finalizado la centrifugación, se lava con agua por 30 minutos a fin de limpiar las partes internas con sedimento adherido al rotor.

El lodo deshidratado es acumulado en contenedores de almacenamiento 37K-10-A/B ubicados en la parte inferior de la Centrífuga 37-K-09, de los cuales es trasegado hacia cilindros metálicos, con apoyo de personal de terceros a cargo de Equipos Estáticos.

Mediante la hoja de control de desechos industriales los cilindros con lodos son transportados y entregados en el Punto Limpio por Equipos Estáticos a Medio Ambiente.



Figura 2. 20. Decantador centrífugo de la planta de tratamiento de aguas aceitosas.

2.3. Caracterización de la corriente de agua aceitosa

Las características de las aguas que llegan a la Planta de Tratamiento de Aguas, son las siguientes:

Planta de Aguas Aceitosas

En esta línea se tratan tres 3 corrientes diferentes:

- a) Corriente N° 1: Entrada CPI
- | | |
|--------------------------------|------------------|
| Caudal (m ³ /h): | 60 |
| Aceite (ppm): | 5,000-30,000 (*) |
| pH: | 6.5-9.5 |
| Total sólidos disueltos (ppm): | 2,800 |
| Sólidos en suspensión (ppm): | 490 (*) |
- b) Corriente N° 2: Entrada API "Sur"
- | | |
|--------------------------------|-------------------|
| Caudal (m ³ /h): | 35 |
| Aceite (ppm): | 10,000-25,000 (*) |
| pH: | 6.5-9.5 |
| Total sólidos disueltos (ppm): | 2,800 |
| Sólidos en suspensión (ppm): | 490 (*) |
- c) Corriente N° 3: Entrada API "Norte"
- | | |
|--------------------------------|-------------------|
| Caudal (m ³ /h): | 35 |
| Aceite (ppm): | 20,000-65,000 (*) |
| pH: | 6.5-9.5 |
| Total sólidos disueltos (ppm): | 2,800 |
| Sólidos en suspensión (ppm): | 490 (*) |

NOTA: Los valores marcados con (*) son estimados.



Figura 2. 21. API sur y norte de la planta de tratamiento de aguas aceitosas.



Figura 2. 22. Borneras del CPI de la planta de tratamiento de aguas aceitosas.

2.4. Características del Vertido Final

El efluente final proveniente de las actividades de la refinación del petróleo, tanto de la línea de Aguas Aceitosas como de la línea de Deslastre, debe contener una concentración de **Aceites y Grasas menor a 20 ppm de acuerdo a lo establecido en el D.S.-037-2008 PCM**, valor con el cual se proceder a su vertido al mar a través de los emisores submarinos.

Cuando la concentración de Hidrocarburos es mayor a los 20 ppm debe recircularse vía la Arqueta de Recirculación 37-S-10 al tanque 31-T-1C.

El efluente sanitario a la salida del tratamiento biológico, deberá tener la siguiente calidad de acuerdo al **D.S.-037-2008 PCM**

- DBO (mg/l): < 50
- Cloro Residual(mg/l): < 0.5
- Coliformes Totales(NMP/100ml): = 1000
- Coliformes Fecales(NMP/100ml): = 400

Finalmente los efluentes aceitosos a la salida de la arqueta 37S-10 y el efluente sanitario a través del canalillo se mezclan en las arquetas de paso para seguir su recorrido hacia el sistema de emisores submarinos aceitosos.

En adición La unidad 37 de Tratamiento de Efluentes sirve como medio de paso para los efluentes químicos, los cuáles son previamente neutralizados en el área de energía con un PH ente 6 y 9 y siguen su flujo hacia los emisores submarinos de químicos.



Figura 2. 23. Arqueta/Balsa de homogenización

2.5. Reactivos

Los reactivos que se usan en la Planta de Tratamiento de Aguas Aceitosas, son los siguientes:

- **Coagulante** para Unidades de Flotación de Aguas Aceitosas y Deslastre.
- **Soda cáustica** para Unidades de Flotación de Aguas Aceitosas y Deslastre.
- **Floculante Catiónico** usado en el efluente aceitoso y de deslastre como floculante.
- **Deshidratante Aniónico**, para aumentar la eficiencia de la operación de deshidratación de lodos en la Centrífuga 37K09A.

2.5.1. Polielectrolitos

Los polielectrolitos orgánicos están constituidos por largas cadenas monomoleculares y que producen una floculación extremadamente

diferenciada por formación de puentes entre partículas, gracias a las largas cadenas ramificadas. Según la constitución de los polielectrolitos estos pueden ser catiónicos o aniónicos. El uso de uno u otro depende de las características y contenido orgánico de los fangos.

Los polielectrolitos son grandes moléculas orgánicas solubles en agua, formadas por bloques denominados monómeros, repetidos en una cadena larga. De ordinario incorporan en su estructura sitios para intercambio iónico que dan a la molécula una carga iónica. Aquellas que tienen una carga positiva son catiónicas y las que tienen una carga negativa son aniónicas. Estas moléculas reaccionan con el material coloidal en el agua neutralizando la carga o enlazando partículas individuales para formar un precipitado visible o insoluble, esto es, un flóculo. El desempeño de estos materiales puede modificarse para ajustarlos a la naturaleza de la materia coloidal que debe extraerse del agua. Estas modificaciones incluyen variaciones tanto en el peso molecular como en la capacidad de intercambio iónico. La naturaleza iónica de los polielectrolitos es sólo un factor que determina el desempeño de estos materiales como coagulantes o floculantes. Factores como la naturaleza polar de los enlaces no iónicos en la molécula, el tamaño y la geometría moleculares, tienen una función importante y, en muchos casos dominan a los efectos de la carga y de la densidad de carga. Así, los polímeros no iónicos de alto peso molecular son floculantes efectivos en muchos sistemas en virtud de su capacidad de atraer y mantener partículas coloidales en sitios polares de la molécula. Además, por su tamaño molecular pueden encajar muchas partículas pequeñas.

Así por lo general, los polímeros catiónicos son diseñados para trabajar con valores bajos del pH, y los aniónicos con valores altos. Los no iónicos y los cuaternarios sólo son influidos débilmente por el pH. La regla general no debe interpretarse como que los polímeros aniónicos no son efectivos cuando el pH es bajo; simplemente quiere decirse que, en este caso, ya no son iónicos. Pueden tener buenos resultados en la floculación de sólidos cuando el pH es bajo tan sólo a causa de sus enlaces no iónicos. Lo mismo se aplica a los

catiónicos, aun cuando no están cargados cuando el pH es alto, pueden ser efectivos como coagulantes debido a sus grupos polares.



Figura 2. 24. De izquierda a derecha, Cubetas de coagulante, deshidratante, floculante y Soda Caústica.

2.5.2. Coagulante

El coagulante es una sustancia química que tiene como objetivo favorecer el proceso de desestabilización de las partículas suspendidas de modo que se reduzcan las fuerzas de separación entre ellas. Los coagulantes pueden ser del tipo inorgánico y orgánico.

Todo el funcionamiento del sistema de preparación y dosificación, está controlado por un interruptor manual 37-HS-01, que está enclavado también con las bombas de alimentación al tratamiento físico - químico y con el resto de equipos de dosificación de reactivos para las Unidades de Flotación.



Figura 2. 25. Arquetas de coagulación y floculación

2.5.3. Soda cáustica

Con el fin de ajustar el pH en las arquetas de coagulación de las Unidades de Flotación de Aguas Aceitosas y de Deslastre, para conseguir una flotación óptima, es preciso la dosificación de soda cáustica.

La soda cáustica concentrada al 50% se recibe, en un depósito de acero al carbono (37-T-03), de 5 m³ de capacidad. Este depósito será de tipo cilíndrico horizontal, y dispondrá de válvula de drenaje y rebosadero de seguridad, que descargan en la arqueta 37-S-7. Desde este tanque, la soda cáustica se enviará al depósito 37-T-04 para su dilución. En este depósito de soda cáustica se diluirá con agua de planta para su dosificación, hasta una concentración del 10%.

El depósito de dilución de soda cáustica estará provisto de un agitador (37-K-06), para favorecer la dilución de la soda concentrada con el agua de la Planta.



Figura 2. 26. Drums de almacenamiento del deshidratante y floculante



Figura 2. 27. Drum de almacenamiento de soda cáustica

2.5.4. Floculante catiónico para las unidades de flotación

Para conseguir una buena floculación de los lodos y un funcionamiento óptimo de las Unidades de Flotación, es precisa la dosificación de floculante.

El floculante catiónico se preparará en una unidad compacta de preparación en continuo, que dará servicio tanto a la línea de Aguas aceitosas como de Deslastre. Esta unidad está constituida por los siguientes elementos:

a) Un depósito de 1000 litros de capacidad, dividido en tres compartimentos conectados entre sí por vasos comunicantes con tapas, construidas en AISI-304.

La aspiración de las bombas dosificadoras se realiza desde la parte inferior del tercer compartimento, a través de una salida de 1".

Los tres compartimentos poseen tubería de drenaje con válvulas, a la arqueta 37-S-7.

b) Tres agitadores, uno por cada compartimento, que giran a bajas revoluciones (350 rpm), especiales para la preparación.

c) Un dosificador volumétrico, con tolva auxiliar de 75 litros, con tapa (37-K-19).

d) Cuatro sondas de nivel montadas en el tercer compartimento. Según el nivel, abren o cierran la llegada de agua y paran o arrancan el dosificador (37-LSLL-26, 37-LSH-24, 37-LSL-23 y 37-LSHH-31)

e) Un sistema de entrada de agua de red, con los siguientes accesorios:

- Sistema de humectación, mediante boquillas de pulverización de agua.
- Válvula de corte
- Manómetros (37-PI-45 y 37-PI-46)
- Presostato
- Filtro
- Válvula reductora de presión (37-PCV-53)

- Electro válvula accionada por las sondas de nivel (37-XSV-07).
- Válvula reguladora de entrada de agua de red.
- Rotámetro indicador de caudal (37-R-3710)
- Armario eléctrico de mando y maniobra de sondas, agitadores, electro válvulas, dosificador de sólidos, presostato y bombas dosificadoras.



Figura 2. 28. Cubetas de mezclado, maduración y dosificación de polielectrolito

2.5.5. Deshidratante aniónico para el tratamiento de Lodos

El deshidratante aniónico favorece la sequedad de los lodos en el proceso de centrifugación facilitando la decantación del agua ligada a los lodos provenientes de hidrocarburo.

En la tubería de alimentación de lodos a la centrífuga, se ha previsto un medidor de caudal electromagnético (37-FT-14), con transmisión e indicación en el SCD de la Sala de Control (37-FI-14). Este medidor electromagnético de caudal dispone de un by-pass en caso de emergencia.

Para el correcto funcionamiento de la centrífuga, se requiere el acondicionamiento de los lodos con una solución de deshidratante aniónico.

La mezcla de lodos y el deshidratante se lleva a cabo en un mezclador estático instalado a la entrada de la centrífuga.

En la centrífuga se produce una separación de la materia seca contenida en los lodos, consiguiendo una sequedad aproximada del 20%. Operando con un flujo en el rango de 6.5 a 10 m³/h.

El efluente clarificado se envía a la arqueta de agua del CPS de la línea de aguas aceitosas 37-S-5, para incorporarlo al tratamiento nuevamente.

Para lavado de la centrífuga, se dispone de una conexión de las bombas de presurización de las Unidades de Flotación de la línea de aguas aceitosas.

En esta tubería se encuentra una válvula de control 37-XV-29, accionada por una válvula de solenoide 37-XY-29.

La válvula de solenoide **del sistema de inyección de** deshidratante está enclavada con los siguientes equipos:

- Motor de las bombas de alimentación de lodos a la centrífuga.
- Motor de las bombas dosificadoras de deshidratación.
- Motor del dosificador volumétrico.
- Válvula de solenoide de entrada de agua de planta para preparación.
- Indicadores de nivel del depósito del químico.

A su vez, el motor de la centrífuga está enclavado con el interruptor de bajo nivel y por alta presión.



Figura 2. 29. De la planta de tratamiento de aguas aceitosas.

2.6. Marco Conceptual

2.6.1. Emulsiones

Una emulsión es una mezcla íntima y estable de dos fluidos no miscibles, donde una de las fases se presenta en forma de pequeñas gotas dispersas dentro de la otra fase.

La fase formada por las gotas dispersas, se llama fase dispersa o interna, y la fase en donde las gotas están suspendidas o atrapadas, se llama fase continua o externa. Existen tres requisitos esenciales para formar una emulsión:

- Dos líquidos inmiscibles.
- Suficiente agitación para dispersar uno de los líquidos en pequeñas gotas en el otro.
- Un agente emulsionante para estabilizar las gotas dispersas en la fase continúa.

Estas tres condiciones se encuentran en la producción de un campo petrolero de la siguiente forma:

- Presencia de agua y petróleo, como fluidos inmiscibles.

- La agitación se origina desde la formación productora y luego a través de la tubería de producción, en la línea de flujo, en el múltiple de producción, en las bombas, válvulas, etc.
- De la formación se producen agentes emulsificantes naturales, tales como asfaltenos, parafinas, arcillas, etc.

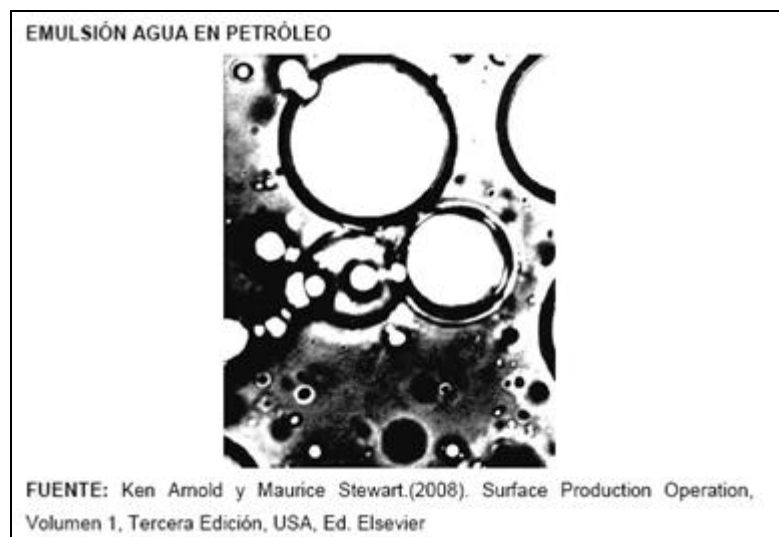


Figura 2. 30. Representación de una emulsión de agua en petróleo

La cantidad de agua remanente emulsionada varía desde 1 a 60 % en volumen. Para los crudos medianos y livianos (mayor a 20 °API) las emulsiones contienen normalmente de 5% a 20% de volumen de agua, mientras que en los crudos pesados y extra pesados (menor a 20 °API) tienen a menudo de 10% a 35% de volumen de agua.

La figura 2.30 muestra una emulsión agua en petróleo, donde las gotas dispersas de agua no pueden unirse debido a la película de agente emulsificante que las rodea.

2.6.1.1. Clasificación de las emulsiones

Según su naturaleza:

- Normales o directas: son emulsiones de agua en petróleo, donde la fase externa o continua es el petróleo, y la fase interna o dispersa es el agua.

- Inversas: son emulsiones de petróleo en agua, donde la fase externa o continua es el agua, y la fase interna o dispersa es el petróleo.

Según su facilidad para romperlas:

- Duras: son muy estables y difíciles de romper, principalmente porque las gotas dispersas son muy pequeñas.
- Suaves: son inestables y fáciles de romper.

2.6.2. Lodos

2.6.1.2. Lodos inorgánicos

Hay muchos lodos inorgánicos que contienen materiales residuales o materias primas provenientes de procesos de separación, con posibilidades de mezclarse con otros productos, una vez recuperadas, y dar utilidad al conjunto. Sus propiedades básicas son la inercia y tendencia a asentarse rápidamente y constituir aglomeraciones densas. La densidad varía entre 1,5 y 2,5. Los lodos y barros aguados de la minería del carbón, las arcillas, los minerales y particulados finos tales como polvos de hierro y acero, el yeso. La arena, entran todos dentro de la categoría que nos ocupa. En ocasiones se compactan después de la sedimentación y requieren ser agitados o convertidos en pasta para su bombeo o manipulación. Cuando se hallan en el fondo de las lagunas, estas materias tienen que ser dragadas para poderlas retirar. En vista de su naturaleza poco reactiva, las situaciones que propician el desprendimiento de olores nauseabundos solamente se presentan si tienen contaminación orgánica, o si actúan en ellos las bacterias que reducen los sulfatos a sulfuros.

Los materiales fibrosos de origen vegetal, los cabellos y los papeles, también forman lodos densos con bastante facilidad. Los lodos de hidróxidos metálicos, formados mediante la reacción de hidróxido sódico o de cal para eliminar sustancias tóxicas de agua negras en la proporción que prescriben los Consentimientos de descarga, son ligeros y flocculantes, precisando condiciones de quietud para sedimentarse en tanques provistos de deflectores a la entrada y salida del líquido, un fondo en pendiente, y un régimen periódico de retirada del lodo.

2.6.1.3. Lodos orgánicos

Los lodos orgánicos suelen ser malolientes y tienden a experimentar descomposiciones biológicas, dejando en libertad gases que pueden ser nocivos, explosivos, o inflamables, como hidrógeno, metano, sulfuro de hidrógeno, y otros que no son nada de lo anterior, como nitrógeno y dióxido de carbono. Estas reacciones dependen de la temperatura. Como el contenido de agua muchas veces está unido biológicamente, la deshidratación es más difícil, y cuando se sedimentan en condiciones de calma siempre forman bandas alternativas de lodo y agua. La densidad de casi todos los lodos formados durante el tratamiento de depuración de aguas negras fluctúa entre 1,03 y 1,06. Los lodos orgánicos brutos, no tratados, representan una fuente potencial de energía cuando se digieren o incineran, y los lodos de aguas negras son valiosos fertilizantes y acondicionadores de tierras.

Después de digerido, el lodo desprende olor a tierra, y su manipulación no es desagradable. El contenido orgánico puede haber menguado en 25%, y el lodo tendrá dificultades para su deshidratación.

2.6.3. Coloides

Los coloides son suspensiones de partículas en un medio molecular. Para que estas suspensiones sean consideradas coloides, las partículas han de tener dimensiones en el intervalo 10 nm - 10µm.

Son sistemas ubicuos en la naturaleza y con grandes aplicaciones tecnológicas: la sangre (suspensión de glóbulos rojos y otras partículas en un medio acuoso), la leche (suspensión de gotitas de grasa en agua), los huesos, las nubes, la atmósfera, las pinturas, las tintas, y un sinnúmero de sistemas y materiales, biológicos y sintéticos, son coloides.

La característica fundamental que hace a estos sistemas interesantes es que los fenómenos de superficie juegan un gran papel, debido a la enorme relación entre el área y el volumen del sistema. Por ejemplo, 1 kg de esferas

de polímero de diámetro 200 nm (lo que tendríamos en cinco litros de pintura) poseen una superficie total de unos 15000 m², es decir, una enorme cantidad de interface en el sistema.

Otra característica importante de un coloide es su estabilidad, es decir, que el coloide pueda mantener un estado en el que las partículas que lo forman no se peguen entre sí (en el caso de la leche, no es bueno que se corte, esto es, que la grasa forme un cuerpo independiente del agua, o que la sangre forme coágulos). En contra de la estabilidad de las suspensiones coloidales esta la gravedad, que tiende a depositar las partículas coloidales en el fondo del recipiente que contiene al coloide, y la tendencia que tengan las partículas a agregarse debido a interacciones atractivas entre ellas (esta es la razón por la que es tan importante entender las interacciones entre las partículas coloidales). Esta última tendencia se puede evitar introduciendo diversos tratamientos que hacen que las partículas se repelan. A favor de la estabilidad esta el llamado movimiento browniano.

2.6.4. Flóculos

Masa floculada que es formada por la acumulación de partículas suspendidas. Puede ocurrir de forma natural, pero es usualmente inducido e orden de ser capaz de eliminar ciertas partículas del agua residual.

2.6.5. La capa de Stern y su influencia en la desestabilización de las cargas

Interacción de los coloides

Los coloides están en todas partes y la medición del potencial zeta puede ser utilizado para su conocimiento y control. Entre ellos pueden incluirse complejos sistemas biológicos como la sangre o sistemas funcionales como

las pinturas. Los sistemas coloidales pueden ser tan espesos como una pasta, tipo cemento, o tan diluidos como las que enturbian las aguas de los lagos.

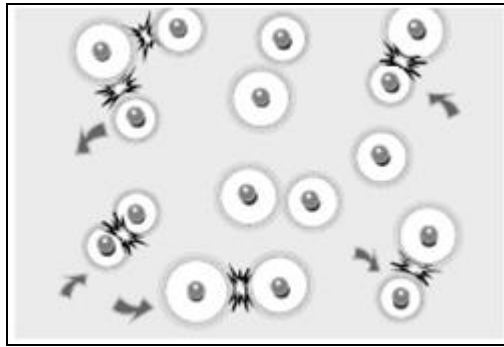


Figura 2. 31. Partículas cargadas que se repelen unas a otras.

El agua, la leche, el vino, el barro, las tinturas, la tinta, el papel y algunos productos farmacéuticos son buenos ejemplos de sistemas coloidales. Las suspensiones coloidales son comúnmente acuosas, aunque también pueden ser utilizadas suspensiones no acuosas. En cada caso las propiedades físicas y cualidades de las suspensiones están fuertemente afectadas por las propiedades de los coloides. Podremos cambiar las características de una suspensión al comprender las interacciones de un coloide individual con otro. En ocasiones buscamos maximizar las fuerzas repulsivas entre ellos, para así producir suspensiones estables. Las repulsiones mutuas entre partículas adyacentes impiden la unión de grandes y rápidas sedimentaciones de aglomerados. En los tratamientos de purificación de agua se debe, por el contrario, minimizar las fuerzas de repulsión entre las partículas que las enturbian, para que así se formen grandes aglomerados que sedimenten y filtren fácilmente.

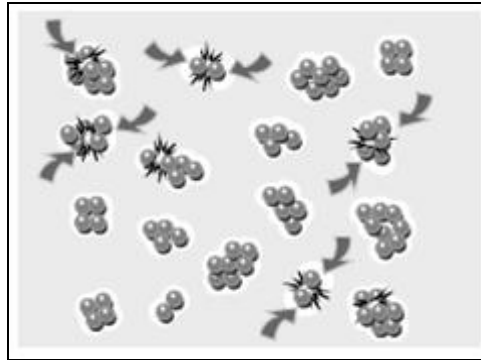


Figura 2. 32. Partículas sin carga están libres para chocar y aglomerar.

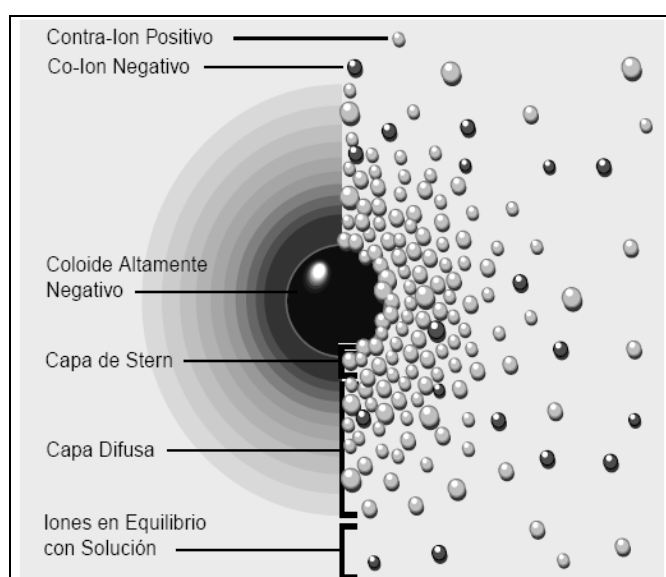
Por su tamaño microscópico, las fuerzas de unión en la superficie del coloide y el líquido son las que determinan su comportamiento. Uno de los mayores efectos de la superficie son los fenómenos electrocinéticos. Cada coloide contiene una carga eléctrica que suele ser de naturaleza negativa, aunque también puede ser positiva. Estas cargas producen fuerzas de repulsión electrostática entre los coloides vecinos. Si la carga es suficientemente elevada los coloides permanecen discretos, dispersos y en suspensión. Reduciendo o eliminando estas cargas se obtiene el efecto opuesto y los coloides se aglomeran y sedimentan fuera de la suspensión.

La doble Capa

Se usa el modelo de la doble capa para visualizar la atmósfera iónica en la proximidad del coloide cargado y para explicar cómo actúan las fuerzas eléctricas de repulsión. Es posible entender este modelo como una secuencia de etapas que ocurren alrededor de un solo coloide negativo, si los iones que neutralizan sus cargas son repentinamente sacados. Veamos primero el efecto del coloide sobre el ion positivo (llamado *contra-ion*) en la solución. Inicialmente, la atracción del coloide negativo hace que algunos iones positivos formen una rígida capa adyacente alrededor de la superficie del coloide; esta capa de contra-iones es conocida como la *capa de Stern*. Otros iones positivos adicionales son todavía atraídos por el coloide negativo, pero estos son ahora rechazados por la capa de Stern, así como por otros iones

positivos que intentan acercarse al coloide. Este equilibrio dinámico resulta en la formación de una *capa difusa* de contra-iones. Los contra-iones tienen una alta concentración cerca de la superficie, la cual disminuye gradualmente con la distancia, hasta que se logra un equilibrio con la concentración de los contra-iones en el seno de la disolución.

La capa difusa puede ser visualizada como una atmósfera cargada rodeando al coloide.



