

UNIVERSIDAD NACIONAL DE LA AMAZONÍA PERUANA



FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA



TESIS

“DISEÑO DE UNA UNIDAD PILOTO PARA SIMULACIÓN DE TRATAMIENTOS DE AGUAS RESIDUALES OLEOSAS UTILIZANDO EL SOFTWARE HYSYS V3.2 EN LA FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA-UNAP”

PRESENTADO POR LOS BACHILLERES:

BACH. MANUEL VILLACORTA LLERENA

BACH. MABELIZ DEL ROSARIO GUERRA ULLOA

PARA OPTAR EL TÍTULO DE

INGENIERO QUIMICO

ASESOR:

ING. VÍCTOR GARCÍA PÉREZ

IQUITOS-PERU

2016

MIEMBROS DEL JURADO



ING. LAURA ROSA GARCIA PANDURO
CIP: 23792
PRESIDENTE



ING. JORGE ANTONIO SUAREZ RUMICHE
CIP: 60878
MIEMBRO



ING. RAFAEL TRIGOSO VASQUEZ
CIP: 26883
MIEMBRO



ING. VICTOR GARCIA PEREZ
CIP: 33277
ASESOR

DEDICATORIA

Mi tesis se la dedico con mucho amor, cariño y respeto a mis padres que me dieron la vida, el amor incondicional y apoyo en todo momento, gracias por todo mamá y papá por darme la oportunidad de crecer feliz y poder estudiar una carrera la cual considero que es la mejor herencia que me podrían dejar, agradezco tanta paciencia, dedicación, tiempo y esfuerzo que dedicaron a mis hermanos para darnos una buena educación. Los quiero con todo mi corazón y todos mis logros les debo a todo a ustedes. Por ultimo solo me queda decir que no lo hubiera logrado sin ustedes a mi lado apoyándome y aconsejándome siempre eternamente gracias mamá María y papá Abraham.

Manuel Villacorta LLerena

DEDICATORIA

A mis padres a quien les debo todo en la vida, quienes me permitieron elegir la carrera que más me gusta, a mi madre Isabel por apoyarme en cada momento , que dejó a lado su trabajo para poder estar, a nuestro lado para educarnos y así ser personas de bien. Gracias mamá por tus consejos, por el amor que siempre me has brindado. Gracias por ser el ejemplo de perseverancia y constancia que te caracteriza, por la paciencia y el apoyo que me brindaste para culminar mi carrera profesional. Gracias por dame la vida, los amo demasiado. A mi hermana Tatluz y mi cuñado Nicholas porque siempre he contado con ellos para todo gracias por ser mi apoyo y fortaleza. ¡Gracias a ustedes!

Mabeliz del Rosario Guerra Ulloa

ÍNDICE GENERAL

INTRODUCCIÓN.....	4
ANTECEDENTES.....	6
OBJETIVOS.....	8
JUSTIFICACIÓN.....	9
CAPÍTULO I: MARCO TEÓRICO	
1.1 Efluentes Industriales.....	10
1.1.1 Métodos usados en el tratamiento de efluentes industriales en el Perú y el mundo.....	10
1.1.1.1 Métodos químicos.....	10
1.1.1.2 Métodos mecánicos.....	10
1.1.2 Tecnologías disponibles para la planta de tratamiento de efluentes industriales.....	10
1.1.3 Tratamiento para efluentes (agua-aceite).....	11
1.1.3.1 Tratamiento Primario.....	11
1.1.3.2 Tratamiento Secundario.....	12
1.1.3.3 Tratamientos Terciarios o Especiales.....	13
1.1.4 Equipos utilizados para el tratamiento de efluentes (agua-aceite)....	13
1.1.4.1 Equipos primarios de separación.....	13
1.1.4.2 Equipos secundarios de separación.....	16
1.1.4.3 Equipos terciarios de separación.....	24
1.1.5 Evaluación técnico – económico de las tecnologías de tratamiento de efluentes existentes.....	26
1.2 Programa de simulación HYSYS v 3.2	27
1.3 Leyes Fundamentales.....	27
1.3.1 Descripción del proceso de la planta piloto de tratamiento y de los equipos involucrados.....	27
1.3.2 Balance de materia y energía.....	34
1.3.2.1 Ecuaciones básicas para el diseño y dimensionamiento de equipos.....	34
1.3.2.2 Ecuaciones para cálculos hidráulicos de la red de tuberías.....	58
1.4 Marco legal.....	60
CAPÍTULO II: CONDICIONES Y CÁLCULOS DE DISEÑO	
2.1 Condiciones iniciales para el diseño.....	62
2.1.1 Condiciones y caracterización del material a tratar.....	62