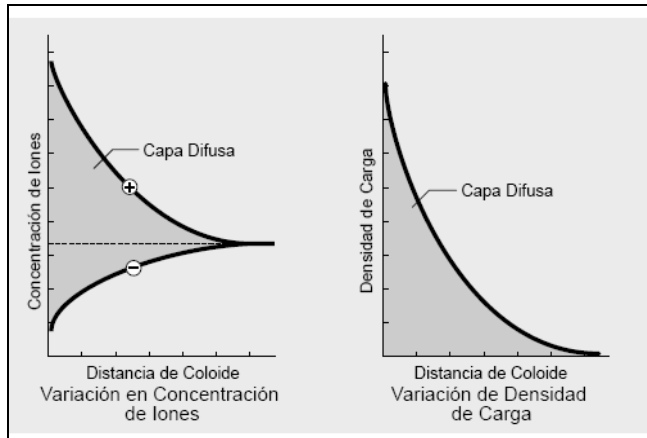
La vista izquierda muestra el cambio en la densidad de carga alrededor del coloide. La derecha muestra la distribución de iones positivos y negativos alrededor del coloide cargado.

Figura 2. 33. Dos maneras de visualizar la Doble Capa.

En forma similar, aunque opuesta, en la capa difusa hay un déficit de iones negativos, llamados *co-iones* pues tienen la misma carga que el coloide. Su concentración se incrementa gradualmente al alejarse del coloide, mientras que las fuerzas repulsivas del coloide son compensadas por los iones positivos, hasta alcanzar nuevamente el equilibrio. La capa difusa puede ser visualizada como una atmósfera cargada rodeando al coloide. A cualquier distancia de la superficie, la densidad de carga es igual a la diferencia de concentración entre iones positivos y negativos. La densidad de carga es mucho mayor cerca del coloide y gradualmente disminuye a cero cuando las concentraciones de iones positivos y negativos se asemejan. Los contra-iones de la capa de Stern y de la capa difusa son los que juntos llamaremos la

doble capa. El espesor de esta doble capa depende del tipo y concentración de los iones de la solución.

El coloide negativo y su atmósfera cargada positivamente producen un potencial eléctrico relativo a la solución.

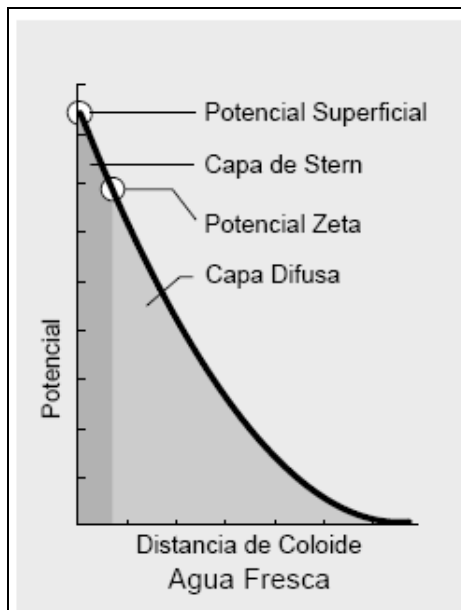


Estas figuras son dos representaciones del cambio en densidad de carga en la capa difusa. La primera muestra la variación en la concentración de iones positivos y negativos con la distancia de un colide negativo. La segunda enseña el efecto neto; eso es, la diferencia en la densidad de carga positiva y negativa.

Figura 2. 34. Variación de densidad de iones

2.6.6. El potencial Zeta

El coloide negativo y su atmósfera cargada positivamente producen un potencial eléctrico relativo a la solución. Este tiene un valor máximo en la superficie y disminuye gradualmente con la distancia, aproximándose a cero fuera de la capa difusa. La caída del potencial y la distancia desde el coloide es un indicador de la fuerza repulsiva entre los coloides en función de la distancia a las cuales estas fuerzas entran en juego. Un punto de particular interés es el potencial donde se unen la capa difusa y la de Stern. Este potencial es conocido como el potencial zeta, el cual es importante porque puede ser medido de una manera muy simple, mientras que la carga de la superficie y su potencial no pueden medirse. El potencial zeta puede ser una manera efectiva de controlar el comportamiento del coloide puesto que indica cambios en el potencial de la superficie y en las fuerzas de repulsión entre los coloides.



La relación entre potencial zeta y potencial superficial depende del nivel de iones en la solución. En agua fresca, la gran doble capa hace que el potencial zeta sea una buena aproximación del potencial superficial.

Figura 2. 35. Potencial Zeta contra Potencial Superficial

El balance de Repulsión y Atracción

La teoría DLVO (llamada así por Derjaguin, Landau, Verwey y Overbeek) es la clásica explicación de los coloides en suspensión. Esta se basa en el equilibrio entre las fuerzas opuestas de repulsión electrostática y atracción tipo van der Waals y explica por qué algunos coloides se aglomeran mientras que otros no lo hacen.

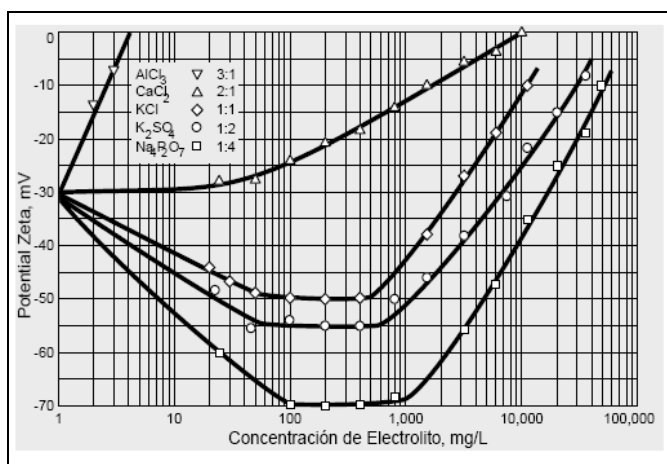
La repulsión electrostática llega a ser importante cuando los coloides se aproximan y la doble capa comienza a interferir. Se requiere energía para superar esta repulsión y forzar la unión entre las partículas. Esta energía aumenta fuertemente cuando las partículas se acercan. Se usa una curva de repulsión electrostática para indicar la cantidad de energía que hay que vencer para que las partículas puedan ser forzadas a juntarse. Esta energía llega a un valor máximo cuando las partículas están casi juntas y disminuye a cero fuera de la doble capa. Su valor máximo está relacionado con el potencial de la superficie.

La atracción de van der Waals entre los coloides es ciertamente el resultado de las fuerzas entre las moléculas individuales de cada coloide. El efecto es aditivo; o sea, una molécula del primer coloide experimenta la atracción de

van der Waals de cada molécula del segundo coloide. Esto se repite para cada molécula del primer coloide y la fuerza total corresponde a la suma de todas ellas. Se usa una curva de energía de atracción para indicar la variación en las fuerzas de van der Waals con la distribución entre las partículas. La teoría DLVO explica la tendencia de los coloides a aglomerarse o permanecer separados al combinar la atracción de van der Waals y la curva de repulsión electrostática: la curva combinada es llamada la *energía neta de interacción*. A cada distancia el pequeño valor se resta del mayor valor para dar la energía neta. El valor neto se representa entonces arriba si es repulsivo o abajo si es atractivo, y así se forma la curva. La curva de interacción neta cambia siempre de atracción a repulsión y nuevamente a atracción. Si existe una zona repulsiva, entonces el punto de máxima energía de repulsión se llama la *barrera de energía*. La altura de esta barrera indica cuan estable es el sistema.

Para aglomerar dos partículas que van a chocar estas deben tener suficiente energía cinética debido a su velocidad y masa, como para pasar sobre dicha barrera. Si la barrera desaparece, entonces la interacción neta es totalmente atractiva y consecuentemente las partículas se aglomeran. Esta región interna es referida como la *trampa de energía*, pues los coloides pueden considerarse como sistemas unidos por fuerzas de van der Waals.

Dependiendo de nuestros propósitos es posible alterar el entorno del coloide para aumentar o disminuir la barrera energética. Varios métodos pueden ser usados para este propósito, tales como cambios en la atmósfera iónica, el pH o agregando compuestos activos para afectar directamente la carga del coloide. En cada caso la medida del potencial zeta indicará el efecto de la alteración, principalmente en su estabilidad.

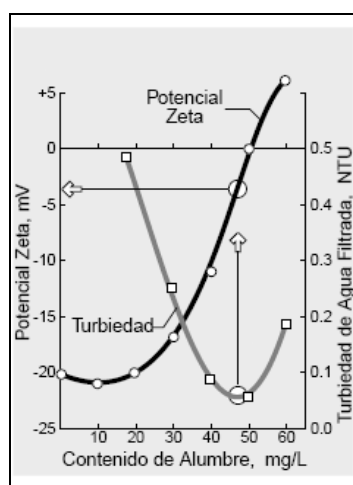


Electrolitos simples e inorgánicos pueden tener un efecto significativo en el potencial zeta. El efecto frecuentemente depende de la valencia relativa de los iones y de su concentración. En este ejemplo, el potencial zeta de una suspensión diluida de sílice coloidal fue modificado al añadir diferentes electrolitos.

Figura 2. 36. Efecto de tipo y concentración de electrolitos.

La coagulación del agua y desagüe

El potencial zeta es una manera adecuada de optimizar la dosificación de coagulante en el agua y en tratamientos de desagüe por coagulación. Los sólidos suspendidos más difíciles de remover son los coloides.



No hay un solo potencial zeta que pueda garantizar una buena coagulación en cada planta de tratamiento de agua. Frecuentemente será entre 0 y 10mV pero el valor óptimo es mejor establecido por medio de una prueba usando una planta piloto o experiencias en operación.

Figura 2. 37. Control de Potencial Zeta sobre contenido de Alumbre

Por su diminuto tamaño, ellos escapan fácilmente tanto a la sedimentación como a la filtración. El método para remover el coloide es mediante la disminución del potencial zeta con coagulantes tales como el alumbre, cloruro férrico y/o polímeros catiónicos. Una vez reducida o eliminada la carga no existirán fuerzas repulsivas y la ligera agitación del estanque de floculación causará numerosos choques entre los coloides. Esto resulta primero en la

formación de sistemas micro floculados los cuales crecen hasta llegar a ser sistemas floculados visibles que se acomodan rápidamente y pueden ser filtrados fácilmente.

Potencial zeta en la reducción del volumen de lodo

Un factor importante que influye en la desestabilización de la carga de las partículas presentes en el lodo es el potencial zeta. Las propiedades de las partículas sólidas presentes en el lodo son: tamaño fino, grado de hidratación, interacción entre ellas y carga electrostática, éstas inhiben el espesamiento y la deshidratación de los lodos debido a su composición química y estructura coloidal (EPA, 1974; Cheremisinoff, 1994).

El lodo presenta una estructura coloidal, generalmente coloides negativos, que se estabilizan e impiden una mayor agregación de las partículas que lo constituyen. La coagulación y floculación de estas suspensiones coloidales permite, en la mayoría de los casos, romper su estructura coloidal (Ruiz, *et al.* 1986).

El lodo es una suspensión coloidal estable, por lo que el objetivo del acondicionamiento es ajustar las condiciones físicas y químicas hasta reducir la carga de la partícula, lo cual resulta en la liberación del agua y la agregación de las mismas (Cheremisinoff, 1994). Al utilizar un polímero catiónico, éste neutraliza las cargas negativas de los coloides y anula el potencial zeta, por el contrario un aniónico y un no iónico no anulan las cargas. Sin embargo, existe una adsorción de radicales activos de la cadena del polímero sobre las partículas, creándose una modificación en su superficie y en el potencial zeta, produciéndose una aglomeración mediante un mecanismo de reticulación (Barraque, 1979). Hay que distinguir dos aspectos fundamentales en el acondicionamiento del lodo:

- a) La desestabilización de las partículas, o sea la disminución de las fuerzas que las mantienen separadas.
- b) El transporte de las partículas desestabilizadas para llevar a cabo un contacto, generalmente estableciendo puentes entre sí y formando una malla

tridimensional de flóculos porosos (Richter, *et al.* 1973; Weber, 1979; Arboleda, 1982).

El primer aspecto se refiere a la *coagulación* y el segundo a la *floculación*. La coagulación comienza en el mismo instante en que se agrega el reactivo al lodo y dura solamente fracciones de segundo. Básicamente consiste en una serie de reacciones físicas y químicas, entre el coagulante y la superficie de las partículas del lodo. La floculación es la etapa de transporte provocando el crecimiento de las partículas aglomeradas (Richter, 1973; Arboleda, 1982).

2.6.7. Teoría de deshidratación de lodos

La deshidratación es, en la mayoría de los casos, la fase final en lo que a la línea de lodos se refiere. La deshidratación es una operación física utilizada para reducir el contenido de humedad del fango por alguna o varias de las razones siguientes:

1. Los costes de transporte del fango por camión hasta el lugar de su evacuación son notablemente menores cuando se reduce el volumen por deshidratación.
2. El fango deshidratado es, generalmente, más fácil de manipular que el fango espesado o líquido.
3. La deshidratación es generalmente necesaria antes de la incineración del fango para incrementar su poder calorífico por el exceso de humedad.
4. En algunos casos, puede ser necesaria la eliminación de humedad para lograr que el fango sea totalmente inodoro y no putrescible.
5. La deshidratación del fango se precisa, normalmente, antes de su vertido a vertederos controlados para reducir la producción de lixiviados en la zona del vertedero.

En el caso de la deshidratación mecánica, los fangos deben ser previamente acondicionados, bien química o térmicamente. La deshidratación supone una separación de agua y sólidos. Los contenidos que puedan conseguirse dependen, entre otros factores, de la composición del fango alimentado. Entre los distintos sistemas de deshidratación existente cabe destacar los siguientes: lechos de secado, filtros de vacío, centrifugas y los filtros banda.

En la Refinería

Lodos a tratar

- Lodos acumulados de planta efluentes
En la poza de concreto lado Oeste se almacenará los lodos generados en la planta de efluentes y que no fueron centrifugados debido a problemas mecánicos en la centrífuga 37K9 y/o bombas de lodos 37P41AB.
- Lodos de tanque de almacenamiento
En los tanques de almacenamiento por lo general de Crudo y de Productos Residuales, sedimentan en el fondo de los tanques lodos de hidrocarburo en cantidades variables con trazas de materiales inorgánicos.

En la actualidad, se busca mejorar la gestión de residuos y disminuir los gastos que significan la disposición de los lodos o borra de la descarga de la centrífuga; para lo cual, se busca la máxima reducción del contenido acuoso del lodo mediante la adición de un polielectrolito adecuado en el acondicionamiento de los lodos a procesar.

Si los resultados reportan un lodo o borra con mayor porcentaje en hidrocarburo lo re-inyectaremos en los tanques de crudo o residual que tengan agitador según sea la procedencia del lodo o borra

Procedimiento de tratamiento de lodos en pozas de concreto

Acciones previas

Tomar muestras representativas de los lodos contenidos en las pozas de concreto lado Este y Oeste y poza 37S12, efectuar los siguientes análisis:

Contenido de aceite (ppm volumen)

Sólidos en suspensión (% peso)

Agua (% Vol.)

Peso específico

Los lodos de planta efluentes acumulados en pozas de concreto se transferirá a la poza 37S12, mediante la una manguera conectada desde el drenaje de

cada poza hacia la arqueta 37S12. Los lodos serán diluidos con agua contraincendio.

La transferencia a la 37S12 se efectuará por lotes de 15 m^3 , equivalentes a aumento de nivel de 0.5 m en la poza 37S12. Previamente a cada transferencia, verificar que el nivel en la poza 37S12 esté entre 1,0 – 1,5 m. Luego de homogenizar el contenido de la 37S12 mediante su agitador 37K8, proceder a la centrifugación de acuerdo con procedimiento normal.

Continuar las transferencias hasta vaciar las pozas de concreto. El remanente de la poza lado Este será diluido con agua contra incendio, repitiendo la operación de trasiego al lado Oeste las veces que sea necesario hasta que tenga calidad similar a la alimentación de diseño a la centrífuga de lodos, que se muestra a continuación:

Contenido de aceite = 30,800 ppm

PH = 7.0

Sólidos en suspensión = 1.2 % peso

(Arenas, tierras arrastradas, Hidróxido de aluminio, Hidrocarburos)

Peso específico = 1.048

En estas condiciones, reubicar la succión de la bomba de trasiego al lado Este y completar la transferencia a la 37S12 hasta vaciarla.



Figura 2. 38. Centrífuga de tornillo de la planta de tratamiento de efluentes residuales.

Misiones del proceso de separación de aceites y grasas

Entre las misiones que tiene encomendado el proceso de separación de grasas y aceites, se encuentran:

- Eliminación de la mayor parte aceites y grasas del efluente.
- 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.

Factores que afectan la separación de aceites y grasas

Dentro de los factores que afectan al rendimiento de la separación agua-aceite, se encuentran:

- Tipo y composición del aceite que se pretende eliminar, debido a su peso específico.
- Estado en que se encuentra el aceite en el efluente. Las emulsiones son las más difíciles de separar.
- Régimen de flujo.
- Tamaño de la gota (de forma generalizada, se diseña para eliminar aquellas partículas de diámetro igual o superior al fijado previamente, normalmente 0,15 mm).

Equipos utilizados en separación de aceites y grasas

Para llevar a cabo este proceso se utilizan los siguientes equipos:

- Trampas de aceites
- Separadores API
- Separadores de placas

- Tanques gravimétricos

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, así como aquellas gotas de tamaño inferior a fijado en el diseño, de tal forma que en las plantas depuradoras que precisan eliminar este tipo de compuestos, posteriormente a esta unidades se suele precisar tratamientos posteriores de afino. Este proceso es considerado un pretratamiento.

Tabla 2. 1. Equipos utilizados para la separación de grasa y aceite.

Tipo	Rendimiento	Coste Inicial	Aplicaciones
Trampas de aceites	BAJO	BAJO	Pequeñas instalaciones, talleres, etc.
Separadores API	BUENO	ALTO	Grandes instalaciones, refinerías, petroquímicas, parques de almacenamiento, 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.

Residuos Generados

Las grasas y aceites separados en los diferentes equipos indicados anteriormente están clasificados como residuos tóxicos y peligrosos, lo que conlleva su retirada 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.

2.6.8. Teoría de Centrifugación

En las separaciones centrifugas solido-liquido la velocidad de sedimentación es mayor que la sedimentación libre o gravitacional, debido a que los equipos al girar producen una mayor aceleración de las partículas.

Factor G

En la caracterización y escalamiento de centrifugas frecuentemente se emplea el factor G, que es una medida relativa de la velocidad de sedimentación de una partícula en un campo centrifugo con respecto a su velocidad de sedimentación en el campo gravitacional.

$$G = \frac{v_w}{v_g} = \frac{w^2 * r}{g} \dots\dots\dots(2.1)$$

Tabla 2. 2. Características de procesamiento.

Tipo de Centrifuga	Método de descarga de sólidos	Capacidad lavado de torta	Flujo de la Alimentación L/min	Fuerza g Máxima
Tubular	Intermitente	Ninguna	8 - 100	12,000 - 16,000
Cámara Múltiple	Intermitente	Ninguna	1.5 - 335	5,000 - 9,000
Discos y boquillas	Continuo	Moderada	3,8 - 3,780	5,000 - 8,500
Discos Tazón abierto	Intermitente	Ninguna	3,8 - 1,500	5,000 - 7,000
Discos y boquillas	Intermitente	Ninguna	3,8 - 570	14,000 - 16,000
Discos Intermitentes	Intermitente	Ninguna	0,38 - 1,500	5,000 - 8,000
Tazón Sólido	Intermitente	Ninguna	1,5 - 250	500 - 800
Decantadora	Continuo	Moderada	3, 8 - 1,800	2,000 - 3,200

Adaptada de: Meir, 1988

G puede ser referida a un radio característico el cual generalmente es el radio exterior del campo centrífugo. Esto permite desarrollar expresiones prácticas para estimar la G de la siguiente forma

$$G = 5,6 * 10^{-7} N^2 D \dots\dots\dots(2.2)$$

Donde:

D = Diámetro en mm

N = Velocidad de rotación en rpm

$$G = 5,6 * 10^{-7} * 4200^2 * 1200$$

$$G = 11\ 854$$

Para este valor de G, según la tabla 2.1 le corresponde un tratamiento en una centrífuga del tipo tubular.

Diseño de centrífuga tubulares

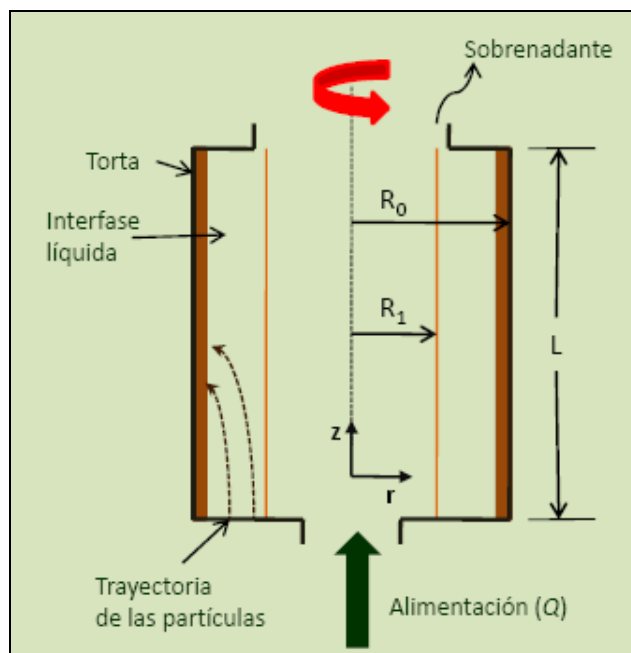


Figura 2. 39. Centrífuga tubular.

1. La velocidad de rotación y el radio de giro de la centrifuga determinan la velocidad de sedimentación que se puede lograr en un equipo de sedimentación centrifugo.
2. La velocidad de sedimentación conjuntamente con la distancia de sedimentación, determinan el tiempo de sedimentación
3. El gasto (Q) determina el tiempo de residencia de las partículas en un equipo dado

El gasto manejable en una sedimentación centrifuga depende de la geometría especifica del equipo, de su velocidad de giro y de las propiedades del mismo.

Para producir un liquido libre de sólidos, el tiempo de sedimentación en el equipo debe ser igual o menor al tiempo de residencia de las partículas impuesto por el flujo de gasto volumétrico (Condición de diseño)

Suposiciones para el diseño

- a. La alimentación es una solución diluida
- b. Las partículas se distribuyen uniformemente en la capa anular
- c. Las partículas sedimentan de acuerdo a la Ley de Stokes
- d. La distancia entre la superficie del liquido y la pared de la centrifuga es constante

Tiempo de residencia

La velocidad del fluido en el sentido axial esta dado por:

$$v_z = \frac{dz}{dt} = \frac{Q}{A} \dots\dots\dots(2.3)$$

$$d_p = 0,15mm$$

El área de flujo es igual a la sección transversal de la capa anular del fluido y está dada por:

$$A = \pi(R_0^2 - R_1^2) \dots\dots\dots(2.4)$$

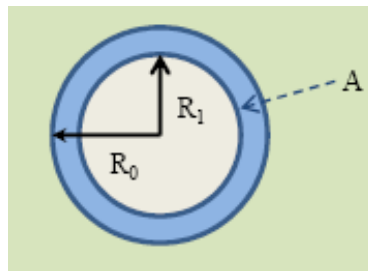


Figura 2. 40. Esquema de la sección transversal de una centrifuga tubular

R_1 = Distancia radial del eje de giro a la superficie del liquido

R_0 = Distancia del eje de giro a la pared del carcaza.

Con los limites de integración adecuados se puede obtener el tiempo de residencia de las partículas dentro de la centrifuga

$$\int_0^L dz = \frac{Q}{\pi(R_0^2 - R_1^2)} \int_0^{tr} dt \dots\dots\dots(2.5)$$

L = Longitud de la centrifuga

tr = tiempo de residencia de la partícula

Integrando la ecuación 2.5:

$$t_r = \frac{\pi(R_0^2 - R_1^2)L}{Q} \dots\dots\dots(2.6)$$

Tiempo de Sedimentación

a) 100% de sedimentación

El tiempo de sedimentación t_s de una partícula localizada en la superficie de la capa anular del fluido en R_1 (que es la más alejada de la pared, o más difícil de sedimentar), puede ser obtenida de la Ley de Stokes considerando el movimiento de la partícula en el sentido radial,

$$v_r = \frac{dr}{dt} = \frac{d_p^2 (\rho_s - \rho) w^2 r}{18\mu} \dots\dots\dots(2.7)$$

En este caso inicialmente la partícula se localiza en R_1 y en el momento t_s de alcanzar la pared en R_0 , de tal manera que:

$$\int_{R_1}^{R_0} \frac{dr}{r} = \frac{d_p^2 (\rho_s - \rho) w^2}{18\mu} \int_0^{t_s} dt \dots\dots\dots(2.8)$$

$$t_s = \frac{18\mu}{d_p^2 (\rho_s - \rho) w^2} \ln \frac{R_0}{R_1}$$

$$t_s = \frac{18\mu}{d_p^2 (\rho_s - \rho) w^2} \ln \frac{R_0}{R_1} \dots\dots\dots(2.9)$$

Para ilustrar se tiene la siguiente caracterización del efluente aceitoso:

Turno 2 del 17/11/2012

$API = 16.9$

$\mu = 3,22CPo$

$API = 0,95$

$d_p = 0,15mm$

$t_s = 0.7466 \text{ horas} = 44,8 \text{ min}$

Definición Sigma

El concepto de Sigma ha sido muy utilizado en el campo de la sedimentación centrífuga desde que este fue desarrollado (Ambler, 1957). Sigma es un área característica de cada tipo de centrifuga y se utiliza para efectuar comparaciones y escalamiento de equipo.

En el caso de la centrifuga tubular el valor de Sigma puede ser definido a partir de la ecuación anterior de la siguiente forma:

$$\Sigma = \frac{\pi w^2 L (R_0^2 - R_1^2)}{g \ln \frac{2R_0^2}{R_0^2 + R_1^2}} \dots\dots\dots(2.10)$$

Sigma es una constante que contiene solo parámetros relacionados a la geometría de la centrifuga y su velocidad angular.

Tabla 2. 3. Factores Sigma (Ambler, 1957):

Centrifuga	Sigma, m ²
Intermitente	20-200
Decantadora	150-2 500
Discos	400-120 000
Tornillo	2 000-300 000

Nomenclatura

- μ:** Viscosidad en centipoises.
- B:** Anchura API en m.
- D:** Profundidad API en m.
- d:** Diámetro de la partícula en mm.
- F:** Factor de diseño compuesto por un factor de turbulencia y un factor de cortocircuito.
- g:** constante gravitatoria.
- L:** Longitud API en m.
- Q:** Caudal en m³/h, ó m³/s (Q_{max} Caudal máximo en m³/h).
- S_c:** Superficie transversal, m².
- S_h:** Superficie horizontal, m².
- S₀:** Peso específico del aceite a eliminar.
- S_w:** Peso específico
- Tr:** Tiempo de retención.
- V:** Velocidad longitudinal, en cm/seg.
- v:** Velocidad ascensional del aceite en cm/seg.
- Vol:** Volumen m³.
- Φ:** Diámetro en m.

Calculando el valor de sigma en la ecuación 2.10 (área característica):

$$\Sigma = \frac{\pi w^2 L (R_0^2 - R_1^2)}{g \ln \frac{2R_0^2}{R_0^2 + R_1^2}}$$

$$\Sigma = 252\ 100\ m^2$$

El área característica de sigma hallada, recomienda el uso de una centrífuga de tipo tornillo.

2.7. Metodología Experimental

Con base en una caracterización de las aguas residuales de la refinería más grande en Perú, se definió el agua aceitosa objeto del estudio, el efluente de los separadores primarios. En la selección preliminar para el rompimiento de la emulsión se planteó un polielectrolito catiónico, se realizaron pruebas de jarras a diferentes concentraciones. Las características del polielectrolito catiónico se presentan en el **Anexo**.

En las pruebas con aplicación del reactivo, se usaron concentraciones del rango 10-300 ppm teniendo en consideración que operativamente se adiciona en un rango de 105-345 ppm según las características del influente. Como parámetros de respuesta en la selección preliminar se determinaban Turbiedad y SST.

Todas las pruebas preliminares se realizaron con el efluente aceitoso de un mismo lote y a una temperatura igual para que los resultados sean comparables. En la prueba de jarras se determinaron el tiempo y las concentraciones óptimas. Todas las pruebas se realizaron en un aparato de Jarras JarTest, modelo JT40E, usando vasos de precipitado de 1 litro. En esta fase del estudio los criterios para la determinación de la concentración óptima del reactivo químico fueron la remoción GyA y de SST, en ese orden de prioridad.

El procesamiento de las muestras consistió en 5 min de mezcla rápida a 120 RPM después de adicionar el agente químico para la desestabilización del aceite emulsificado. Posteriormente, la velocidad de agitación se reducía hasta 30 RPM., manteniéndola durante 95 min. En esta fase es cuando se producía la floculación. Al terminar la agitación, se dejaba un tiempo de reposo de 20 minutos. Finalmente se determinaba turbidez y se tomaban muestras del agua clarificada.

2.7.1. Listado y descripción de Equipos y Auxiliares

- Para los ensayos en el laboratorio:

Equipo: Test de Jarras

Especificaciones:

Rango seleccionable:

- Rango bajo: 0 - 25 rpm
- Rango alto: 0 – 335 rpm

Capacidad: 6 jarras de 2 litros c/u.



Figura 2. 41. Equipo utilizado para realizar la prueba de jarras.



Figura 2. 42. Equipo utilizado para realizar la prueba de jarras.

- Para los ensayos a escala en la planta de tratamiento de aguas aceitosas:

Equipo: Centrífuga 37-K-09

Especificaciones:

Rango seleccionable:

- Rango: 0 – 5250 rpm



Figura 2. 43. Decantador centrífugo de la planta de tratamiento de aguas aceitosas.

Para realizar las mediciones de turbidez se hizo uso de turbidímetro calibrado, utilizando el método 8237 para realizar las mediciones requeridas. Ver anexo.

Capítulo 3 ANÁLISIS EXPERIMENTAL Y RESULTADOS

3.1. Determinación de las variables que influyen en el proceso

3.1.1 Variables independientes

- Naturaleza química del polielectrolito: se estudiará el efecto de 2 tipos de polielectrolitos, uno de naturaleza catiónica (Polyfloc CP1160) y otro de naturaleza aniónica (Beatz Dearborn).
- Concentración del polielectrolito: se estudiará su efecto sobre la aglomeración de partículas suspendidas y coloidales.
- Tiempo de agitación: se estudiará su efecto sobre la separación de las partículas aglomeradas en el lodo deshidratado.
- Velocidad de agitación o centrifugación: se estudiará su efecto sobre la separación de las partículas aglomeradas en el lodo deshidratado.

3.1.2 Variables dependientes o de respuesta

- Unidades Nefelométricas de Turbidez (NTU) del agua clarificada que se ha separado del lodo deshidratado.
- Sólidos Suspendidos Totales (SST) en el lodo separado (lodo deshidratado).
- Porcentaje de remoción de sólidos suspendidos del efluente a tratar.

3.2. Pruebas preliminares para determinar el grado de influencia de cada variable y el tamaño de muestra.

(Montgomery, 1991)

3.2.1. Grado de influencia de los variables e interacción

Se hará el uso de un diseño factorial de 2 factores para poder estudiar los efectos producidos por las concentración del polielectrolito y el tiempo de agitación sobre la deshidratación del lodo de efluente aceitoso, mientras se mantienen constantes las variables tipo de polielectrolito y velocidad de agitación o rotación de la centrifuga, según sea el caso.

El efecto de un factor se define como el cambio en la respuesta producida por un cambio en nivel de un factor (Montgomery, 1991). Por ejemplo, el efecto principal de la concentración del polielectrolito podría interpretarse como la diferencia entre la respuesta promedio en el primero y segundo nivel de esta variable.

Para el polielectrolito catiónico POLYFLOC CP 1160 se ensayaron las siguientes pruebas repetitivas para poder determinar el grado de influencia de las variables estudiadas y el tamaño adecuado de la muestra que permita obtener resultados válidos.

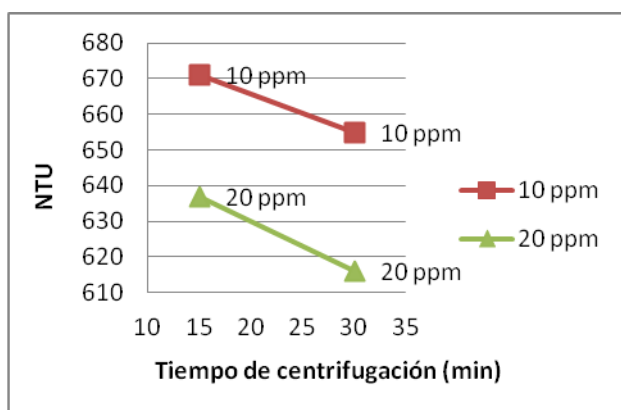
Tabla 3. 1. Pruebas preliminares para el estudio de los polielectrolitos

Tiempo (min)	Concentración de polielectrolito catiónico (ppm)					
	10	20	30	60	90	180
15	687	659	608	468	310	182
	669	629	618	453	313	165
	657	623	606	457	312	164
30	658	614	590	379	187	35
	657	618	580	379	180	35
	650	616	579	377	176	33

Para analizar el efecto de estas variables independientes se van agrupar los datos en diseños bifactoriales de 2 niveles:

Tabla 3. 2. Diseño bifactorial de dos niveles I

Tiempo (min)	Concentración de Polielectrolito (ppm)	
	10	20
15	671.00	637.00
30	655.00	616.00



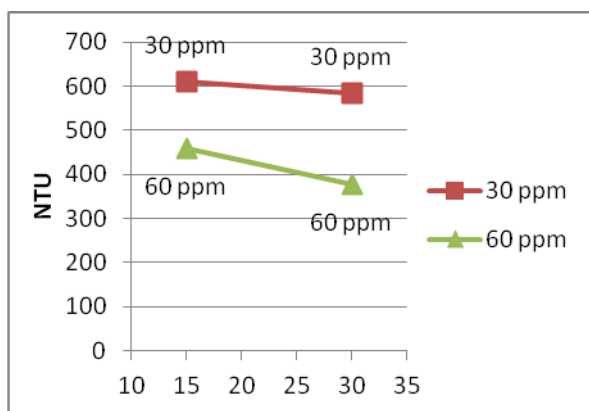
$$Efecto_{10\text{ ppm}-20\text{ ppm}}^{t=15\text{ min}} = 671 - 637 = 34$$

$$Efecto_{10\text{ ppm}-20\text{ ppm}}^{t=30\text{ min}} = 655 - 616 = 39$$

Gráfico 3. 1. Efecto concentración del polielectrolito catiónico vs. tiempo de centrifugación I

Tabla 3. 3. Diseño bifactorial de dos niveles II

Tiempo (min)	Concentración de Polielectrolito (ppm)	
	30	60
15	610.67	459.33
30	583.00	378.33



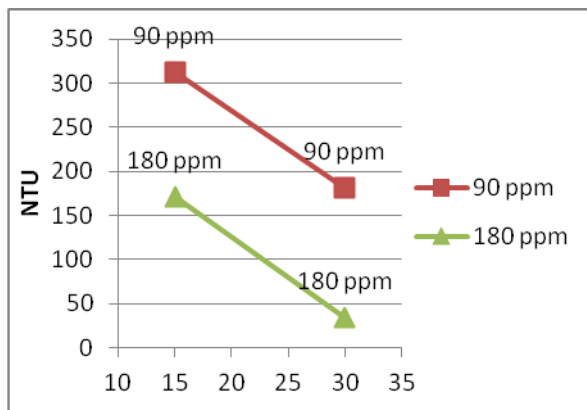
$$Efecto_{30\text{ ppm}-60\text{ ppm}}^{t=15\text{ min}} = 610.67 - 459.33 = 151.34$$

$$Efecto_{30\text{ ppm}-60\text{ ppm}}^{t=30\text{ min}} = 610 - 459 = 151$$

.Gráfico 3. 2 Efecto concentración del polielectrolito catiónico vs. tiempo de centrifugación II

Tabla 3. 4. Diseño bifactorial de dos niveles III

	Concentración de Polielectrolito (ppm)	
Tiempo (min)	90	180
15	311.67	170.33
30	181.00	34.33



$$\text{Efecto}_{90 \text{ ppm} - 180 \text{ ppm}}^{t=15 \text{ min}} = 181 - 34 = 147$$

$$\text{Efecto}_{90 \text{ ppm} - 180 \text{ ppm}}^{t=30 \text{ min}} = 311 - 170 = 141$$

Gráfico 3. 3 Efecto concentración del polielectrolito catiónico vs. tiempo de centrifugación III

En los gráficos 3.1, 3.2 y 3.3 se observa que las rectas de concentración del polielectrolito son, aproximadamente, paralelas. Esto indica que no hay relación directa entre las variables concentración del polielectrolito (ppm) y tiempo de agitación o centrifugación (rpm). Por lo tanto, cada variable ejerce un efecto independiente de la otra sobre las unidades nefelometricas de turbidez final del agua clarificada proveniente del lodo a tratar.

A continuación se determina cual de las dos variables analizadas presenta el mayor efecto:

Para los datos de la tabla 1:

$$\text{Efecto del tiempo de centrifugación} = \frac{671 + 637}{2} - \frac{655 + 616}{2} = 18.5$$

$$\text{Efecto de la concentración del polimero} = \frac{655 + 671}{2} - \frac{616 + 637}{2} = 36.5$$

Para los datos de la tabla 2:

$$\text{Efecto del tiempo de centrifugación} = \frac{610 + 459}{2} - \frac{583 + 378}{2} = 54.3$$

$$\text{Efecto de la concentración del polímero} = \frac{610 + 583}{2} - \frac{459 + 378}{2} = 178$$

Para los datos de la tabla 3:

$$\text{Efecto del tiempo de centrifugación} = \frac{311 + 170}{2} - \frac{181 + 34}{2} = 133$$

$$\text{Efecto de la concentración del polímero} = \frac{181 + 311}{2} - \frac{34 + 170}{2} = 144$$

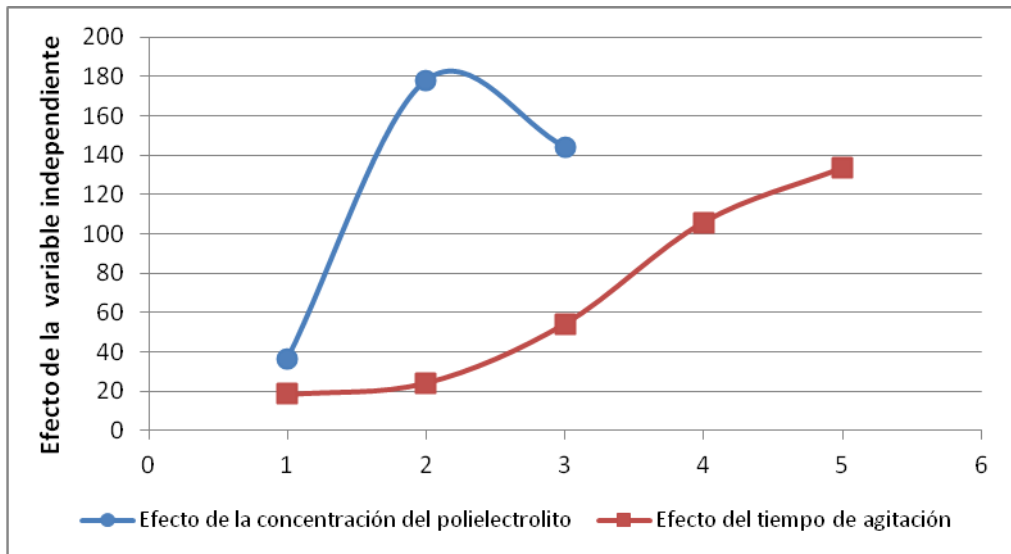


Gráfico 3. 4.Efecto del aumento en las variables concentración del polielectrolito y tiempo de agitación.

De los resultados y la gráfica 3.4 se puede concluir que, el efecto de la concentración del polielectrolito inicialmente ejerce un efecto pronunciado hasta un valor máximo, y a partir de ese punto decae, teniéndose efectos menores a concentración altas de polielectrolito, y probablemente se observe algún efecto adverso. Esto es debido a que inicialmente el polímero ejerce

una disminución o anulación en el potencial zeta del coloide, y permite que las partículas se aglomeren con facilidad. Pero, concentraciones altas de polielectrolito en exceso puede desestabilizar es sistema por la fuerza de repulsión que ejerce su carga iónica.

Por otro lado, el efecto del tiempo de agitación o centrifugación muestra un efecto más favorable a mayores exposiciones. Pero cuando tiempo de agitación se aproxima al infinito, el efecto dado por cierto incremento en el tiempo de centrifugación no es significativo. Esto se debe a que para un tiempo de agitación infinito las partículas que coloidales a aglomerar alcanzan un equilibrio iónico de fuerzas electroestáticas de atracción y repulsión como lo indica el balance de repulsión y atracción según la teoría de DLVO tratada en el punto 2.6.6. A esta condición de requiere una mayor energía para aglomerar una mayor cantidad de partículas y el efecto del tiempo de agitación se convierte en no relevante.

3.2.2. Elección del tamaño de la muestra.

(Montgomery, 1991)

Una forma muy eficiente para la elección del tamaño de muestra es el uso de curvas de operación características, con las cuales se busca determinar el valor minino de Φ^2 que corresponde a una diferencia específica entre dos medias de tratamiento.

Por ejemplo si la diferencia entre dos medias de reglón es D, el valor mínimo de Φ^2 será:

$$\Phi^2 = \frac{nbD^2}{2a\sigma^2} \dots\dots\dots(3.1)$$

Donde:

a: Numero de niveles del efecto A

b: Numero niveles del efecto B

D: Diferencia entre dos medias de columna (o de fila)

σ : Desviación estándar

n: Número de réplicas del ensayo

Mientras que si la diferencia entre dos medias de columna es D, el valor mínimo de Φ^2 será:

$$\Phi^2 = \frac{naD^2}{2b\sigma^2} \dots\dots\dots(3.2)$$

Siendo a-1 los grados de libertad del numerador para A y ab(n-1) los grados de libertad del denominador. Mientras que para B se tienen b-1 grados de libertad en el numerador y ab(n-1) grados de libertad en el denominador.

Para los resultados de la tabla 1:

Con respecto al efecto A (Tiempo):

Grados de libertad del numerador para A: a-1= 2-1=1 a-1=1

Grados de libertad del denominador para A: ab(n-1)= 2x6x(n-1)=12x(n-1)

$$\boxed{ab(n-1)= 12x(n-1)} \dots\dots\dots(3.3)$$

Con respecto al efecto B (Concentración del polielectrolito):

Grados de libertad del numerador para B: b-1= 6-1=5 b-1=5

Grados de libertad del denominador para B: ab(n-1)= 2x6x(n-1)=12x(n-1)

$$\boxed{ab(n-1)= 12x(n-1)} \dots\dots\dots(3.4)$$

Calculo de los promedios de los resultados de la tabla 1:

Tabla 3. 5. Promedio de los resultados de las pruebas preliminares

	Concentración del Polielectrolito (ppm)					
Tiempo (min)	10	20	30	60	90	180
15	671	637	611	459	312	170
30	655	616	583	378	181	34

Cálculo de la desviación estándar de los resultados de la tabla 1:

Tabla 3. 6. Desviación estándar de los resultados de las pruebas preliminares

	Concentración de Polielectrolito (ppm)					
Tiempo (min)	10	20	30	60	90	180
15	15	19	6	8	2	10
30	4	2	6	1	6	1

Calculo de las diferencias de las medias de región D de la tabla 5:

Tabla 3. 7. Diferencias de las medias de región.

	Concentración de Polielectrolito (ppm)					
Δ Tiempo (min)	10	20	30	60	90	180
15	-16	-21	-28	-81	-131	-136

Calculo de las diferencias de las medias de columna D de la tabla 5:

Tabla 3. 8. Diferencias de las medias de columna.

	Concentración de Polielectrolito (ppm)				
Tiempo (min)	10	20	30	60	90
15	-34	-26	-151	-148	-141
30	-39	-33	-205	-197	-147

Para el efecto A (tiempo de agitación) se debe rechazar la hipótesis nula con una probabilidad alta, si la diferencia máxima en el nivel medio del número de unidades nefelométricas de cualquier par de tiempos de agitación fuera igual a 81 NTU. Por lo tanto $D= 81$, y con una desviación estándar igual a 19, se tiene la siguiente ecuación proporcional:

$$\Phi^2 = \frac{naD^2}{2b\sigma^2} = \frac{n(2)(81)^2}{2(6)(19)^2}$$

$$\Phi^2 = 3.03 n$$

Como valor mínimo de Φ^2 . Suponiendo que $\alpha=0.05$ puede usarse la Carta VII del Apéndice para construir la siguiente tabla:

Tabla 3. 9. Estimación del número de réplicas por ensayo.

n	Φ^2	Φ	ω_1 = Grados de libertad del numerador	ω_2 = Grados de libertad del error (denominador)	β
2	6.06	2.46	1	12	0.09
3	9.09	3.01	1	24	0.02
4	12.12	3.48	1	36	<0.01

Se observa que para n=3 réplicas se producen un nivel de β cercano a 0.02, o una probabilidad aproximada de 98% de rechazar la hipótesis nula si la diferencia en el nivel medio del NTU para dos niveles de tiempo de agitación es a lo sumo igual a 81. Pero para n=2, se tiene una probabilidad aproximada de 92% de rechazar la hipótesis nula.

Para el efecto B (concentración del polielectrolito) se debe rechazar la hipótesis nula con una probabilidad alta, si la diferencia máxima en el nivel medio del número de unidades nefelométricas de cualquier par de tiempos de agitación fuera igual a 141 NTU. Por lo tanto D= 141, y con una desviación estándar igual a 19, se tiene la siguiente ecuación proporciona:

$$\Phi^2 = \frac{naD^2}{2b\sigma^2} = \frac{n(2)(141)^2}{2(6)(19)^2}$$

$$\Phi^2 = 9.17 n$$

Como valor mínimo de Φ^2 . Suponiendo que $\alpha=0.05$ puede usarse la Carta VII del Apéndice para construir la siguiente tabla:

Tabla 3. 10. Estimación del número de réplicas por ensayo.

n	Φ^2	Φ	ω_1 = Grados de libertad del numerador	ω_2 = Grados de libertad del error (denominador)	β
2	18.36	4.28	5	12	< 0.01
3	27.54	5.25	5	24	< 0.01
4	36.71	6.06	5	36	< 0.01

Se observa que para $n=2$ réplicas se producen un nivel de β menor 0.01, o una probabilidad mayor de 99% de rechazar la hipótesis nula si la diferencia en el nivel medio del NTU para dos niveles de tiempo de agitación es a lo sumo igual a 141.

Del análisis del tamaño de la muestra tanto con respecto al tiempo de agitación como a la concentración del polielectrolito se concluye que una muestra con 3 ó 2 réplicas proporciona el nivel deseado de sensibilidad, siempre que no exista un error grave en la estimación de la desviación estándar.

Por lo tanto, este resultado válida los datos obtenidos de las pruebas, los cuales cuentan con más de 2 réplicas por observación, controlando y minimizando de esta error producto de la falta de sensibilidad del método.

3.3. Comparación del desempeño entre el polielectrolito catiónico y el polielectrolito aniónico con respecto al tiempo de agitación

El polielectrolito aniónico usado actualmente en la refinería de estudio es conocido comercialmente como Beatz Dearborn:

Volumen de la muestra (L)= 1

Densidad (g/mL)= 1.175

Velocidad de agitación (rpm)= 300

Tabla 3. 11. Número de Unidades Nefelométricas obtenidas a diferentes condiciones de concentración del polielectrolito aniónico y tiempo de agitación.

Tiempo (min)	Concentración de Polímero (ppm)					
	10	20	30	60	90	180
0	1200	1200	1200	1200	1200	1200
5	1059	998	989	942	913	812
10	1011	979	973	912	896	776
15	971	973	954	899	873	742
30	953	969	928	863	834	703

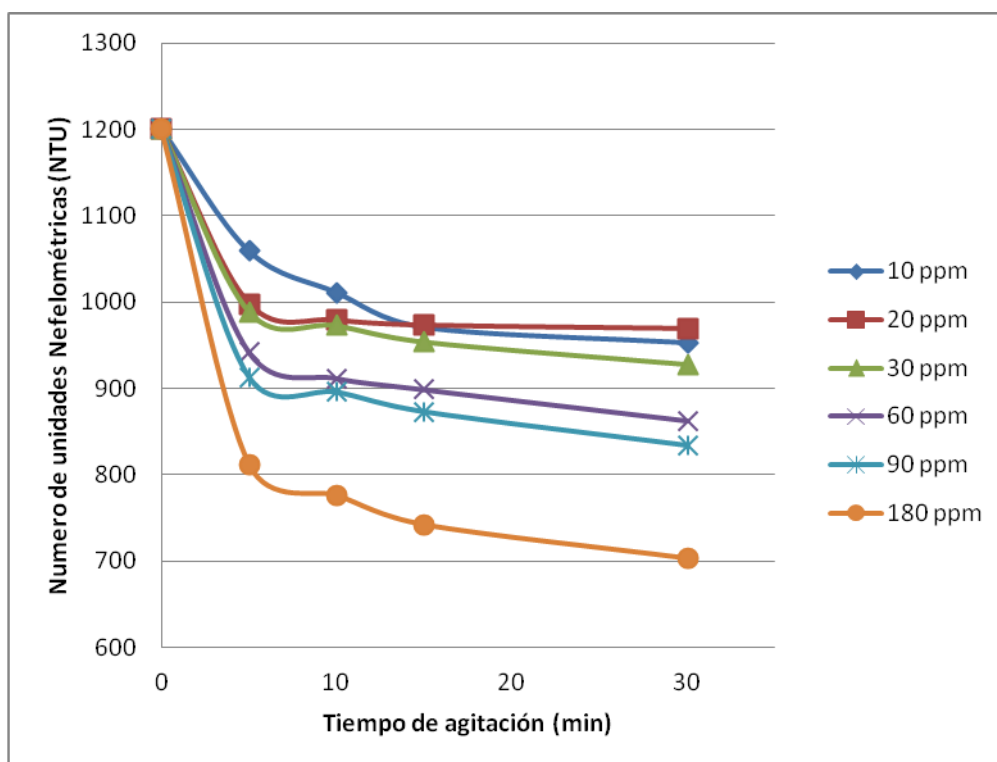


Gráfico 3. 5. Número de Unidades Nefelométricas con respecto tiempo de agitación, haciendo uso del polielectrolito aniónico.

En el presente estudio se plantea el cambio del polielectrolito aniónico (Beatz Dearborn) por uno del tipo catiónico comercialmente conocido como Polyfloc CP 1160:

Volumen de la muestra (L)= 1

Densidad (g/mL)= 1.052

Velocidad de agitación (rpm)= 300

Tabla 3. 12. Número de Unidades Nefelométricas obtenidas a diferentes condiciones de concentración del polielectrolito catiónico y tiempo de agitación.

Tiempo (min)	Concentración de Polímero (ppm)					
	10	20	30	60	90	180
0	1200	1200	1200	1200	1200	1200
5	772	746	691	563	498	437
10	699	672	642	512	393	272
15	671	637	611	460	312	170
30	655	616	583	378	181	34

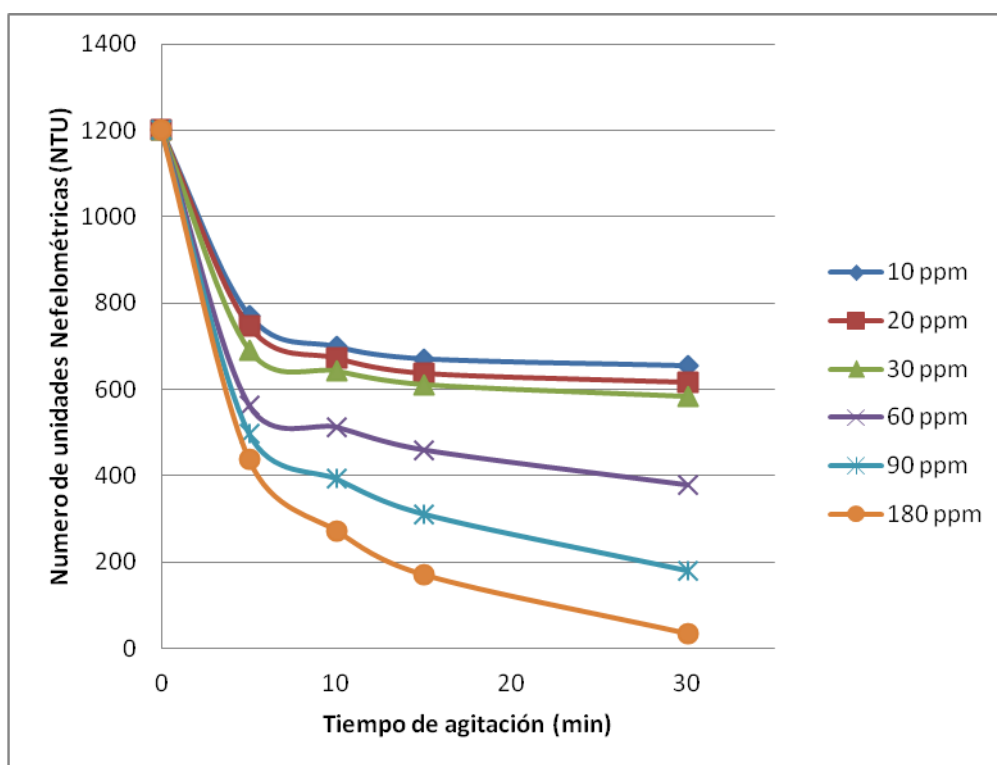


Gráfico 3. 6. Número de Unidades Nefelométricas con respecto tiempo de agitación a cierta concentración de polielectrolito catiónico.

Comparando el efecto de los polielectrolitos a condiciones iguales de velocidad de agitación, concentración y tiempo de agitación:

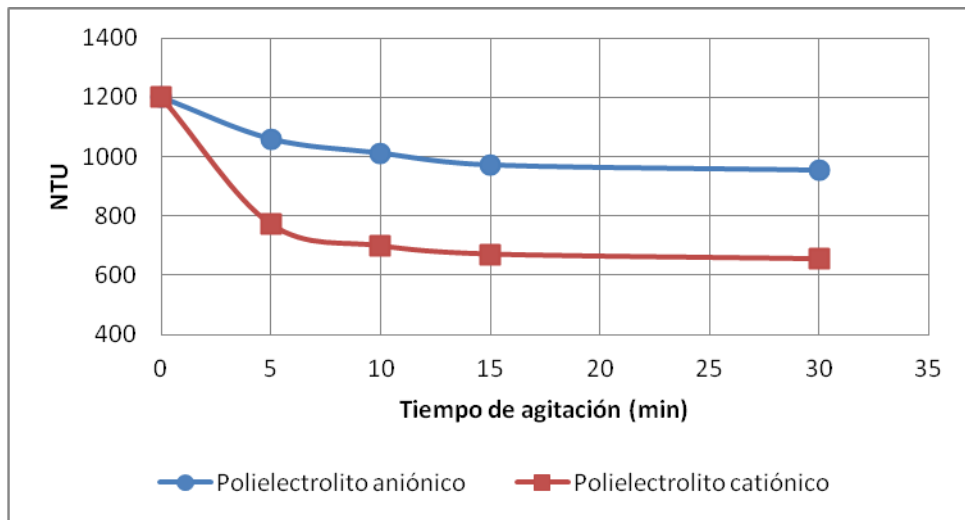


Gráfico 3. 7. Comparación del desempeño de los polielectrolitos a 10 ppm

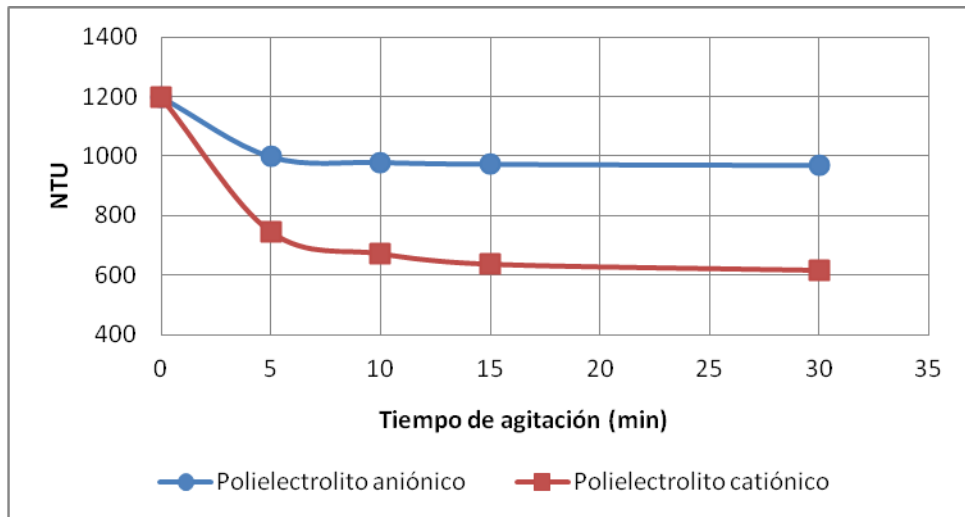


Gráfico 3. 8. Comparación del desempeño de los polielectrolitos a 20 ppm

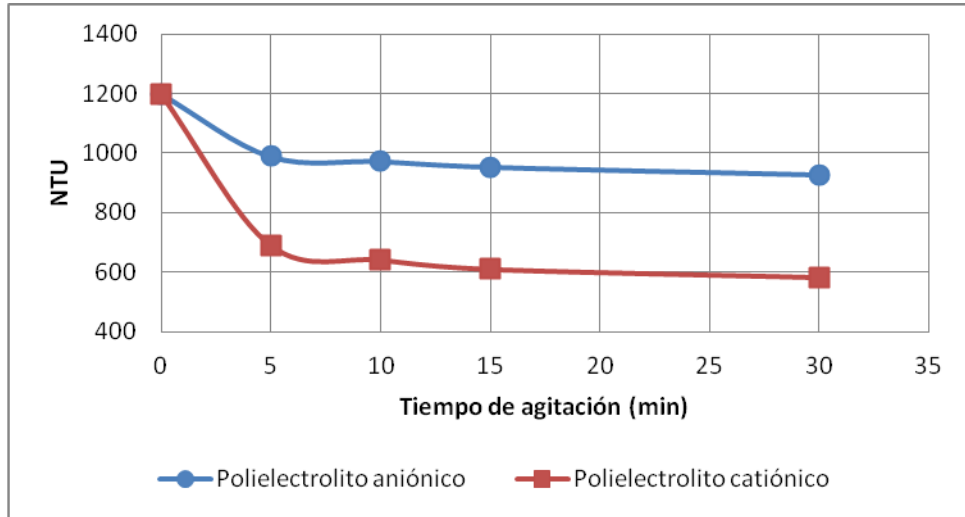


Gráfico 3. 9. Comparación del desempeño de los polielectrolitos a 30 ppm

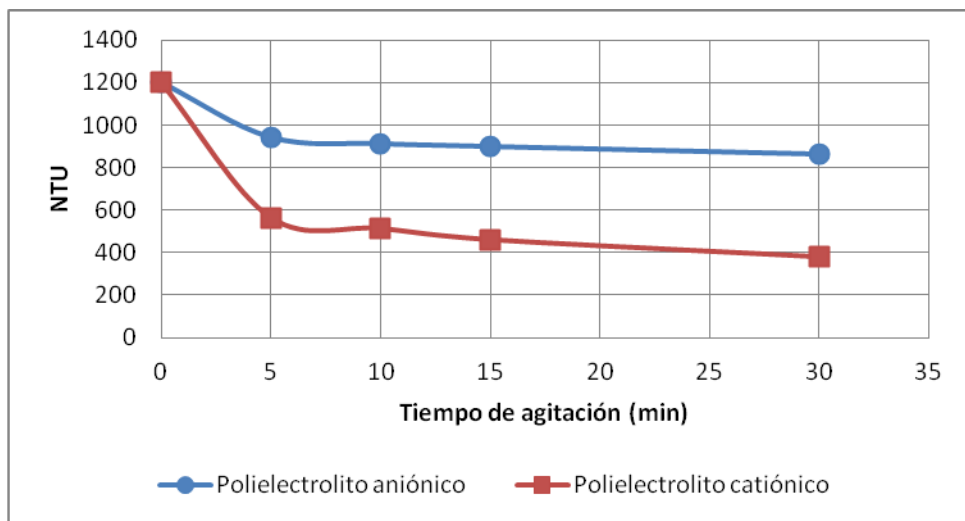


Gráfico 3. 10. Comparación del desempeño de los polielectrolitos a 60 ppm

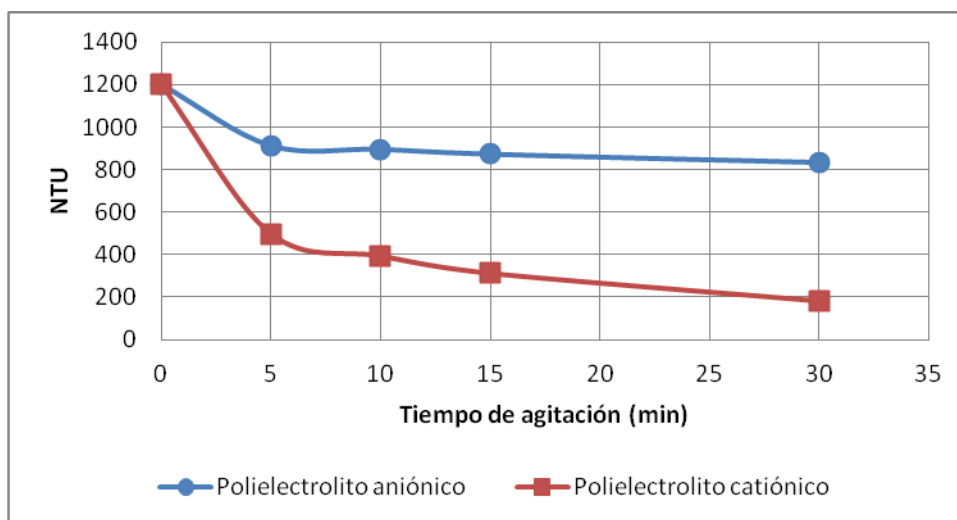


Gráfico 3.11. Comparación del desempeño de los polielectrolitos a 90 ppm

De la gráfica 3.7 a la 3.11 se observa que se obtiene un mejor desempeño, menor número de unidades nefelométricas de turbidez (NTU), cuando se hace uso del polielectrolito catiónico a las mismas condiciones de concentración, tiempo y velocidad de centrifugación, en lugar del polielectrolito aniónico. En el capítulo 4, apartado 4.2, se comprueba que esta diferencia a favor del polielectrolito catiónico es significativa, confirmando que el uso de este es más apropiado para el lodo estudiado.

3.4. Estudio de la relación y optimización de la concentración del polielectrolito catiónico vs. el tiempo de agitación a diferentes velocidades de centrifugación.

En el apartado anterior se comprobó que el polielectrolito catiónico muestra un mejor desempeño con respecto al de tipo aniónico para el lodo en estudio. A continuación se realizará el proceso de optimización de la concentración del polielectrolito y tiempo de centrifugación a una velocidad de centrifugación establecida.

3.4.1. Análisis de la concentración del polielectrolito catiónico vs. el tiempo de agitación a diferentes velocidades

Caso 1: Velocidad de agitación (rpm) = 120

Volumen de la muestra (L)= 1

Densidad (g/mL)= 1.052

Tabla 3. 13. Número de Unidades Nefelométricas (NTU) del efluente clarificado a cierta condición concentración de polielectrolito catiónico y tiempo de agitación, evaluado a 120 RPM.

Tiempo (min)	Concentración del polielectrolito catiónico (ppm)										
	10	20	30	40	60	90	120	150	180	200	300
0	1200	1200	1200	1200	1200	1200	1200	1200	1200	1200	1200
5	875	864	889	821	799	729	742	671	648	629	599
10	829	758	747	719	713	602	631	622	591	531	521
15	702	665	639	612	621	430	402	435	386	412	378
20	716	643	621	598	552	400	367	384	274	225	175
30	692	622	603	576	541	354	299	227	149	134	99
60	671	613	586	561	443	338	241	148	119	99	67

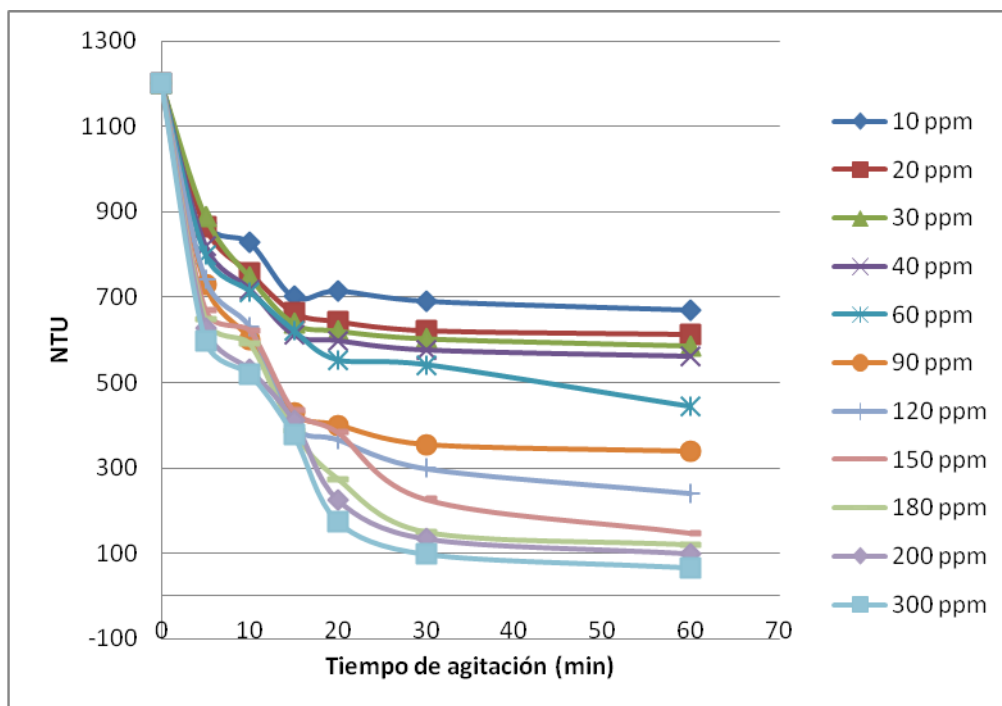


Gráfico 3. 12. Número de Unidades Nefelométricas (NTU) del efluente clarificado con respecto al tiempo de centrifugación a distintas concentración del polielectrolito catiónico, evaluado a 120 RPM.

Caso 2: Velocidad de agitación (rpm)= 300

Volumen de la muestra (L)= 1

Densidad (g/mL)= 1.052

Tabla 3. 14. Número de Unidades Nefelométricas (NTU) del efluente clarificado a cierta condición concentración de polielectrolito catiónico y tiempo de agitación, evaluado a 300 RPM.

Tiempo (min)	Concentración de Polielectrolito catiónico (ppm)										
	10	20	30	40	60	90	120	150	180	200	300
0	1200	1200	1200	1200	1200	1200	1200	1200	1200	1200	1200
5	772	746	691	723	563	498	456	429	437	423	379
10	699	672	642	679	512	393	321	337	272	173	146
15	671	637	611	621	459	312	226	124	170	64	84
20	682	630	601	594	401	231	143	49	73	48	86
30	655	616	583	573	378	181	77	22	34	52	92
60	623	611	564	546	218	117	34	3	17	29	119
80	621	602	512	521	215	98	24	4	8	37	129
100	622	597	501	510	210	97	19	4	5	45	137

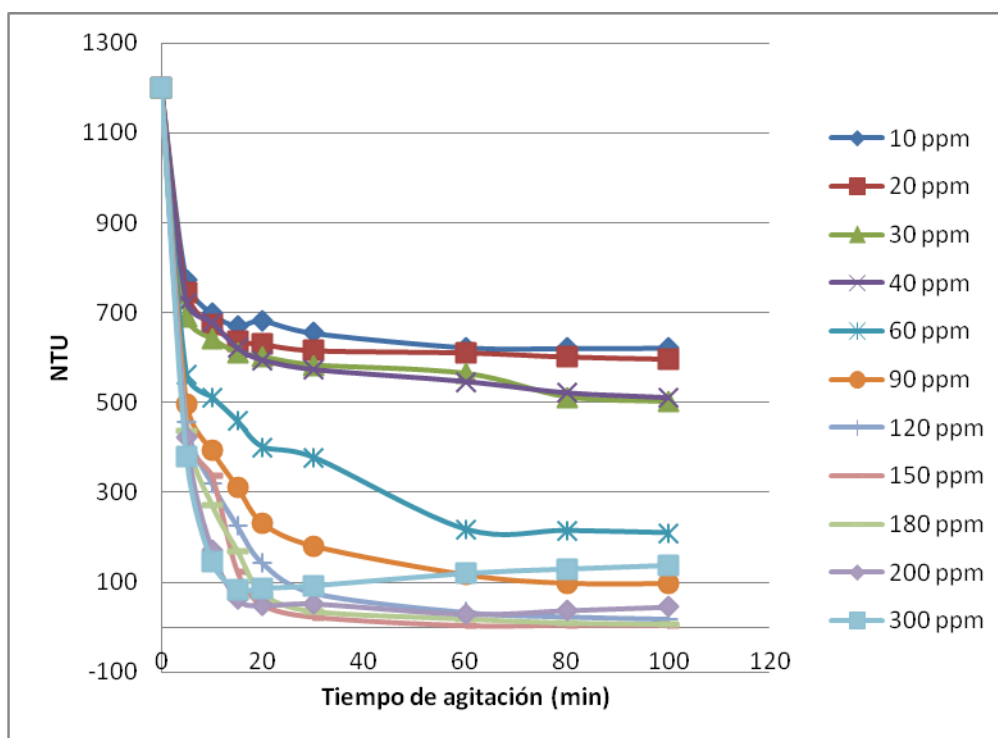


Gráfico 3. 13. Número de Unidades Nefelométricas (NTU) del efluente clarificado con respecto al tiempo de centrifugación a distintas concentración del polielectrolito catiónico, evaluado a 300 RPM.

En el gráfico 3.12 se ilustran los resultados obtenidos y agrupados en la tabla 3.13 a diferentes condiciones de concentración del polielectrolito catiónico y tiempo de agitación a una velocidad de agitación de 120 rpm. Condiciones iguales se representan en el gráfico 3.13 y tabla 3.14, pero con la diferencia que la velocidad de agitación es 300 rpm. En estos gráficos se puede observar que en general el aumento de la velocidad de rotación favorece a la aglomeración de los SST, ya que en cierta zona se observa un efecto contrario; una mejor aglomeración de SST se evidencia en un menor NTU. También se observa a una mayor velocidad de agitación la aglomeración de las partículas se realiza en un menor intervalo de tiempo, el cual es menor o igual a 20 minutos a 300 rpm contra mayor a 30 minutos a 120 rpm. Pasado este tiempo, el tiempo de agitación no ejerce un efecto significativo sobre la deshidratación del lodo. Se analizan más detalles en el apartado 3.4.4.

Datos del lodo antes del tratamiento de deshidratación con el polielectrolito:

SSTo (g/L)= 64.4

Vi muestra (mL)= 1000

Velocidad de agitación (rpm)= 300

Valores de medición de volumen de agua clarificada:

Tabla 3. 15. Volumen del agua clarificada (mL) con respecto al tiempo de centrifugación a distintas concentración del polielectrolito catiónico, evaluado a 300 RPM.

Tiempo (min)	Concentración de Polielectrolito catiónico (ppm)										
	10	20	30	40	60	90	120	150	180	200	300
5	13	21	32	39	53	69	91	121	125	129	130
10	17	26	36	43	63	75	172	229	231	221	215
15	23	37	42	77	119	236	293	351	368	348	380
20	33	42	46	89	136	278	323	397	381	392	412
30	41	55	59	96	139	312	345	422	412	409	428
60	52	62	68	97	145	364	381	491	449	455	467
80	52	61	72	98	149	391	411	492	483	461	462
100	53	62	76	97	150	380	427	492	492	481	460

3.4.2. Determinación de los sólidos suspendidos totales en el lodo separado

Para determinar los sólidos suspendidos totales en el lodo separado se realizará un balance de materia al inicio y al final de la prueba, considerando despreciable la concentración del polielectrolito añadido. Realizando el balance de masa:

$$SST_0 V_0 = SST_a V_a + SST_f V_f \dots\dots\dots(3.5)$$

Donde:

SST_0 y V_0 = Sólidos suspendidos totales y volumen inicial del efluente.

SST_a y V_a = Sólidos suspendidos totales y volumen del agua clarificada.

SST_f y V_f = Sólidos suspendidos totales y volumen del lodo tratado.

Dado que los sólidos suspendidos en el agua clarificada son despreciables (≈ 0), el balance se determinaría como:

$$SST_f = SST_0 \frac{V_0}{V_f} \dots\dots\dots(3.6)$$

Haciendo uso del este balance de masa se procedió a calcular la cantidad de sólidos suspendidos totales en el lodo deshidratado.

Tabla 3. 16. Determinación de los sólidos suspendidos totales (ppm) en el lodo separado (deshidratado) a 300 rpm

Tiempo (min)	Concentración de Polielectrolito catiónico (ppm)										
	10	20	30	40	60	90	120	150	180	200	300
0	64.4	64.4	64.4	64.4	64.4	64.4	64.4	64.4	64.4	64.4	64.4
5	65.2	65.8	66.5	67.0	68.0	69.2	70.8	73.3	73.6	73.9	74.0
10	65.5	66.1	66.8	67.3	68.7	69.6	77.8	83.5	83.7	82.7	82.0
15	65.9	66.9	67.2	69.8	73.1	84.3	91.1	99.2	101.9	98.8	103.9
20	66.6	67.2	67.5	70.7	74.5	89.2	95.1	106.8	104.0	105.9	109.5
30	67.2	68.1	68.4	71.2	74.8	93.6	98.3	111.4	109.5	109.0	112.6
60	67.9	68.7	69.1	71.3	75.3	101.3	104.0	126.5	116.9	118.2	120.8
80	67.9	68.6	69.4	71.4	75.7	105.7	109.3	126.8	124.6	119.5	119.7
100	68.0	68.7	69.7	71.3	75.8	103.9	112.4	126.8	126.8	124.1	119.3

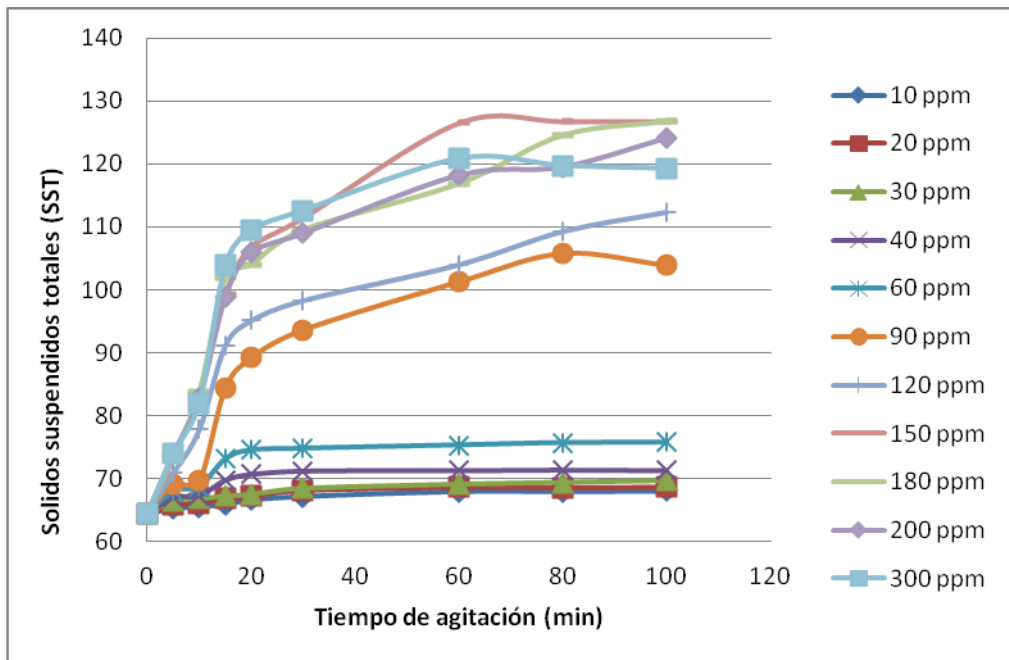


Gráfico 3. 14. Sólidos suspendidos totales en el lodo separado a 300 rpm

3.4.3. Determinación del porcentaje de remoción de sólidos del agua clarificada

Para determinar el porcentaje (%) de remoción de sólidos totales se realizó un balance de las unidades nefelométricas de turbidez:

$$\%remoción = \frac{NTU_0 - NTU_f}{NTU_0} \times 100\% \quad \dots\dots\dots(3.7)$$

Caso 1: Velocidad de agitación (rpm) = 120

Tabla 3. 17. Porcentaje de remoción de sólidos a una velocidad de agitación de 120 rpm

Tiempo (min)	Concentración de Polielectrolito catiónico (ppm)										
	10	20	30	40	60	90	120	150	180	200	300
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	27.08	28.00	25.92	31.58	33.42	39.25	38.17	44.08	46.00	47.58	50.08
10	30.92	36.83	37.75	40.08	40.58	49.83	47.42	48.17	50.75	55.75	56.58
15	41.50	44.58	46.75	49.00	48.25	64.17	66.50	63.75	67.83	65.67	68.50
20	40.33	46.42	48.25	50.17	54.00	66.67	69.42	68.00	77.17	81.25	85.42
30	42.33	48.17	49.75	52.00	54.92	70.50	75.08	81.08	87.58	88.83	91.75
60	44.08	48.92	51.17	53.25	63.08	71.83	79.92	87.67	90.08	91.75	94.42

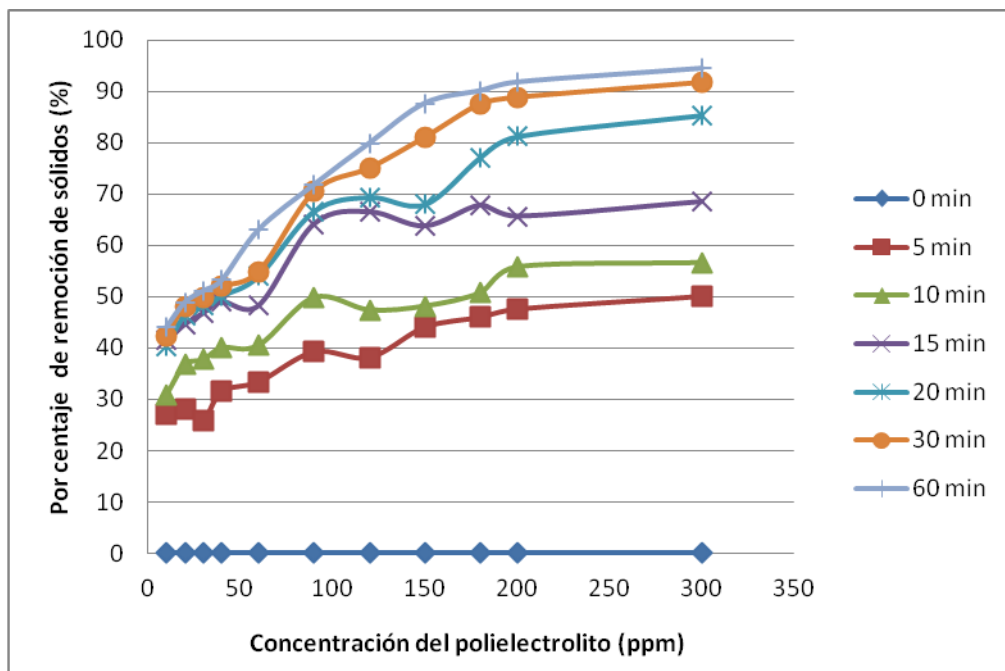


Gráfico 3. 15. Porcentaje de remoción de sólidos del agua clarificado a 120 rpm con respecto a la concentración del polielectrolito

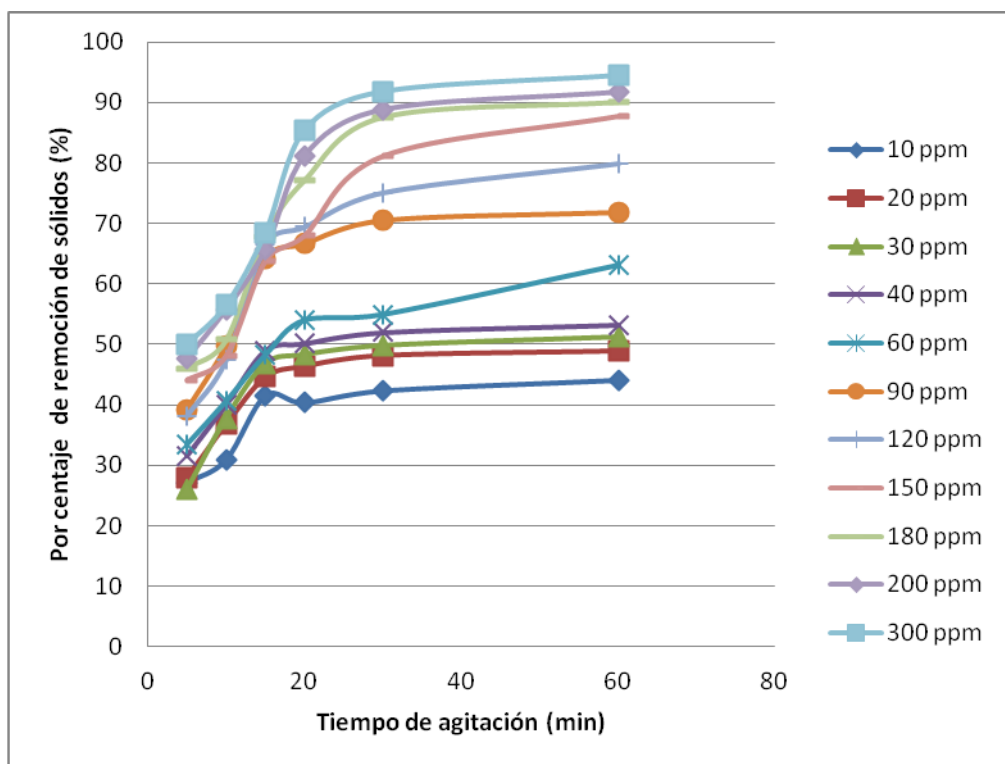


Gráfico 3. 16. Porcentaje de remoción de sólidos del agua clarificado a 120 rpm con respecto al tiempo de agitación

Caso 2: Velocidad de agitación (rpm) = 300

Tabla 3. 18. Porcentaje de remoción de sólidos a una velocidad de agitación de 300 rpm

Tiempo (min)	Concentración de Polielectrolito catiónico (ppm)										
	10	20	30	40	60	90	120	150	180	200	300
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	35.67	37.83	42.42	39.75	53.08	58.50	62.00	64.25	63.58	64.75	68.42
10	41.75	44.00	46.50	43.42	57.33	67.25	73.25	71.92	77.33	85.58	87.83
15	44.08	46.92	49.08	48.25	61.75	74.00	81.17	89.67	85.83	94.67	93.00
20	43.17	47.50	49.92	50.50	66.58	80.75	88.08	95.92	93.92	96.00	92.83
30	45.42	48.67	51.42	52.25	68.50	84.92	93.58	98.17	97.17	95.67	92.33
60	48.08	49.08	53.00	54.50	81.83	90.25	97.17	99.75	98.58	97.58	90.08
80	48.25	49.83	57.33	56.58	82.08	91.83	98.00	99.67	99.33	96.92	89.25
100	48.17	50.25	58.25	57.50	82.50	91.92	98.42	99.67	99.58	96.25	88.58

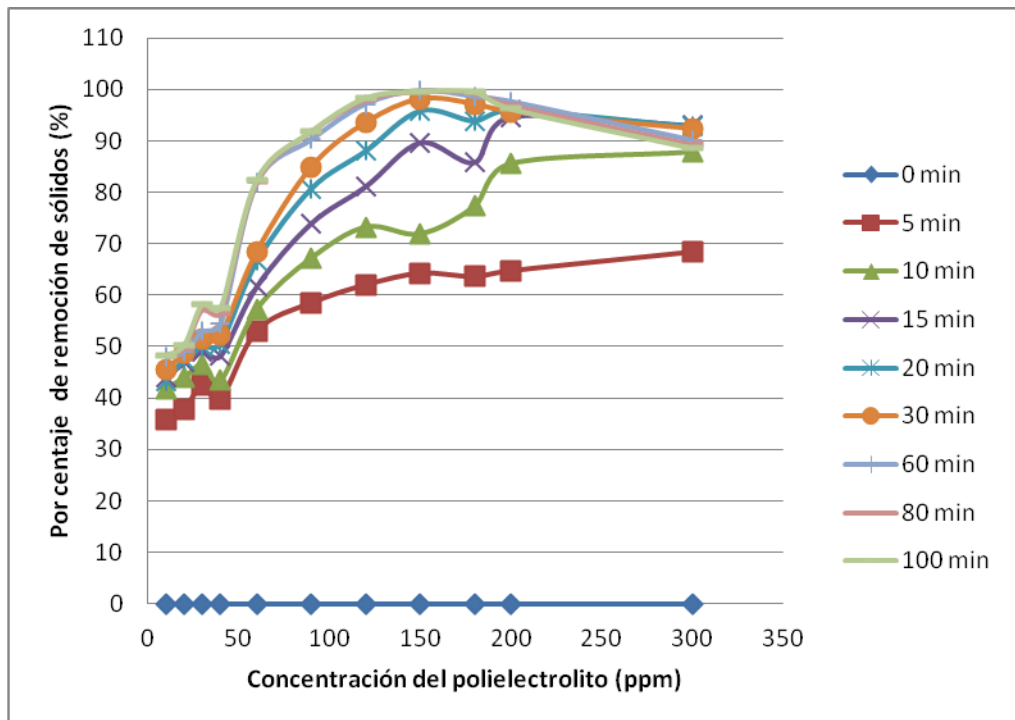


Gráfico 3. 17. Porcentaje de remoción de sólidos del agua clarificado a 300 rpm con respecto a la concentración del polielectrolito

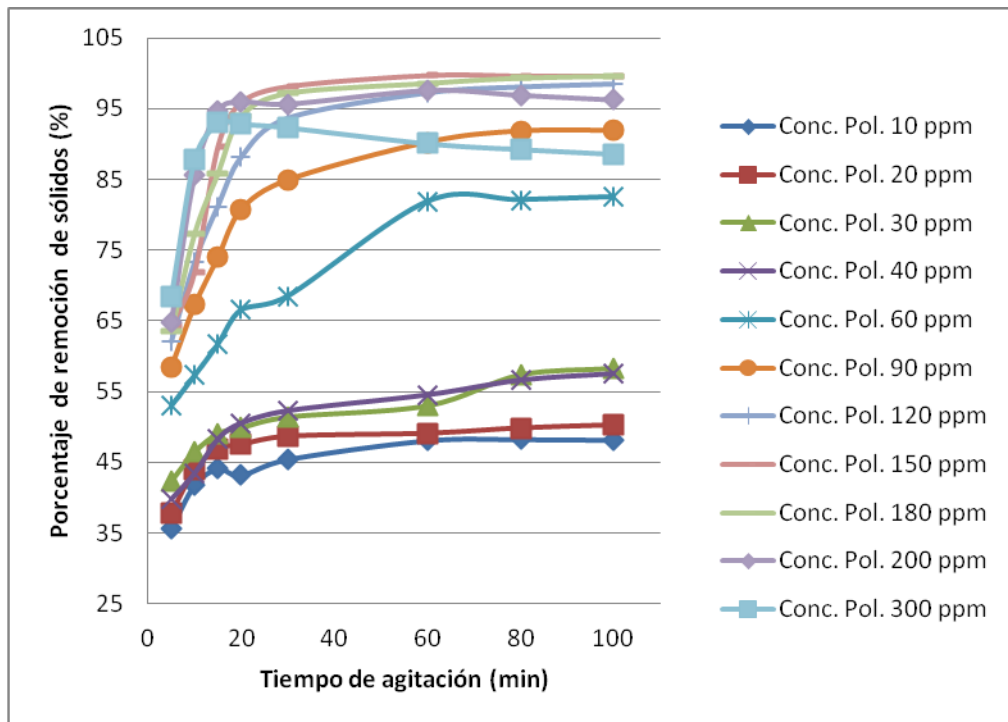


Gráfico 3. 18. Porcentaje de remoción de sólidos del agua clarificado a 300 rpm con respecto al tiempo de agitación

3.4.4. Efecto de la velocidad de centrifugación en el acondicionamiento de lodos

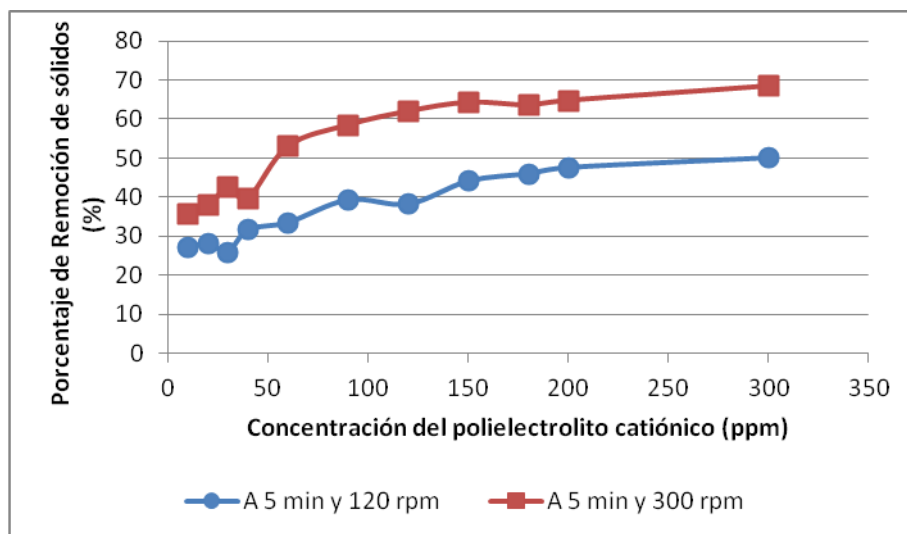


Gráfico 3. 19. Comparación del porcentaje de remoción de sólidos a 5 min.

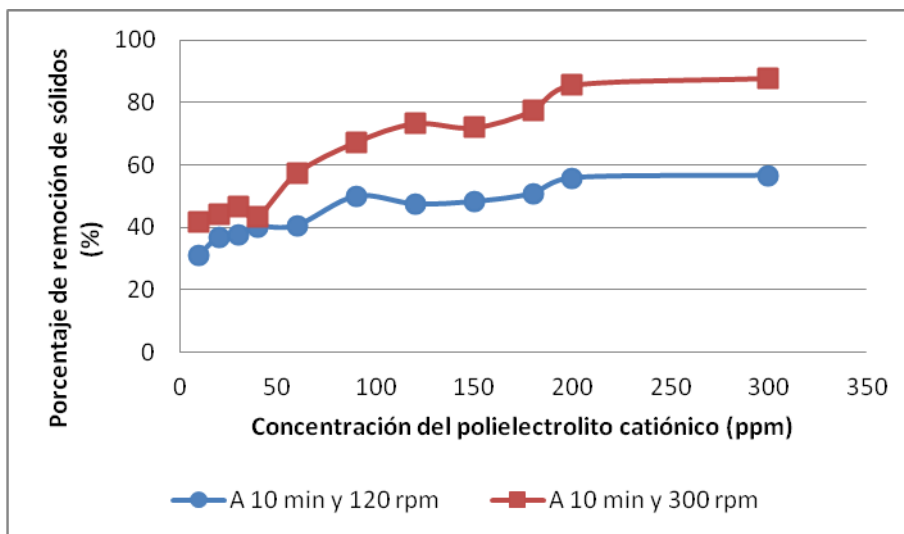


Gráfico 3. 20. Comparación del porcentaje de remoción de sólidos a 10 min.

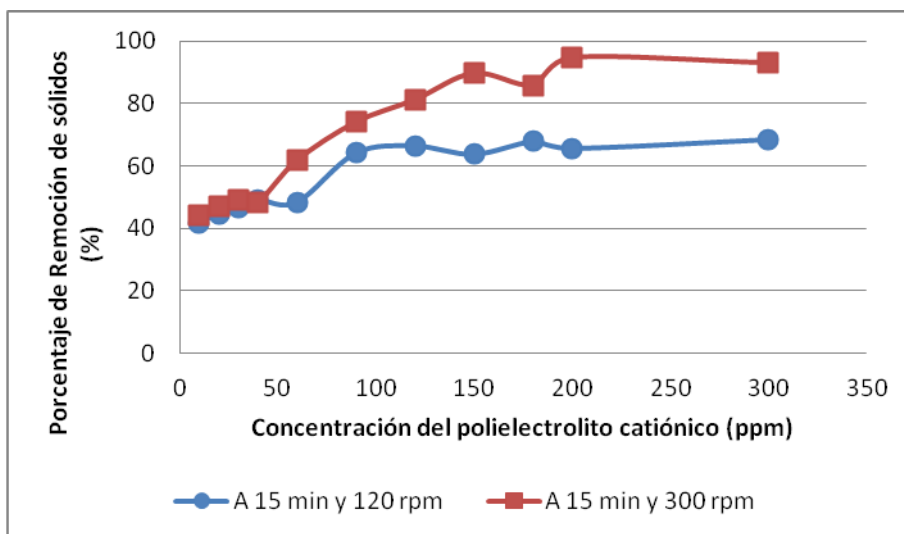


Gráfico 3. 21. Comparación del porcentaje de remoción de sólidos a 15 min.

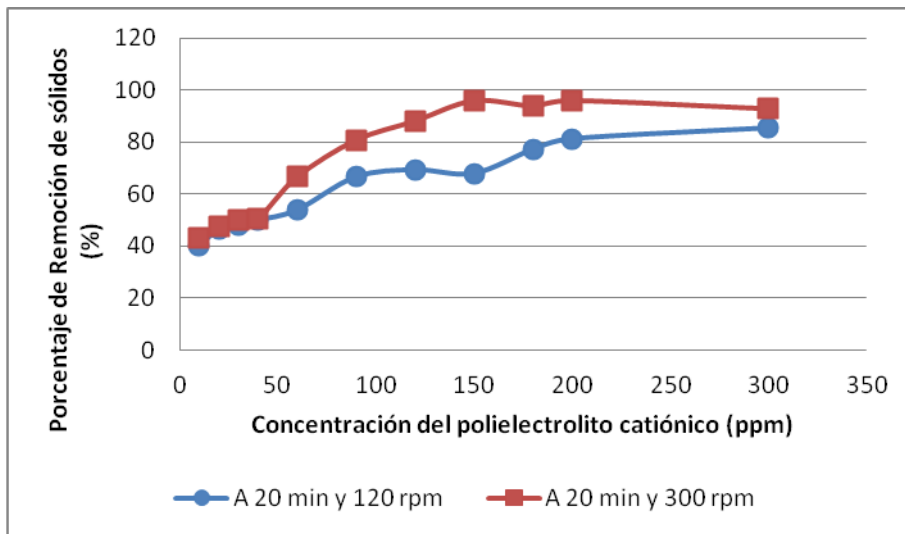


Gráfico 3. 22. Comparación del porcentaje de remoción de sólidos a 20 min.

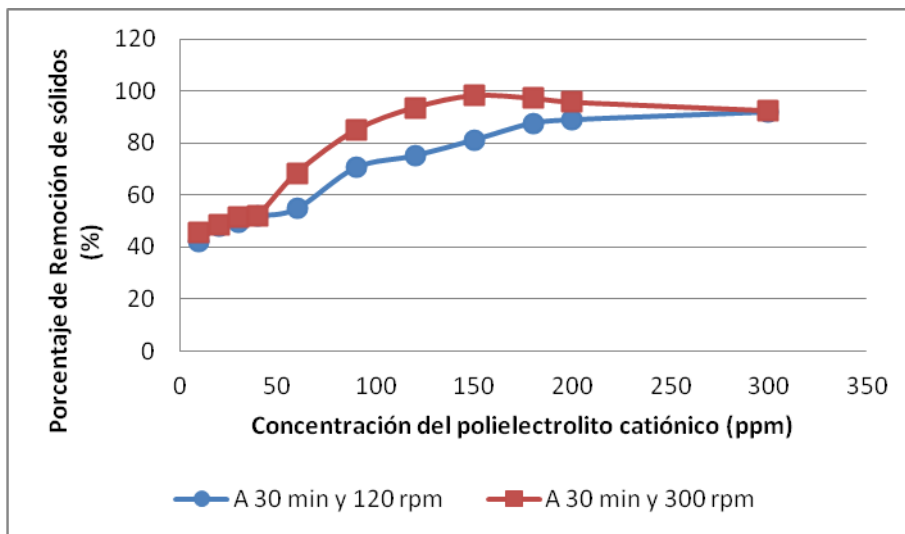


Gráfico 3. 23. Comparación del porcentaje de remoción de sólidos a 30 min.

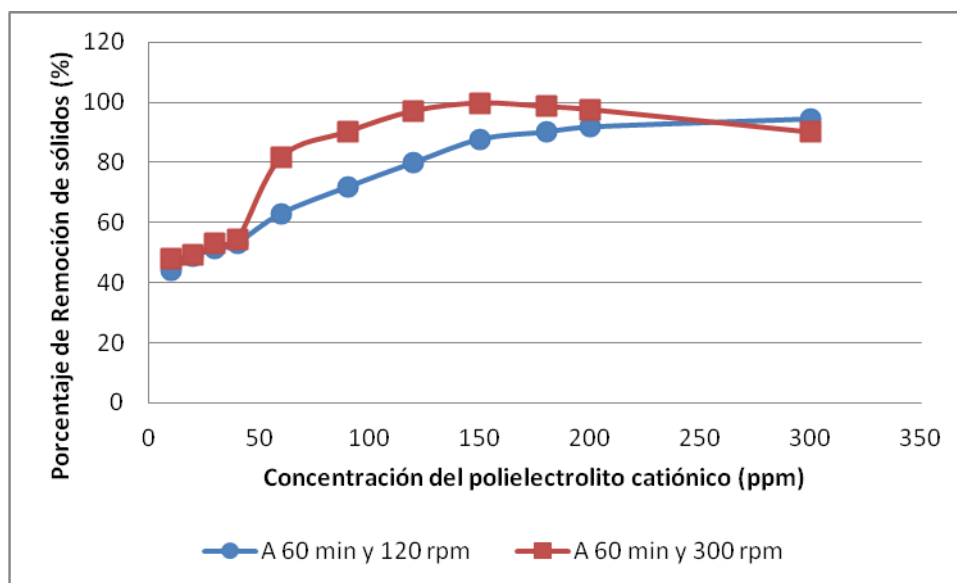


Gráfico 3. 24. Comparación del porcentaje de remoción de sólidos a 60 min.

Del gráfico 3.19 al 3.24 se observa que a las mismas condiciones de tiempo de agitación y concentración del polielectrolito adicionado al lodo, se obtienen mejores resultados de remoción a una velocidad de agitación mayor. Conforme aumenta el tiempo de agitación ($t > 20$ min) para concentración altas de polielectrolito (Dos. Pol. > 180 ppm) un aumento en la velocidad de agitación es desfavorable a la compactación de los lodos y remoción de los sólidos dispersos.

3.4.5. Optimización primaria de la concentración del polielectrolito catiónico a escala de laboratorio

Estudios a escala de laboratorio permiten determinar qué tan eficiente es un polímero como acondicionador y determinar la concentración aproximada necesaria para deshidratar un lodo en particular.

En el ítem 3.4.4 se concluyó que se obtienen resultados más favorables cuando las fuerzas cortantes son mayores a concentración de polielectrolito apropiada; por lo tanto, para la optimización de la concentración del polielectrolito catiónico sólo se evaluarán los resultados a 300 RPM.

Para optimizar la concentración del polielectrolito catiónico se aplica el criterio de la primera derivada a la curva Porcentaje de remoción de sólidos vs. Concentración del polielectrolito catiónico. Cuando la primera derivada se iguala a cero se tiene un mínimo o un máximo relativo o absoluto dependiendo de su ubicación en la curva:

Tabla 3. 19. Porcentaje de remoción de sólidos suspendidos con respecto a la concentración del polielectrolito catiónico y el tiempo de agitación.

		Tiempo (min)								
		0	5	10	15	20	30	60	80	100
Concentración del Polielectrolito catiónico (ppm)	10	0.00	35.67	41.75	44.08	43.17	45.42	48.08	48.25	48.17
	20	0.00	37.83	44.00	46.92	47.50	48.67	49.08	49.83	50.25
	30	0.00	42.42	46.50	49.08	49.92	51.42	53.00	57.33	58.25
	40	0.00	39.75	43.42	48.25	50.50	52.25	54.50	56.58	57.50
	60	0.00	53.08	57.33	61.75	66.58	68.50	81.83	82.08	82.50
	90	0.00	58.50	67.25	74.00	80.75	84.92	90.25	91.83	91.92
	120	0.00	62.00	73.25	81.17	88.08	93.58	97.17	98.00	98.42
	150	0.00	64.25	71.92	89.67	95.92	98.17	99.75	99.67	99.67
	180	0.00	63.58	77.33	85.83	93.92	97.17	98.58	99.33	99.58
	200	0.00	64.75	85.58	94.67	96.00	95.67	97.58	96.92	96.25
	300	0.00	68.42	87.83	93.00	92.83	92.33	90.08	89.25	88.58

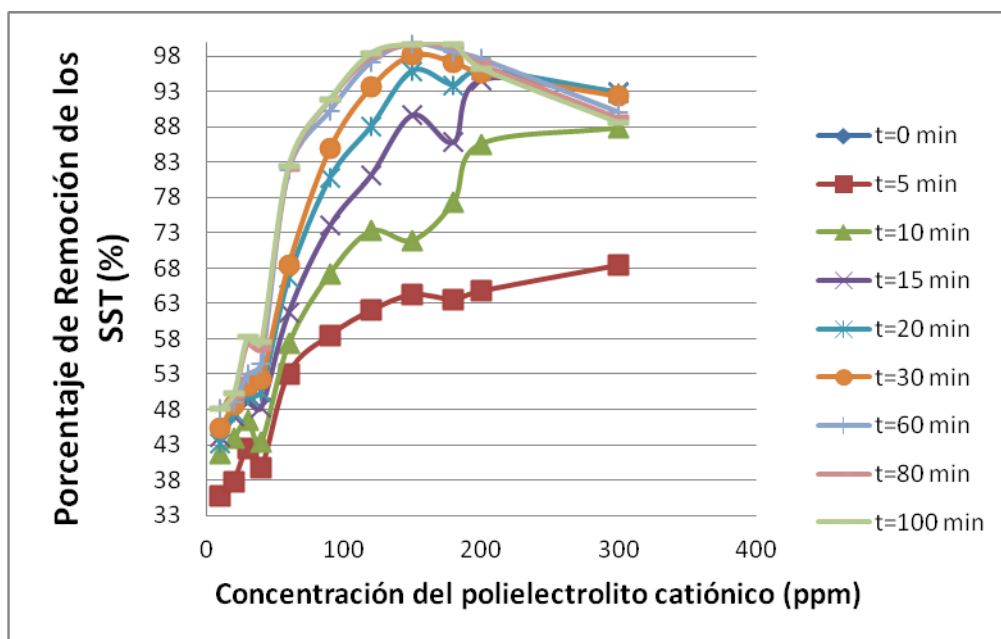


Gráfico 3. 25. Porcentaje de remoción de sólidos suspendidos con respecto a la concentración del polielectrolito catiónico a distintos el tiempo de agitación a 300 RPM.

Primera derivada a un tiempo de agitación de 5 min:

Tabla 3. 20. Determinación de la primera derivada del Porcentaje de remoción de SST vs. La concentración del polielectrolito catiónico a 5 min de tiempo de agitación; y, optimización de la concentración de polielectrolito catiónico.

Conc. Pol.	% Rem. SST	Δ Conc. Pol.	Δ % Rem. SST	Conc. Pol. Promedio	Δ % Rem. SST/ Δ Conc. Pol.	¿Max ó Min?
10	35.67					
20	37.83	10	2.17	15	2.17E-01	
30	42.42	10	4.58	25	4.58E-01	Max
40	39.75	10	-2.67	35	-2.67E-01	Min
60	53.08	20	13.33	50	6.67E-01	
90	58.50	30	5.42	75	1.81E-01	
120	62.00	30	3.50	105	1.17E-01	
150	64.25	30	2.25	135	7.50E-02	Max
180	63.58	30	-0.67	165	-2.22E-02	Min
200	64.75	20	1.17	190	5.83E-02	
300	68.42	100	3.67	250	3.67E-02	Max

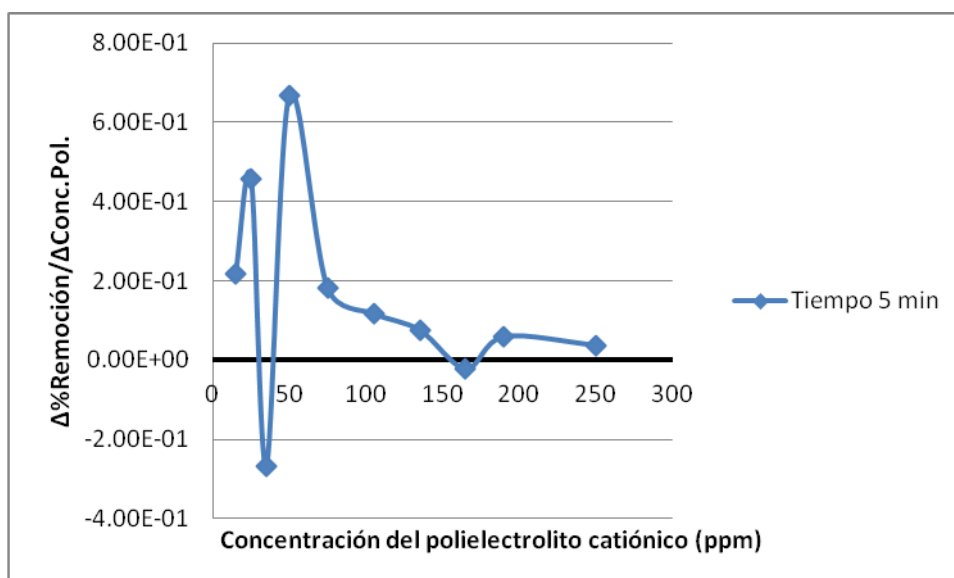


Gráfico 3. 26. Curva de la primera derivada del Porcentaje de remoción de SST vs. La concentración del polielectrolito catiónico a 5 min de tiempo de agitación.

Primera derivada a un tiempo de agitación de 10 min:

Tabla 3. 21. Determinación de la primera derivada del Porcentaje de remoción de SST vs. La concentración del polielectrolito catiónico a 10 min de tiempo de agitación; y, optimización de la concentración de polielectrolito catiónico.

Conc. Pol.	% Rem. SST	Δ Conc. Pol.	Δ % Rem. SST	Conc. Pol. Promedio	Δ % Rem. SST/ Δ Conc. Pol.	¿Max ó Min?
10	41.75					
20	44.00	10	2.25	15	2.25E-01	
30	46.50	10	2.50	25	2.50E-01	Max
40	43.42	10	-3.08	35	-3.08E-01	Min
60	57.33	20	13.92	50	6.96E-01	
90	67.25	30	9.92	75	3.31E-01	
120	73.25	30	6.00	105	2.00E-01	Max
150	71.92	30	-1.33	135	-4.44E-02	Min
180	77.33	30	5.42	165	1.81E-01	
200	85.58	20	8.25	190	4.13E-01	
300	87.83	100	2.25	250	2.25E-02	Max

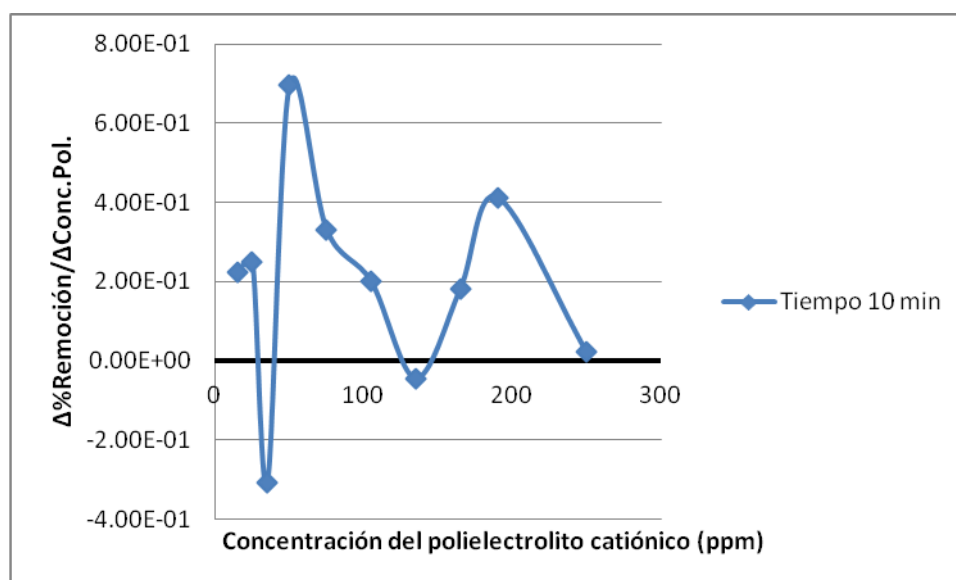


Gráfico 3. 27. Curva de la primera derivada del Porcentaje de remoción de SST vs. La concentración del polielectrolito catiónico a 10 min de tiempo de agitación.

Primera derivada a un tiempo de agitación de 15 min:

Tabla 3. 22. Determinación de la primera derivada del Porcentaje de remoción de SST vs. La concentración del polielectrolito catiónico a 15 min de tiempo de agitación; y, optimización de la concentración de polielectrolito catiónico.

Conc. Pol.	% Rem. SST	Δ Conc. Pol.	Δ % Rem. SST	Conc. Pol. Promedio	Δ % Rem. SST/ Δ Conc. Pol.	¿Max ó Min?
10	44.08					
20	46.92	10	2.83	15	2.83E-01	
30	49.08	10	2.17	25	2.17E-01	Max
40	48.25	10	-0.83	35	-8.33E-02	Min
60	61.75	20	13.50	50	6.75E-01	
90	74.00	30	12.25	75	4.08E-01	
120	81.17	30	7.17	105	2.39E-01	
150	89.67	30	8.50	135	2.83E-01	Max
180	85.83	30	-3.83	165	-1.28E-01	Min
200	94.67	20	8.83	190	4.42E-01	Max
300	93.00	100	-1.67	250	-1.67E-02	

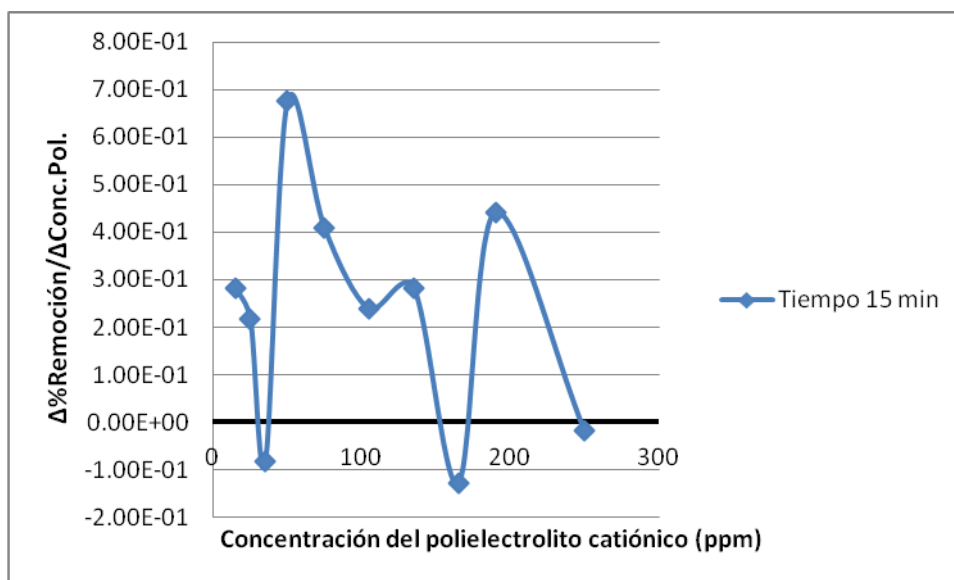


Gráfico 3. 28. Curva de la primera derivada del Porcentaje de remoción de SST vs. La concentración del polielectrolito catiónico a 15 min de tiempo de agitación.

Primera derivada a un tiempo de agitación de 20 min:

Tabla 3. 23. Determinación de la primera derivada del Porcentaje de remoción de SST vs. La concentración del polielectrolito catiónico a 20 min de tiempo de agitación; y, optimización de la concentración de polielectrolito catiónico.

Conc. Pol.	% Rem. SST	Δ Conc. Pol.	Δ % Rem. SST	Conc. Pol. Promedio	Δ % Rem. SST/ Δ Conc. Pol.	¿Max ó Min?
10	43.17					
20	47.50	10	4.33	15	4.33E-01	
30	49.92	10	2.42	25	2.42E-01	
40	50.50	10	0.58	35	5.83E-02	
60	66.58	20	16.08	50	8.04E-01	
90	80.75	30	14.17	75	4.72E-01	
120	88.08	30	7.33	105	2.44E-01	
150	95.92	30	7.83	135	2.61E-01	Max
180	93.92	30	-2.00	165	-6.67E-02	Min
200	96.00	20	2.08	190	1.04E-01	Max
300	92.83	100	-3.17	250	-3.17E-02	

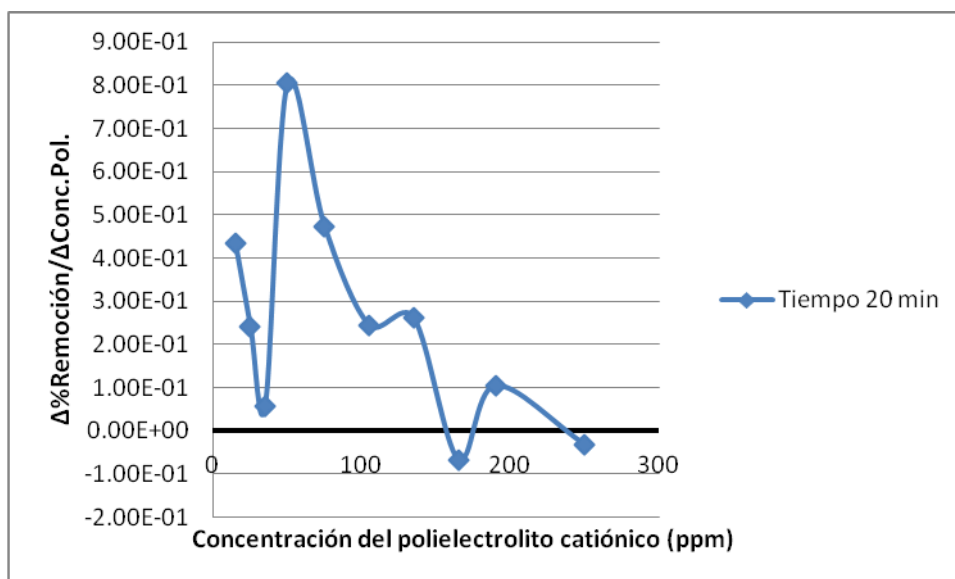


Gráfico 3. 29. Curva de la primera derivada del Porcentaje de remoción de SST vs. La concentración del polielectrolito catiónico a 20 min de tiempo de agitación.

Primera derivada a un tiempo de agitación de 30 min:

Tabla 3. 24. Determinación de la primera derivada del Porcentaje de remoción de SST vs. La concentración del polielectrolito catiónico a 30 min de tiempo de agitación; y, optimización de la concentración de polielectrolito catiónico.

Conc. Pol.	% Rem. SST	Δ Conc. Pol.	Δ % Rem. SST	Conc. Pol. Promedio	Δ % Rem. SST/ Δ Conc. Pol.	¿Max ó Min?
10	45.42					
20	48.67	10	3.25	15	3.25E-01	
30	51.42	10	2.75	25	2.75E-01	
40	52.25	10	0.83	35	8.33E-02	
60	68.50	20	16.25	50	8.13E-01	
90	84.92	30	16.42	75	5.47E-01	
120	93.58	30	8.67	105	2.89E-01	
150	98.17	30	4.58	135	1.53E-01	Max
180	97.17	30	-1.00	165	-3.33E-02	
200	95.67	20	-1.50	190	-7.50E-02	
300	92.33	100	-3.33	250	-3.33E-02	

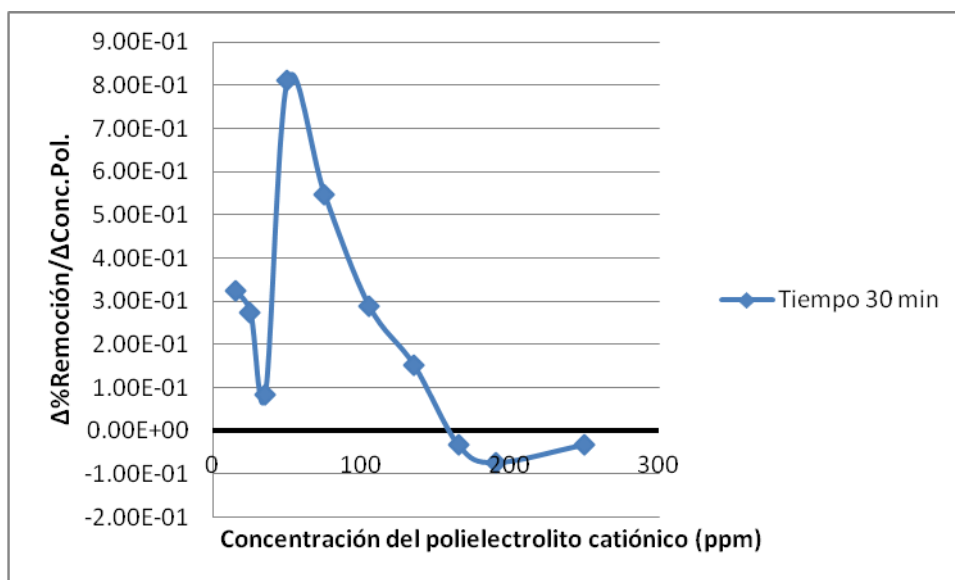


Gráfico 3. 30. Curva de la primera derivada del Porcentaje de remoción de SST vs. La concentración del polielectrolito catiónico a 30 min de tiempo de agitación.

Primera derivada a un tiempo de agitación de 60 min:

Tabla 3. 25. Determinación de la primera derivada del Porcentaje de remoción de SST vs. La concentración del polielectrolito catiónico a 60 min de tiempo de agitación; y, optimización de la concentración de polielectrolito catiónico.

Conc. Pol.	% Rem. SST	Δ Conc. Pol.	Δ % Rem. SST	Conc. Pol. Promedio	Δ % Rem. SST/ Δ Conc. Pol.	¿Max ó Min?
10	48.08					
20	49.08	10	1.00	15	1.00E-01	
30	53.00	10	3.92	25	3.92E-01	
40	54.50	10	1.50	35	1.50E-01	
60	81.83	20	27.33	50	1.37E+00	
90	90.25	30	8.42	75	2.81E-01	
120	97.17	30	6.92	105	2.31E-01	
150	99.75	30	2.58	135	8.61E-02	Max
180	98.58	30	-1.17	165	-3.89E-02	
200	97.58	20	-1.00	190	-5.00E-02	
300	90.08	100	-7.50	250	-7.50E-02	

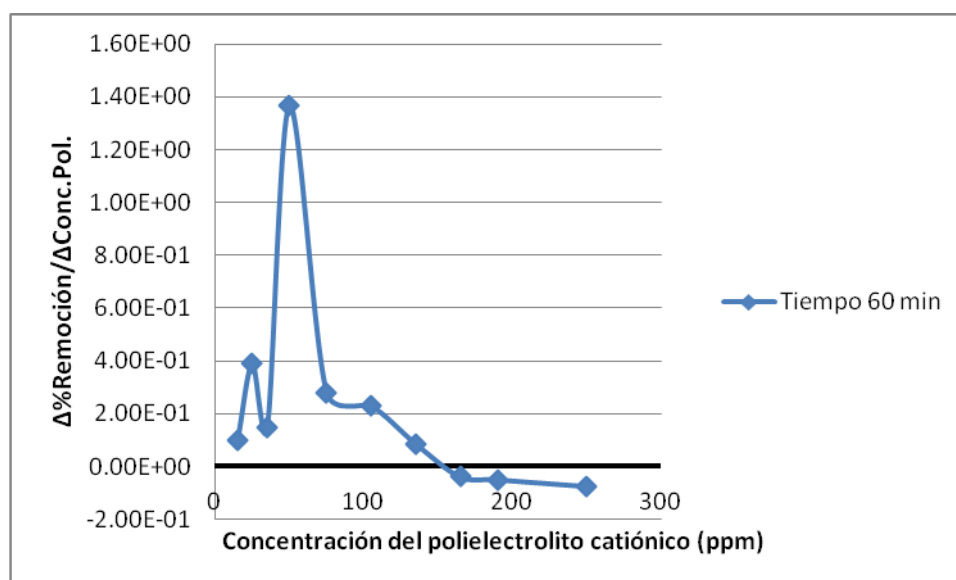


Gráfico 3. 31. Curva de la primera derivada del Porcentaje de remoción de SST vs. La concentración del polielectrolito catiónico a 60 min de tiempo de agitación.

Primera derivada a un tiempo de agitación de 80 min:

Tabla 3. 26. Determinación de la primera derivada del Porcentaje de remoción de SST vs. La concentración del polielectrolito catiónico a 80 min de tiempo de agitación; y, optimización de la concentración de polielectrolito catiónico.

Conc. Pol.	% Rem. SST	Δ Conc. Pol.	Δ % Rem. SST	Conc. Pol. Promedio	Δ % Rem. SST/ Δ Conc. Pol.	¿Max ó Min?
10	48.25					
20	49.83	10	1.58	15	1.58E-01	
30	57.33	10	7.50	25	7.50E-01	Max
40	56.58	10	-0.75	35	-7.50E-02	Min
60	82.08	20	25.50	50	1.28E+00	
90	91.83	30	9.75	75	3.25E-01	
120	98.00	30	6.17	105	2.06E-01	
150	99.67	30	1.67	135	5.56E-02	Max
180	99.33	30	-0.33	165	-1.11E-02	
200	96.92	20	-2.42	190	-1.21E-01	
300	89.25	100	-7.67	250	-7.67E-02	

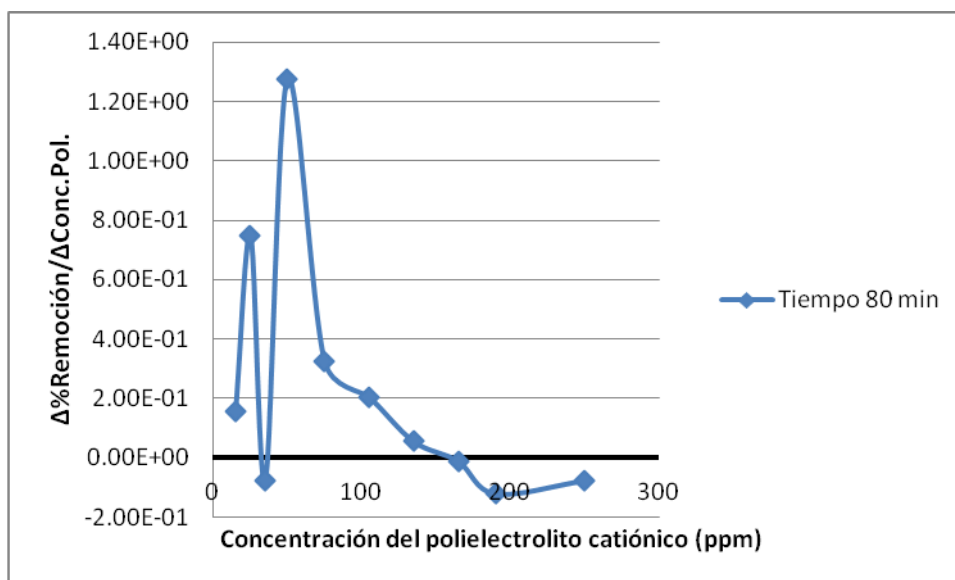


Gráfico 3. 32. Curva de la primera derivada del Porcentaje de remoción de SST vs. La concentración del polielectrolito catiónico a 80 min de tiempo de agitación.

Primera derivada a un tiempo de agitación de 100 min:

Tabla 3. 27. Determinación de la primera derivada del Porcentaje de remoción de SST vs. La concentración del polielectrolito catiónico a 100 min de tiempo de agitación; y, optimización de la concentración de polielectrolito catiónico.

Conc. Pol.	% Rem. SST	Δ Conc. Pol.	Δ % Rem. SST	Conc. Pol. Promedio	Δ % Rem. SST/ Δ Conc. Pol.	¿Max ó Min?
10	48.17					
20	50.25	10	2.08	15	2.08E-01	
30	58.25	10	8.00	25	8.00E-01	Max
40	57.50	10	-0.75	35	-7.50E-02	Min
60	82.50	20	25.00	50	1.25E+00	
90	91.92	30	9.42	75	3.14E-01	
120	98.42	30	6.50	105	2.17E-01	
150	99.67	30	1.25	135	4.17E-02	Max
180	99.58	30	-0.08	165	-2.78E-03	
200	96.25	20	-3.33	190	-1.67E-01	
300	88.58	100	-7.67	250	-7.67E-02	

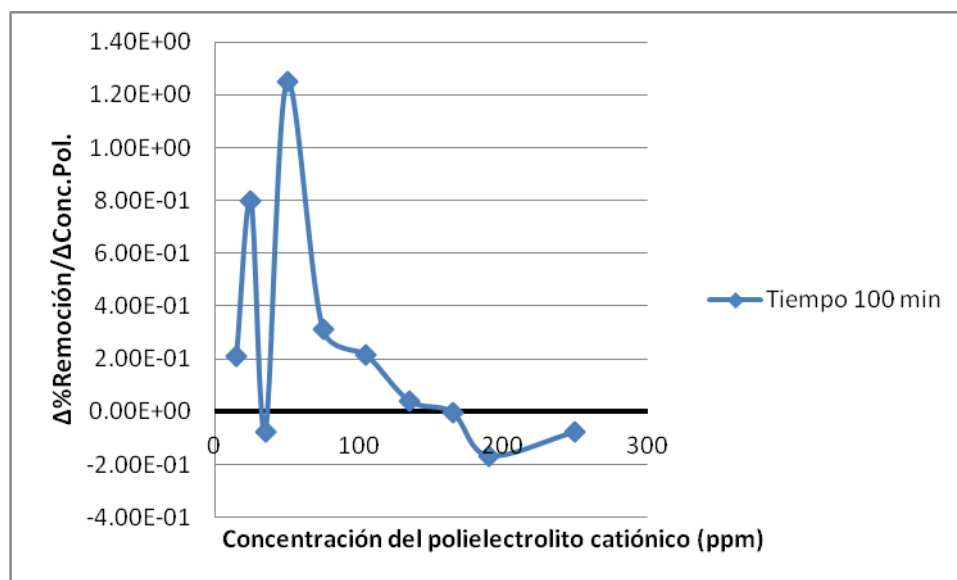


Gráfico 3. 33. Curva de la primera derivada del Porcentaje de remoción de SST vs. La concentración del polielectrolito catiónico a 100 min de tiempo de agitación.

Del gráfico 3.26 al gráfico 3.33, cálculo de la primera derivada del porcentaje de remoción de SST vs. la concentración del polielectrolito, se concluye que la concentración óptima del polielectrolito se encuentra entre 150 y 180 ppm (estos puntos han sido resaltados en las tablas del 3.20 al 3.27), ya que entre estas concentraciones se encuentran los máximos de los porcentajes de remoción de SST, que se identifican cuando la derivada del porcentaje de remoción de SST vs. la concentración del polielectrolito se iguala a cero.

3.4.6. Optimización de la concentración del polielectrolito catiónico y tiempo de centrifugación a escala industrial

En el apartado anterior en las pruebas realizadas a nivel de laboratorio se determinó que la concentración óptima del polielectrolito para una adecuada separación de lodos se encuentra entre 150 y 180 ppm de polielectrolito catiónico.

A nivel de laboratorio se verificó que a una mayor fuerza cortante (velocidad de centrifugación) se obtenía un mejor desempeño en la compactación de lodos y en consecuencia en las características del efluente clarificado. A nivel industrial en la centrifuga de tornillo sólo se evaluará el desempeño de la concentración del polielectrolito catiónico con respecto al tiempo de centrifugación a una velocidad de centrifugación de 4200 RPM, los cuales se encuentran programados en el equipo.

Los resultados obtenidos se muestran a continuación:

Concentración del polielectrolito catiónico de 150 ppm:

Fecha 1:

Tabla 3. 28. Resultados del ensayo I en la centrifuga a 150 ppm y 4200 RPM.

Parámetros evaluados del efluente aceitoso	Tiempo de centrifugación (min)			
	0	5	10	20
NTU	1200	241	72	9
A&G (mg/L)	37598	1597	234	17
SST (mg/L)	558	141	36	11
PH	7.9			
Fenoles (mg/L)	11.6	4.2	1.1	0.7
Sulfuros (mg/L)	2.9	0.7	0.6	0.6
Cloro Residual	0.02	0.02	0.02	0.02
% Agua en fangos	-	80.6	79.3	76.1

Fecha 2:

Tabla 3. 29. Resultados del ensayo II en la centrifuga a 150 ppm y 4200 RPM.

Parámetros evaluados del efluente aceitoso	Tiempo de centrifugación (min)			
	0	5	10	20
NTU	1104	139	49	7
A&G (mg/L)	36980	1120	124	19
SST (mg/L)	442	138	46	14
PH	8.3			
Fenoles (mg/L)	9.8	3.2	1.9	0.5
Sulfuros (mg/L)	3.2	1.4	0.9	0.8
Cloro Residual	0.01	1.01	2.01	3.01
% Agua en fangos	-	81.2	78.9	77.6

Concentración del polielectrolito catiónico de 180 ppm:

Fecha 1:

Tabla 3. 30. Resultados del ensayo I en la centrifuga a 180 ppm y 4200 RPM.

Parámetros evaluados del efluente aceitoso	Tiempo de centrifugación (min)			
	0	5	10	20
NTU	1200	142	51	6
A&G (mg/L)	38450	1349	91	13
SST (mg/L)	674	183	65	8
PH	7.2			
Fenoles (mg/L)	14.9	5.4	1	0.5
Sulfuros (mg/L)	3.4	1.3	0.8	0.7
Cloro Residual	0.01	1.01	2.01	3.01
% Agua en fangos	-	78.9	78.3	75.9

Fecha 2:

Tabla 3. 31. Resultados del ensayo II en la centrifuga a 180 ppm y 4200 RPM.

Parámetros evaluados del efluente aceitoso	Tiempo de centrifugación (min)			
	0	5	10	20
NTU	1200	173	64	9
A&G (mg/L)	39102	1650	126	22
SST (mg/L)	688	200	45	15
PH	8.1			
Fenoles (mg/L)	14.2	4.9	2.1	0.5
Sulfuros (mg/L)	3.8	0.7	0.6	0.6
Cloro Residual	0.01	0.02	0.02	0.02
% Agua en fangos	-	79.9	77.8	75.9

Se determinará la concentración óptima de polielectrolito catiónico para la deshidratación de los lodos en la centrifuga de tornillo tomando como punto de partida el número de unidades nefelometricas en el agua separada del lodo deshidratado:

Tabla 3. 32. Número de unidades nefelometricas obtenidas de acuerdo al desempeño del polielectrolito catiónico a concentración y tiempo de centrifugación variables.

Ensayo a 4200 RPM	Tiempo (min)			
	0	5	10	20
150 ppm - I	1200	241	72	9
180 ppm - I	1200	142	51	6
150 ppm - II	1104	139	49	7
180 ppm - II	1200	173	64	9

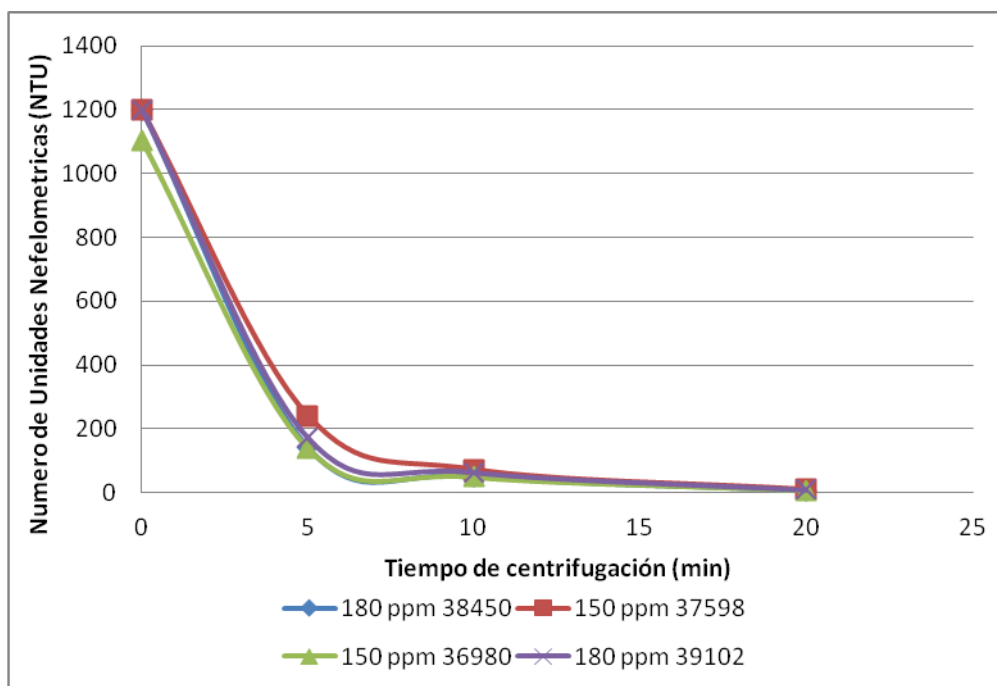


Gráfico 3. 34. Número de unidades nefelométricas con respecto al tiempo de centrifugación a 4200 RPM

Para determinar cuál de las concentraciones de polielectrolito añadido es la óptima para el proceso de deshidratación en la centrifuga de tornillo a 4200 RPM, se calculó el porcentaje de remoción de sólidos para cada ensayo realizado:

Tabla 3. 33. Porcentaje de remoción obtenido de acuerdo al desempeño del polielectrolito catiónico a concentración y tiempo de centrifugación variables.

Ensayo	Tiempo (min)			
	0	5	10	20
150 ppm - I	0	79.92	94.00	99.25
180 ppm - I	0	88.17	95.75	99.50
150 ppm - II	0	87.41	95.56	99.37
180 ppm - II	0	85.58	94.67	99.25

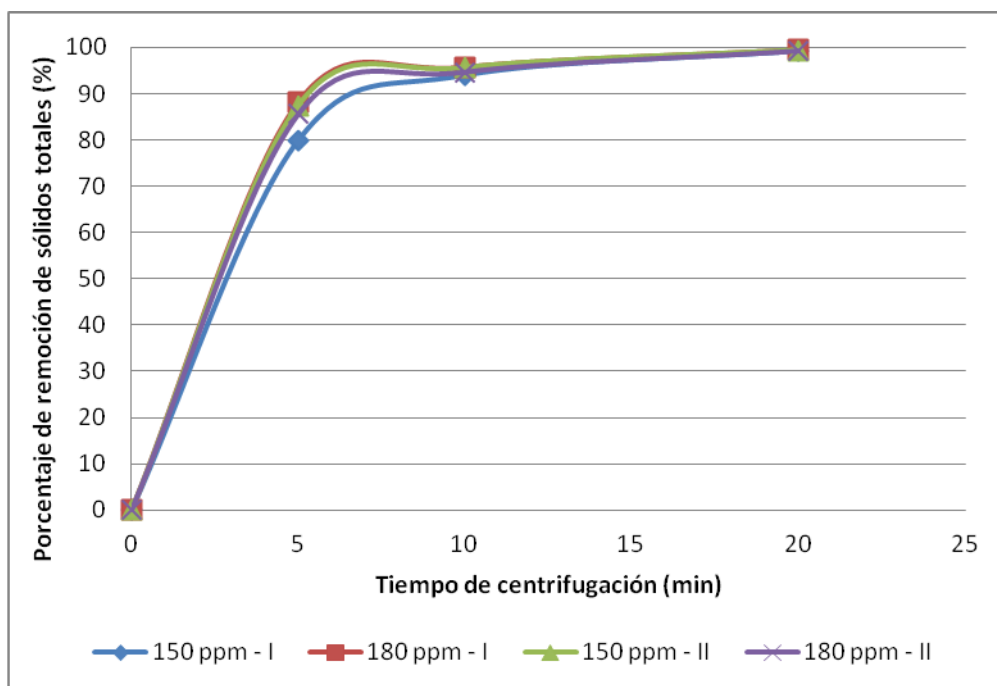


Gráfico 3. 35. Porcentaje de remoción con respecto al tiempo de centrifugación a 4200 RPM

En el gráfico 3.35, se observa que a los 20 minutos de centrifugación se obtiene un porcentaje de remoción mayor a 99%, tanto para una adición de 150 ppm, como 180 ppm de polielectrolito catiónico. Por lo tanto, se elige como concentración óptima del polielectrolito catiónico el valor de 150 ppm, el incremento en la concentración a 180 ppm no se justifica con el ligero aumento en el porcentaje de remoción.

3.4.7. Estudio de la compactación de los lodos deshidratados con respecto al tiempo de centrifugación

Las variables de control de la compactación del lodo en la centrífuga de laboratorio son: la aceleración de la centrífuga y el tiempo de centrifugación. La concentración de SST del lodo compactado puede ser calculada por medio de:

$$SST_f = (v_o / v_f) SST_o \dots\dots\dots(3.8)$$

Donde:

SST_f : sólidos suspendidos del lodo compactado en la centrífuga, kg/m³

SST_o: sólidos suspendidos de la muestra de lodo a centrifugar, kg/m³

V_f: Volumen final del lodo compactado, mL (medido en la cápsula de centrifugación)

V_o: Volumen inicial de la muestra de lodo, mL (medido en la cápsula de centrifugación)

Con los resultados de los ensayos, se construyeron curvas de variación temporal de SST en función de la concentración aplicada de polímero.

Para los resultados obtenidos en el laboratorio (prueba de jarras):

Tabla 3. 34. Influencia del tiempo y la velocidad de agitación en la compactación de la torta para la prueba de jarras.

Tiempo (min)	150	180	200		Z ^{1.5} * t	log(Z ^{1.5} * t)
0	64.4	64.4	64.4		0	
5	73.27	73.60	73.94		2955.59	3.47
10	83.53	83.75	82.67		5911.17	3.77
15	99.23	101.90	98.77		8866.76	3.95
20	106.80	104.04	105.92		11822.34	4.07
30	111.42	109.52	108.97		17733.51	4.25
60	126.52	116.88	118.17		35467.03	4.55
80	126.77	124.56	119.48		47289.37	4.67
100	126.77	126.77	124.08		59111.71	4.77

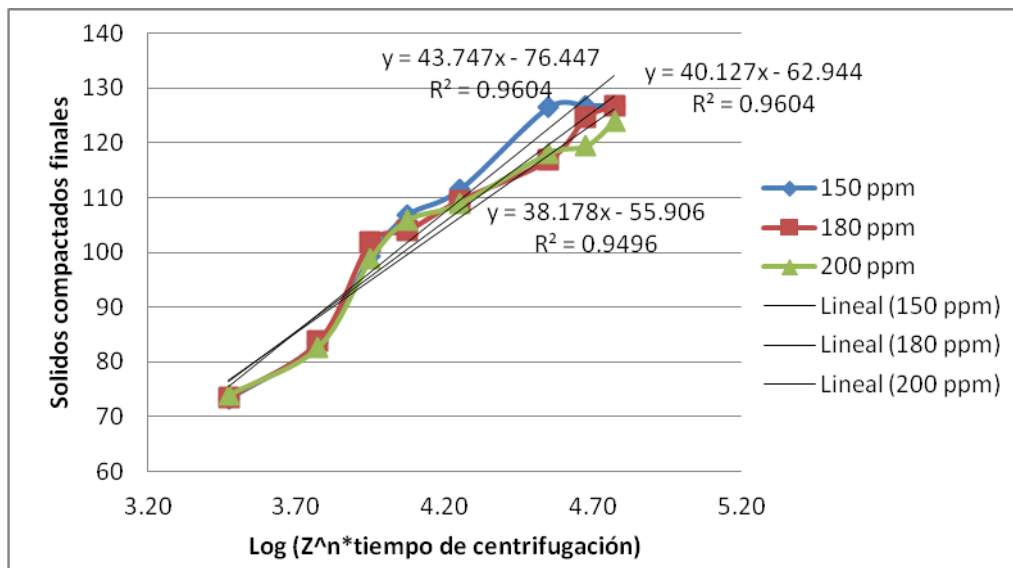


Gráfico 3. 36. Influencia del tiempo y la velocidad de centrifugación en la compactación de la torta para la prueba de jarras.

Para los resultados obtenidos en la centrifuga tipo tornillo:

Tabla 3. 35. Influencia del tiempo y la velocidad de centrifugación en la compactación de la torta para la centrifuga tipo tornillo.

150 ppm - l	Tiempo	Tiempo	Tiempo	Tiempo
	0	5	10	20
SST efluente (mg/L)	558	141	36	11
SST lodo (mg/L)		417	522	547
$Z^{1.5} \cdot t$	0	8110126.73	16220253.5	32440506.9
$\log(Z^{1.5} \cdot t)$		6.909	7.210	7.511

Tabla 3. 36. Influencia del tiempo y la velocidad de centrifugación en la compactación de la torta para la centrifuga tipo tornillo.

180 ppm - l	Tiempo	Tiempo	Tiempo	Tiempo
	0	5	10	20
SST efluente (mg/L)	674	183	65	8
SST lodo (mg/L)		491	609	666
$Z^{1.5} \cdot t$	0	8110126.73	16220253.5	32440506.9
$\log(Z^{1.5} \cdot t)$		6.909	7.210	7.511

Tabla 3. 37. Influencia del tiempo y la velocidad de centrifugación en la compactación de la torta para la centrifuga tipo tornillo.

150 ppm - II	Tiempo	Tiempo	Tiempo	Tiempo
	0	5	10	20
SST efluente (mg/L)	442	138	46	14
SST lodo (mg/L)		304	396	428
Z ^{1.5} * t	0	8110126.73	16220253.5	32440506.9
log(Z ^{1.5} *t)		6.909	7.210	7.511

Tabla 3. 38. Influencia del tiempo y la velocidad de centrifugación en la compactación de la torta para la centrifuga tipo tornillo.

180 ppm - II	Tiempo	Tiempo	Tiempo	Tiempo
	0	5	10	20
SST efluente (mg/L)	688	200	45	15
SST lodo (mg/L)		488	643	673
Z ^{1.5} * t	0	8110126.73	16220253.5	32440506.9
log(Z ^{1.5} *t)		6.909	7.210	7.511

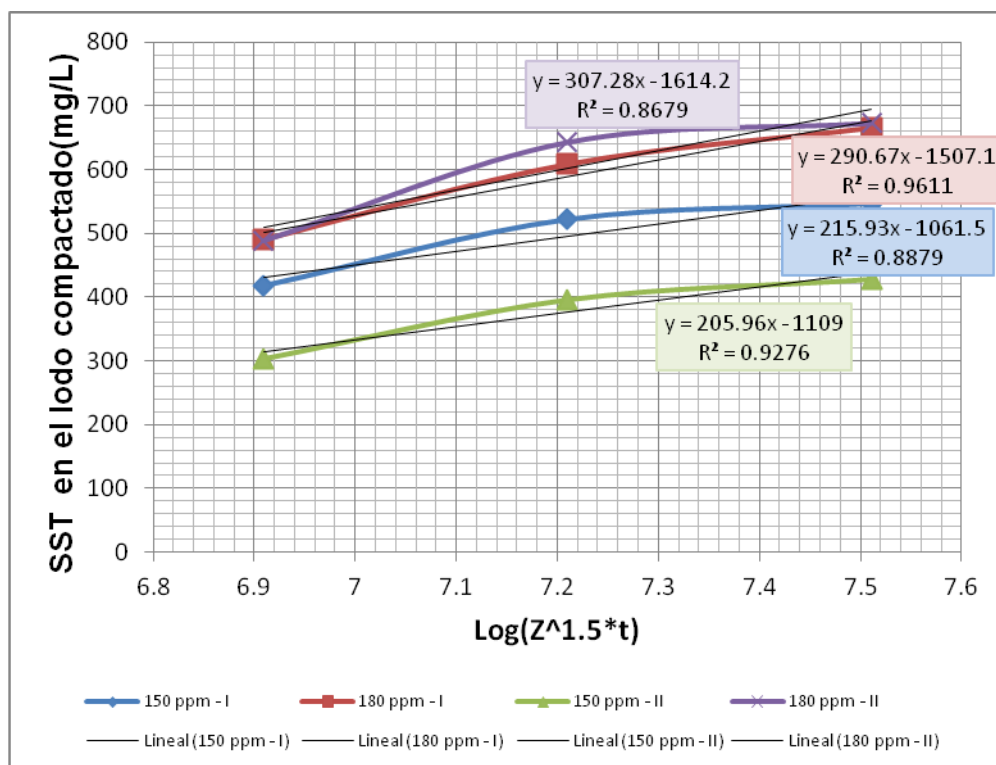


Gráfico 3. 37. Influencia del tiempo y la velocidad de centrifugación en la compactación de la torta para la centrifuga tipo tornillo.

3.4.8. Comparación de volumen de lodos producidos mediante el acondicionamiento con los polielectrolitos estudiados

Tabla 3. 39. Comparación del grado de compactación obtenido con ambos polielectrolitos.

Fecha	Polielectrolito	Concentración (ppm)	A&G (mg/L)	A&G Final	Grado de compactación
01/05/2012	Beatzdearborn	220	--	--	18.2
01/03/2012	Beatzdearborn	200	--	--	18.5
01/04/2012	Beatzdearborn	220	--	--	18.6
01/06/2012	Beatzdearborn	200	--	--	18.6
11/12/2012	Polyfloc CP 1160	150	37598	17	22.4
14/12/2012	Polyfloc CP 1160	180	38450	13	23.9
15/12/2012	Polyfloc CP 1160	150	36980	19	24.1
19/12/2012	Polyfloc CP 1160	180	39102	22	24.1

En términos generales se ve un aumento del grado de compactación de sólidos con el uso del Polyfloc CP 1160 esto lleva a un ahorro económico en los siguientes puntos:

- Disposición de sólidos: una mayor compactación de sólidos permite un menor uso del volquete transportador de residuos líquidos por parte de Disal para la disposición de la misma cantidad de lodo compactado.
- Dosificación de polielectrolito: los precios en el mercado actual del Beatzdearborn y Polifloc CP 1160 son muy similares. La dosificación de Polifloc en ppm es menor al usado con el Beatzdearborn y por ende un ahorro económico al disminuir el uso de polielectrolito.
- Disposición final: el aumento del grado de compactación permite un menor volumen a ocupar en el depósito de relleno sanitario y por tanto un menor pago por volumen (m3).

Capítulo 4 ANÁLISIS ESTADÍSTICO

A continuación se muestra el proceso de validación de los resultados obtenidos.

4.1. Resultados obtenidos

Para el polielectrolito BEATZDEARBORN (Polielectrolito aniónico):

Tabla 4. 1. Pruebas preliminares para el estudio del Beatzdearborn (Polielectrolito aniónico)

	Concentración del Polielectrolito (ppm)					
Tiempo (min)	10	20	30	60	90	180
15	971	973	954	899	873	742
30	953	969	928	863	834	703

Para el polielectrolito POLYFLOC CP 1160 (Polielectrolito catiónico):

Tabla 4. 2. Pruebas preliminares para el estudio del Polyfloc CP 1160 (Polielectrolito catiónico)

	Concentración del Polielectrolito (ppm)					
Tiempo (min)	10	20	30	60	90	180
15	687	659	608	468	310	182
	669	629	618	453	313	165
	657	623	606	457	312	164
30	658	614	590	379	187	35
	657	618	580	379	180	35
	650	616	579	377	176	33

De los resultados anteriores se calculan las siguientes medias muestrales:

Para el polielectrolito BEATZDEARBORN (Polielectrolito aniónico):

Tabla 4. 3. Medias muestrales para el tratamiento 1 (Poliectrolito aniónico)

	Concentración del Poliectrolito (ppm)					
Tiempo (min)	10	20	30	60	90	180
15	971	973	954	899	873	742
30	953	969	928	863	834	703

Para el poliectrolito POLYFLOC CP 1160 (Poliectrolito catiónico):

Tabla 4. 4. Medias muestrales para el tratamiento 2 (Poliectrolito catiónico)

	Concentración del Poliectrolito (ppm)					
Tiempo (min)	10	20	30	60	90	180
15	671	637	611	459	312	170
30	655	616	583	378	181	34

Considerando que la desviación estándar para cada par de tratamientos es la misma, ya que el procedimiento usado para los ensayos es el mismo así como el experimentador:

Tabla 4. 5. Desviación estándar muestral para ambos tratamientos

	Concentración del Poliectrolito (ppm)					
Tiempo (min)	10	20	30	60	90	180
15	15.10	19.29	6.43	7.77	1.53	10.12
30	4.36	2.00	6.08	1.15	5.57	1.15

4.2. Pruebas de hipótesis

Anteriormente, se han realizado las respectivas observaciones con respecto a la diferencia en el desempeño del poliectrolito catiónico y el aniónico utilizados en el lodo tratado, pero se desea comprobar que efectivamente el tratamiento con el poliectrolito catiónico es el más apropiado.

Se han realizado pruebas con dos poliectrolitos diferentes con el fin de obtener un menor volumen del lodo deshidratado, esto se refleja en la calidad del agua clarificada. Por ello, se desea probar que la media del número de unidades nefelométricas del agua clarificada obtenida con el poliectrolito

aniónico es mayor, a la obtenida haciendo uso del polielectrolito catiónico. Con este fin se realiza una prueba de hipótesis, se define que el **tratamiento 1** se realizó con el **polielectrolito aniónico** y el **tratamiento 2** se realizó con el **polielectrolito catiónico**.

Se aplicará el siguiente procedimiento:

Para el tratamiento 1 y el tratamiento 2 a 15 min de agitación y 10 ppm de concentración de polielectrolito:

1. La cantidad de interés es la diferencia de las medias del número de unidades nefelométricas (NTU), $\mu_1 - \mu_2$ y $\Delta_0=0$
2. $H_0: \mu_1 - \mu_2 = 0 : \mu_1 = \mu_2$
3. $H_1: \mu_1 > \mu_2$. Quiere rechazarse H_0 si el polielectrolito catiónico (tratamiento 2) mejora la deshidratación de los lodos.
4. $\alpha = 0.05$, con Grados de libertad= $n_1+n_2-2= 1+3-2= 2$, entonces $t_{\text{crítico}} = 2,92$
5. El estadístico de la prueba es:

$$t = \frac{\bar{x}_1 - \bar{x}_2 - 0}{\sqrt{\frac{(n_1-1)s_1^2 + (n_2-1)s_2^2}{n_1+n_2-2} \left(\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2} \right)}} \dots\dots\dots(4.1)$$

Donde $s_1^2 = s_2^2 = 15.10^2 = 228$ y $n_1=1$ y $n_2 = 3$

6. Se rechaza $H_0: \mu_1 = \mu_2$ si $t > t_{\text{crítico}}$
7. Cálculos: Puesto que $\bar{x}_1 = 971$ NTU y $\bar{x}_2 = 671$ NTU, el estadístico de la prueba es:

$$t = \frac{971 - 671 - 0}{\sqrt{\frac{(1-1)228 + (3-1)228}{1+3-2} \left(\frac{1}{1} + \frac{1}{3} \right)}} = \frac{300}{15.100 \times 1.155} = 17.21$$

$$t = 17.21$$

8. Conclusión:
Puesto que $t = 17.21 > 2.92$, se rechaza $H_0: \mu_1 = \mu_2$ con el nivel $\alpha = 0.05$, y se concluye que con el uso del polielectrolito catiónico se obtiene una significativa mayor deshidratación del lodo tratado.

Siguiendo el procedimiento anterior para todos los tratamientos realizados a 15 y 30 minutos de agitación, se tienen los siguientes valores para el estadístico t:

Tabla 4. 6. Valores del estadístico t

Tiempo (min)	Concentración del Polielectrolito (ppm)					
	10	20	30	60	90	180
15	17.21	15.09	46.25	49.02	318.25	48.94
30	59.21	152.85	49.12	363.50	101.57	501.50

Comparando la tabla con el valor de $t_{\text{critico}} = 2.9200$, se observa que $t > t_{\text{critico}}$ para todos los datos de la tabla. Finalmente se concluye:

El uso del polielectrolito catiónico (tratamiento 2) efectúa una significativa mejora en la deshidratación del lodo tratado. Con estas pruebas de hipótesis se validan las observaciones realizadas en el ítem 3.3.

Capítulo 5 DISCUSIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

5.1. Influencia de la naturaleza química del polielectrolito

- En el presente trabajo se estudio el desempeño de dos tipos de polielectrolito para la deshidratación de los lodos de una planta de tratamiento de efluentes aceitosos. Estos fueron: Polyfloc CP1160, un polielectrolito catiónico en polvo; y, Beatz Dearborn M803, polielectrolito aniónico en polvo.
- Se observo una diferencia significativa entre el desempeño de los polielectrolitos catiónico y aniónico a las mismas condiciones de concentración del polielectrolito, tiempo y velocidad de agitación.
- El polielectrolito catiónico muestra un mejor desempeño, al obtenerse un menor número de unidades nefelometricas en el agua clarificada como resultado. Su acción favorece la aglomeración de los sólidos suspendidos del lodo en un mayor grado, de modo que el gradiente de las unidades nefelometricas del agua clarificada resultante es mayor que haciendo uso del polielectrolito aniónico como se observa en las graficas del 5 al 11.
- El polielectrolito catiónico favorece en mayor grado la aglomeración de los sólidos suspendidos totales formando un lodo separado (lodo deshidratado) con un menor volumen de agua que el volumen inicial del efluente tratado.
- El agua que no forma parte del lodo deshidratado se denomina agua clarificada la cual tendrá un menor número de unidades nefelometricas que el lodo inicial. Siendo esto un indicador indirecto del grado de deshidratación del lodo tratado. A un mayor grado de deshidratación del lodo tratado, se tendrá un mayor volumen de agua clarificada.

5.2. Influencia de la concentración del polielectrolito

- La influencia de la concentración del polielectrolito se trabajó sólo para el polielectrolito catiónico, el cual mostró un mejor desempeño con respecto al lodo a deshidratar estudiado.
- La concentración del polielectrolito influye en el grado de deshidratación del lodo tratado; por lo tanto, en el número de unidades nefelométricas obtenidas en el agua clarificada.
- A concentración bajas de polielectrolito (menores a 150 ppm de polielectrolito catiónico), el aumento de la concentración favorece la aglomeración de los sólidos suspendidos (deshidratación del lodo), lo que da como resultado un agua clarificada menos turbia. Este efecto se mantiene sólo hasta cierta concentración de polielectrolito conocida como la concentración óptima (entre 150 ppm y 180 ppm de polielectrolito catiónico) ya que adiciones mayores a esta no ejerce un efecto favorable en la deshidratación de los lodos debido a que desestabilizan las partículas aglomeradas, separándolas, a causa de la presencia de mayores fuerzas de repulsión entre las cargas del efluente tratado y polielectrolito en exceso.

5.3. Influencia del tiempo de agitación o centrifugación

- El tiempo de agitación o centrifugación del lodo favorece a la deshidratación del lodo siempre que la concentración del polielectrolito se encuentre en o por debajo de la concentración óptima (150 - 180 ppm de polielectrolito catiónico).
- Para concentración mayores a 180 ppm de polielectrolito catiónico, un tiempo agitación mayor a 20 minutos no contribuye a la formación de una torta más compacta, si no a la desestabilización de la misma.
- Para una velocidad de agitación menor a la adecuada, podría darse un resultado falso de que el tiempo de agitación solo muestra un efecto favorable para la deshidratación del lodo ya que en este caso no se llega a una combinación de concentración y velocidad de centrifugación óptimas.

5.4. Influencia de la velocidad de agitación o centrifugación

- Para concentración del polielectrolito menores o iguales a la apropiada (150 - 180 ppm de polielectrolito catiónico) un incremento en la velocidad de agitación ejerce un efecto favorable en la deshidratación del lodo.
- Cuando se usaron concentración de polímero mayores a la apropiada (150 - 180 ppm de polielectrolito catiónico) y tiempo de agitación mayor a 20 minutos, para cada velocidad agitación y tipo de lodo estudiado, no hubo efecto favorable por el aumento en la velocidad de agitación. El porcentaje de remoción se mantuvo y en algunos casos fue menor, ocurriendo un desmejoramiento en la calidad de la torta. Debido a que las fuerzas cortante mayores favorecen a la desestabilización de la torta cuando esta no cuenta con la compactación adecuada que le debe brindar el polielectrolito.
- Una velocidad alta de agitación ejerce una fuerza cortante mayor que puede afectar la formación de la torta, siempre y cuando la concentración utilizada sea mayor a la concentración óptima.

Capítulo 6 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1. Conclusiones y recomendaciones técnicas

- Los ensayos a nivel de laboratorio mostraron que el método aplicado ayuda en la determinación del rango al cual pertenece la concentración óptima de polielectrolito para los trabajos en la centrifuga. Es recomendable que este procedimiento se realice siempre que se verifiquen cambios significativos en la composición de los lodos, ya sea por el aumento de la producción o algún cambio de tecnología.
- La naturaleza del polielectrolito usado como acondicionador es de alta importancia ya que de no ser el correcto, no serán válidos todos los procedimientos usados para su optimización. Esto se debe a que un polielectrolito de naturaleza no adecuada para el tratamiento de un lodo no favorecerá de la manera más óptima la deshidratación del lodo.
- Del análisis de los resultados obtenidos del tratamiento de lodos en la centrifuga tipo tornillo a 4200 rpm, se obtuvo como concentración óptima del polielectrolito catiónico 150 ppm. Obteniéndose un porcentaje de remoción de sólidos mayor a 99%. Inicialmente se comprobó que una mayor velocidad de agitación favorecía la deshidratación del lodo, por lo que se trabajo con el equipo a su velocidad óptima operativa (80% de la velocidad de diseño).
- El tiempo de agitación o centrifugación del lodo favorece a la deshidratación del lodo siempre que la concentración del polielectrolito se encuentre en o por debajo de la concentración optima (150 - 180 ppm de polielectrolito catiónico).
- Para concentración mayores a 180 ppm de polielectrolito catiónico, un tiempo agitación mayor a 20 minutos no contribuye a la formación de una torta más compacta, si no a la desestabilización de la misma.

- Para una velocidad de agitación menor a la adecuada, podría darse un resultado falso de que el tiempo de agitación solo muestra un efecto favorable para la deshidratación del lodo ya que en este caso no se llega a una combinación de concentración y velocidad de centrifugación óptimas.
- Para concentración del polielectrolito menores o iguales a la apropiada (150 - 180 ppm de polielectrolito catiónico) un incremento en la velocidad de agitación ejerce un efecto favorable en la deshidratación del lodo.
- Cuando se usaron concentración de polímero mayores a la apropiada (150 - 180 ppm de polielectrolito catiónico) y tiempo de agitación mayor a 20 minutos, para cada agitación y tipo de lodo estudiado, no hubo efecto favorable por el aumento en la velocidad de agitación. El porcentaje de remoción se mantuvo y en algunos casos fue menor, ocurriendo un desmejoramiento en la calidad de la torta. Debido a que las fuerzas cortante mayores favorecen a la desestabilización de la torta cuando esta no cuenta con la compactación adecuada que le debe brindar el polielectrolito.

6.2. Conclusiones y recomendaciones económicas

- El uso del polielectrolito catiónico permite una mejor disposición de sólidos, por una mayor compactación de sólidos se hace un menor uso del volquete transportador de residuos líquidos por parte de Disal para la disposición de la misma cantidad de lodo compactado.
- Los precios en el mercado actual del Beatzdearborn y Polifloc CP1160 son muy similares. La dosificación de Polifloc en ppm es menor al usado con el Beatzdearborn y por ende un ahorro económico al disminuir el uso de polielectrolito.

Capítulo 7 BIBLIOGRAFÍA

- API, R.G.Gantz, Proceedings API, Refining Department, Sour Water Studies, vol 54, 1985.
- Eckenfelder Wesley W. (2000) Industrial Water pollution control. McGraw-Hill Companies, Inc.
- EPA (1984) Development document for effluent limitations guidelines and new source performance standarts for the petroleum refining point source category, EPA-440/1-74-014-a, Washington D.C.
- NALCO (1989) Manual del agua, Vol. 1, 2 y3, McGraw-Hill Interamericana de México, S.A. de C.V.
- WEF (1994) Pretreatment of Industrial Wastes. Manual of practice FD-3, USA.
- AWWA (1996). Technology Transfer Handbook: Management of Water Treatment Plant Residuals. American Society of Civil Engineers; American Water Works Association. Denver, Co.
- GRANDIN, S.R. (1992). Desidratação de lodos produzidos nas estações de tratamento de água. São Paulo. 2 v. Dissertação (mestrado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.
- HAGSTROM (1996), L.G. Optimizing polymer conditioning for centrifugal sludge dewatering.
- ZAPPA, S. A., ALMEIDA, G. N., NAKASHIMA, H. (1996). Desidratação de lodo digerido a través de centrifuga.
- MDP-03-Manual de operación Planta Efluentes 07-2012 – Refinería La Pampilla.
- MONTGOMERY, DOUGLAS C. Diseño y Análisis de Experimentos, Grupo Editorial Iberoamérica, 1991.

Índice De Gráficos

Gráfico 3. 1. Efecto concentración del polielectrolito catiónico vs. tiempo de centrifugación I.....	86
.Gráfico 3. 2 Efecto concentración del polielectrolito catiónico vs. tiempo de centrifugación II.....	86
Gráfico 3. 3 Efecto concentración del polielectrolito catiónico vs. tiempo de centrifugación III.....	87
Gráfico 3. 4.Efecto del aumento en las variables concentración del polielectrolito y tiempo de agitación.....	88
Gráfico 3. 5. Número de Unidades Nefelometricas con respecto tiempo de agitación, haciendo uso del polielectrolito aniónico.	94
Gráfico 3. 6. Número de Unidades Nefelometricas con respecto tiempo de agitación a cierta concentración de polielectrolito catiónico.....	95
Gráfico 3. 7. Comparación del desempeño de los polielectrolitos a 10 ppm ..	96
Gráfico 3. 8. Comparación del desempeño de los polielectrolitos a 20 ppm ..	96
Gráfico 3. 9. Comparación del desempeño de los polielectrolitos a 30 ppm ..	97
Gráfico 3. 10. Comparación del desempeño de los polielectrolitos a 60 ppm	97
Gráfico 3. 11. Comparación del desempeño de los polielectrolitos a 90 ppm	98
Gráfico 3. 12. Número de Unidades Nefelometricas (NTU) del efluente clarificado con respecto al tiempo de centrifugación a distintas concentración del polielectrolito catiónico, evaluado a 120 RPM.....	99
Gráfico 3. 13. Número de Unidades Nefelometricas (NTU) del efluente clarificado con respecto al tiempo de centrifugación a distintas concentración del polielectrolito catiónico, evaluado a 300 RPM.....	100
Gráfico 3. 14. Sólidos suspendidos totales en el lodo separado a 300 rpm. .	103
Gráfico 3. 15. Porcentaje de remoción de sólidos del agua clarificado a 120 rpm con respecto a la concentración del polielectrolito.....	104
Gráfico 3. 16. Porcentaje de remoción de sólidos del agua clarificado a 120 rpm con respecto al tiempo de agitación	104
Gráfico 3. 17. Porcentaje de remoción de sólidos del agua clarificado a 300 rpm con respecto a la concentración del polielectrolito.....	105
Gráfico 3. 18. Porcentaje de remoción de sólidos del agua clarificado a 300 rpm con respecto al tiempo de agitación	106
Gráfico 3. 19. Comparación del porcentaje de remoción de sólidos a 5 min.	106
Gráfico 3. 20. Comparación del porcentaje de remoción de sólidos a 10 min.	107
Gráfico 3. 21. Comparación del porcentaje de remoción de sólidos a 15 min.	107
Gráfico 3. 22. Comparación del porcentaje de remoción de sólidos a 20 min.	108

Gráfico 3. 23. Comparación del porcentaje de remoción de sólidos a 30 min.	108
Gráfico 3. 24. Comparación del porcentaje de remoción de sólidos a 60 min.	109
Gráfico 3. 25. Porcentaje de remoción de sólidos suspendidos con respecto a la concentración del polielectrolito catiónico a distintos el tiempo de agitación a 300 RPM.	110
Gráfico 3. 26. Curva de la primera derivada del Porcentaje de remoción de SST vs. La concentración del polielectrolito catiónico a 5 min de tiempo de agitación.....	111
Gráfico 3. 27. Curva de la primera derivada del Porcentaje de remoción de SST vs. La concentración del polielectrolito catiónico a 10 min de tiempo de agitación.....	112
Gráfico 3. 28. Curva de la primera derivada del Porcentaje de remoción de SST vs. La concentración del polielectrolito catiónico a 15 min de tiempo de agitación.....	113
Gráfico 3. 29. Curva de la primera derivada del Porcentaje de remoción de SST vs. La concentración del polielectrolito catiónico a 20 min de tiempo de agitación.....	114
Gráfico 3. 30. Curva de la primera derivada del Porcentaje de remoción de SST vs. La concentración del polielectrolito catiónico a 30 min de tiempo de agitación.....	115
Gráfico 3. 31. Curva de la primera derivada del Porcentaje de remoción de SST vs. La concentración del polielectrolito catiónico a 60 min de tiempo de agitación.....	116
Gráfico 3. 32. Curva de la primera derivada del Porcentaje de remoción de SST vs. La concentración del polielectrolito catiónico a 80 min de tiempo de agitación.....	117
Gráfico 3. 33. Curva de la primera derivada del Porcentaje de remoción de SST vs. La concentración del polielectrolito catiónico a 100 min de tiempo de agitación.....	118
Gráfico 3. 34. Número de unidades nefelometricas con respecto al tiempo de centrifugación a 4200 RPM	122
Gráfico 3. 35. Porcentaje de remoción con respecto al tiempo de centrifugación a 4200 RPM	123
Gráfico 3. 36. Influencia del tiempo y la velocidad de centrifugación en la compactación de la torta para la prueba de jarras.....	125
Gráfico 3. 37. Influencia del tiempo y la velocidad de centrifugación en la compactación de la torta para la centrifuga tipo tornillo.	126

Índice De Figuras

Figura 2. 1. Diagrama esquemático de la planta de tratamiento de efluentes	11
Figura 2. 2. Diagrama esquemático de la planta de tratamiento de efluentes	11
Figura 2. 3. Diagrama esquemático de la planta de efluentes en la pantalla nativa GUS.....	12
Figura 2. 4. Diagrama esquemático de la planta de efluentes en la pantalla nativa GUS.....	13
Figura 2. 5. Esquema de un separador API.....	15
Figura 2. 6. Esquema de un Skimmer tipo tubería ranurada.....	16
Figura 2. 7. Separador API de la planta de tratamiento de aguas aceitosas..	19
Figura 2. 8. Separador API de la planta de tratamiento de aguas aceitosas..	21
Figura 2. 9. Separador CPI de la planta de tratamiento de aguas aceitosas.	23
Figura 2. 10. Dibujo esquemático de un separador CPS.....	25
Figura 2. 11. Separador CPS de la planta de tratamiento de aguas aceitosas.	26
Figura 2. 12. De la planta de tratamiento de aguas aceitosas.	27
Figura 2. 13. Unidad de floculación de la planta de tratamiento de aguas aceitosas.....	33
Figura 2. 14. Unidad de flotación por aire disuelto de la planta de tratamiento de aguas aceitosas.	40
Figura 2. 15. Centrifuga tubular.....	41
Figura 2. 16. Centrifuga de cámara múltiple.....	42
Figura 2. 17. Centrifuga de tornillo.....	42
Figura 2. 18. Centrifuga de discos.....	43
Figura 2. 19. Esquema de las partes de una centrifuga del tipo tornillo.....	44
Figura 2. 20. Decantador centrífugo de la planta de tratamiento de aguas aceitosas.....	45
Figura 2. 21. API sur y norte de la planta de tratamiento de aguas aceitosas.	47
Figura 2. 22. Borneras del CPI de la planta de tratamiento de aguas aceitosas.....	47
Figura 2. 23. Arqueta/Balsa de homogenización.....	49
Figura 2. 24. De izquierda a derecha, Cubetas de coagulante, deshidratante, floculante y Soda Caústica.....	51
Figura 2. 25. Arquetas de coagulación y floculación.....	52
Figura 2. 26. Drums de almacenamiento del deshidratante y floculante.....	53
Figura 2. 27. Drum de almacenamiento de soda caústica.....	53
Figura 2. 28. Cubetas de mezclado, maduración y dosificación de polielectrolito.....	55

Figura 2. 29. De la planta de tratamiento de aguas aceitosas.	57
Figura 2. 30. Representación de una emulsión de agua en petróleo	58
Figura 2. 31. Partículas cargadas que se repelen unas a otras.	62
Figura 2. 32. Partículas sin carga están libres para chocar y aglomerar.....	63
Figura 2. 33. Dos maneras de visualizar la Doble Capa.	64
Figura 2. 34. Variación de densidad de iones.....	65
Figura 2. 35. Potencial Zeta contra Potencial Superficial.....	66
Figura 2. 36. Efecto de tipo y concentración de electrolitos.	68
Figura 2. 37. Control de Potencial Zeta sobre contenido de Alumbre	68
Figura 2. 38. Centrífuga de tornillo de la planta de tratamiento de efluentes residuales.....	72
Figura 2. 39. Centrífuga tubular.....	76
Figura 2. 40. Esquema de la sección transversal de una centrífuga tubular ..	78
Figura 2. 41. Equipo utilizado para realizar la prueba de jarras.	82
Figura 2. 42. Equipo utilizado para realizar la prueba de jarras.	82
Figura 2. 43. Decantador centrífugo de la planta de tratamiento de aguas aceitosas.....	83

Índice De Tablas

Tabla 3. 1. Pruebas preliminares para el estudio de los polielectrolitos	85
Tabla 3. 2. Diseño bifactorial de dos niveles I	86
Tabla 3. 3. Diseño bifactorial de dos niveles II	86
Tabla 3. 4. Diseño bifactorial de dos niveles III	87
Tabla 3. 5. Promedio de los resultados de las pruebas preliminares	90
Tabla 3. 6. Desviación estándar de los resultados de las pruebas preliminares	91
Tabla 3. 7. Diferencias de las medias de región.	91
Tabla 3. 8. Diferencias de las medias de columna.	91
Tabla 3. 9. Estimación del número de réplicas por ensayo.....	92
Tabla 3. 10. Estimación del número de réplicas por ensayo.....	93
Tabla 3. 11. Número de Unidades Nefelometricas obtenidas a diferentes condiciones de concentración del polielectrolito aniónico y tiempo de agitación.....	94
Tabla 3. 12. Número de Unidades Nefelometricas obtenidas a diferentes condiciones de concentración del polielectrolito catiónico y tiempo de agitación.....	95
Tabla 3. 13. Número de Unidades Nefelometricas (NTU) del efluente clarificado a cierta condición concentración de polielectrolito catiónico y tiempo de agitación, evaluado a 120 RPM.	99
Tabla 3. 14. Número de Unidades Nefelometricas (NTU) del efluente clarificado a cierta condición concentración de polielectrolito catiónico y tiempo de agitación, evaluado a 300 RPM.	100
Tabla 3. 15. Volumen del agua clarificada (mL) con respecto al tiempo de centrifugación a distintas concentración del polielectrolito catiónico, evaluado a 300 RPM.	101
Tabla 3. 16. Determinación de los sólidos suspendidos totales (ppm) en el lodo separado (deshidratado) a 300 rpm.....	102
Tabla 3. 17. Porcentaje de remoción de sólidos a una velocidad de agitación de 120 rpm.....	103
Tabla 3. 18. Porcentaje de remoción de sólidos a una velocidad de agitación de 300 rpm.....	105
Tabla 3. 19. Porcentaje de remoción de sólidos suspendidos con respecto a la concentración del polielectrolito catiónico y el tiempo de agitación.....	110
Tabla 3. 20. Determinación de la primera derivada del Porcentaje de remoción de SST vs. La concentración del polielectrolito catiónico a 5 min de tiempo de agitación; y, optimización de la concentración de polielectrolito catiónico. ..	111
Tabla 3. 21. Determinación de la primera derivada del Porcentaje de remoción de SST vs. La concentración del polielectrolito catiónico a 10 min de tiempo	

de agitación; y, optimización de la concentración de polielectrolito catiónico.	112
Tabla 3. 22. Determinación de la primera derivada del Porcentaje de remoción de SST vs. La concentración del polielectrolito catiónico a 15 min de tiempo de agitación; y, optimización de la concentración de polielectrolito catiónico.	113
Tabla 3. 23. Determinación de la primera derivada del Porcentaje de remoción de SST vs. La concentración del polielectrolito catiónico a 20 min de tiempo de agitación; y, optimización de la concentración de polielectrolito catiónico.....	114
Tabla 3. 24. Determinación de la primera derivada del Porcentaje de remoción de SST vs. La concentración del polielectrolito catiónico a 30 min de tiempo de agitación; y, optimización de la concentración de polielectrolito catiónico.	115
Tabla 3. 25. Determinación de la primera derivada del Porcentaje de remoción de SST vs. La concentración del polielectrolito catiónico a 60 min de tiempo de agitación; y, optimización de la concentración de polielectrolito catiónico.	116
Tabla 3. 26. Determinación de la primera derivada del Porcentaje de remoción de SST vs. La concentración del polielectrolito catiónico a 80 min de tiempo de agitación; y, optimización de la concentración de polielectrolito catiónico.	117
Tabla 3. 27. Determinación de la primera derivada del Porcentaje de remoción de SST vs. La concentración del polielectrolito catiónico a 100 min de tiempo de agitación; y, optimización de la concentración de polielectrolito catiónico.	118
Tabla 3. 28. Resultados del ensayo I en la centrifuga a 150 ppm y 4200 RPM.	120
Tabla 3. 29. Resultados del ensayo II en la centrifuga a 150 ppm y 4200 RPM.	120
Tabla 3. 30. Resultados del ensayo I en la centrifuga a 180 ppm y 4200 RPM.	121
Tabla 3. 31. Resultados del ensayo II en la centrifuga a 180 ppm y 4200 RPM.	121
Tabla 3. 32. Número de unidades nefelometricas obtenidas de acuerdo al desempeño del polielectrolito catiónico a concentración y tiempo de centrifugación variables.....	121
Tabla 3. 33. Porcentaje de remoción obtenido de acuerdo al desempeño del polielectrolito catiónico a concentración y tiempo de centrifugación variables.	122
Tabla 3. 34. Influencia del tiempo y la velocidad de agitación en la compactación de la torta para la prueba de jarras.....	124

Tabla 3. 35. Influencia del tiempo y la velocidad de centrifugación en la compactación de la torta para la centrifuga tipo tornillo.	125
Tabla 3. 36. Influencia del tiempo y la velocidad de centrifugación en la compactación de la torta para la centrifuga tipo tornillo.	125
Tabla 3. 37. Influencia del tiempo y la velocidad de centrifugación en la compactación de la torta para la centrifuga tipo tornillo.	126
Tabla 3. 38. Influencia del tiempo y la velocidad de centrifugación en la compactación de la torta para la centrifuga tipo tornillo.	126
Tabla 3. 39. Comparación del grado de compactación obtenido con ambos polielectrolitos.	127
Tabla 4. 1. Pruebas preliminares para el estudio del Beatzdearborn (Polielectrolito aniónico)	128
Tabla 4. 2. Pruebas preliminares para el estudio del Polyfloc CP 1160 (Polielectrolito catiónico)	128
Tabla 4. 3. Medias muestrales para el tratamiento 1 (Polielectrolito aniónico)	129
Tabla 4. 4. Medias muestrales para el tratamiento 2 (Polielectrolito catiónico)	129
Tabla 4. 5. Desviación estándar muestral para ambos tratamientos.....	129
Tabla 4. 6. Valores del estadístico t.....	131

ANEXOS

- Significado físico de las Unidades Nefelométricas de Turbidez
- Relación entre Turbidez y Sólidos Suspendidos Totales (SST)
- Hoja de seguridad de polielectrolito catiónico
- Hoja de seguridad de polielectrolito aniónico
- Técnica para determinar la concentración óptima por medio de la prueba de Jarras
- Método para determinar la turbidez
- Curvas características para estimar el tamaño de la muestra

Significado físico de las Unidades Nefelométricas de Turbidez

La Unidad Nefelométrica de Turbidez, (UNT) expresada habitualmente con el acrónimo NTU del inglés *Nefelometric Turbidity Unit*, es una unidad utilizada para medir la turbidez de un fluido. Corresponde con una concentración del producto utilizado como patrón llamado Formacina, que es una solución que se puede crear utilizando Sulfato de Hidracina y Hexametilentetraamina en unas proporciones conocidas para formar el patrón de turbidez de 400 NTU.

El instrumento usado para su medida es el nefelómetro o turbidímetro, que mide la intensidad de la luz dispersada a 90 grados cuando un rayo de luz pasa a través de una muestra de agua.

Relación entre Turbidez y Sólidos Suspendidos Totales (SST)

(Brad Melton)

Una medición de la turbidez puede ser usada para proporcionar una estimación de la concentración de TSS (Sólidos Totales en Suspensión), lo que de otra forma es un parámetro tedioso y no fácil de medir.

La Unidad de Turbidez Nefelométrica (UTN) es el término de la medición de la turbidez en una muestra de agua. La turbidez en el agua se refiere a la claridad del agua. Cuanto mayor sea la concentración de Sólidos Suspendidos Totales (SST) en el agua, más oscura parecerá. La conversión de UTN a mg / ml (miligramos por mililitro) es valiosa, porque la UTN estándar es más fácil de medir en el campo.

En general, cuanto mayor es la concentración de SST por mg / ml en una muestra dada de agua, mayor será su turbidez.

Así, mg / ml se refiere a la UTN directamente, donde:

1 UTN equivale a 7,5 mg / L, o 0075 mg / ml, de SiO₂.