2.2 Cálculos efectuados para el diseño.....	64
2.2.1 Balance de materia y energía.....	64
2.2.2 Cálculo hidráulico de la red de tuberías (líneas).....	75
2.2.3 Cálculo para la Inyección de químicos.....	77
2.2.4 Consumo de carga y tensión de los equipos eléctricos.....	78
CAPÍTULO III: DISEÑO Y SIMULACIÓN DE LA UNIDAD	
3.1 Diseño y simulación de la unidad.....	79
3.1.1 Diseño de la unidad.....	79
3.1.2 Diseño de la simulación de la unidad.....	81
3.2 Lista de equipos y líneas	86
3.3 Diagrama de bloques.....	87
3.4 Diagrama de flujo de proceso.....	88
3.5 Diagrama de tuberías (líneas).....	89
3.6 Esquema general para el Tratamiento de Efluentes.....	90
3.7 Servicios industriales.....	91
3.7.1 Aire de servicio.....	91
3.7.2 Inyección de químicos.....	91
3.7.3 Energía eléctrica.....	92
3.8 Disposición adecuada.....	92
3.8.1 Espacio de servicio.....	92
3.8.2 Entorno de instalación.....	92
3.8.3 Cimentación / Fijación.....	92
3.8.4 Conexiones con la unidad.....	92
CAPÍTULO IV: CONDICIONES DE OPERACIÓN	
4.1 Manual de operación.....	93
4.2 Memoria de cálculo.....	95
4.3 Aspectos de seguridad, salud y medio ambiente.....	108
CAPÍTULO V: ANÁLISIS DE COSTO	
5.1 Costo de diseño.....	111
5.2 Otros costos.....	112
5.3 Costo total.....	113
CAPÍTULO VI: RESULTADOS Y DISCUSIONES	
6.1 Resultados.....	114
6.2 Discusiones.....	120
CAPÍTULO VII. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	

Tesis: "Diseño de una unidad piloto para simulación de tratamientos de aguas residuales oleosas utilizando el software HYSYS v3.2 en la Facultad de Ingeniería Química-UNAP"

7.1 Conclusiones.....	121
7.2 Recomendaciones.....	121
VIII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	122
IX. BIBLIOGRFÍA.....	124
X. ANEXOS.....	125
XI. INDICES.....	142

INTRODUCCIÓN

La escasez y mala calidad del agua ponen en peligro la salud, el bienestar social y económico, la seguridad alimentaria y la diversidad biológica. Además, agrava las tensiones y conflictos, tanto dentro como entre las naciones. A la escasez de agua hay que sumar, como problema añadido, su contaminación. La contaminación del agua es uno de los problemas más graves con los que se enfrenta la civilización actual y las principales fuentes resultan ser urbanas, industriales y agrícolas. La escasez y el mal uso del agua constituyen un problema ambiental global al que la comunidad internacional le dedica atención. El agua además es considerada un portador energético, por lo que se priorizan todas aquellas acciones que contribuyan a su uso más ecológico, que incluyen racionalidad y calidad para fomentar el desarrollo sostenible **(Chávez L., 2012)**.

Visto desde una perspectiva mundial existe capacidad inadecuada del tratamiento de las aguas residuales, especialmente en países poco desarrollados, que data de los años 70, debido a la superpoblación, a la crisis del agua y al costo de construir sistemas de tratamiento de aguas residuales. El resultado del tratamiento inadecuado de las aguas residuales trae como consecuencia aumentos significativos de enfermedades prevenibles e importante incremento de la mortalidad, fundamentalmente en países pobres y con limitaciones económicas **(Chávez L., 2012)**.

Las limitaciones económicas y la poca experiencia en esta especialidad no han propiciado un desarrollo acelerado o proporcional a nuestras expectativas sobre Producción Más Limpia (PML) que disminuiría considerablemente la generación de aguas residuales y consecuentemente los impactos negativos al cuerpo receptor **(Chávez L., 2012)**.

Las acciones de PML para ahorrar y dosificar/tratar el agua de uso industrial en el área donde se consume o utiliza, así como su adecuado tratamiento al final del proceso productivo o servicio realizado como agua residual (final del tubo) es muy importante tanto para la salud y preservación de las especies como para que las comunidades alcancen un nivel satisfactorio de desarrollo sostenible, sin poner en riesgo la satisfacción de necesidades y aspiraciones de las generaciones futuras. Es bueno

recordar que **el aumento de la población y de las actividades productivas que usan agua ha generado una mayor demanda por el vital elemento, y ya se registran conflictos por la cantidad y calidad del agua entre diversos usos, tales como abastecimiento de agua potable, riego, hidroelectricidad, uso industrial, recreación, conservación de la vida acuática y terrestre.** Hoy día existe la tendencia a no estudiar los residuales al "final de la tubería", sino emprender un estudio que permita su segregación y minimización e inclusive la obtención de subproductos y recirculación del agua tratada **(Chávez L., 2012).**

Los efluentes industriales son aquellas vertientes provenientes de procesos productivos, es decir, aquellas aguas que han sido utilizadas en los diferentes sistemas de fabricación, producción o manejo industrial, y que para ser desechadas necesitan ser tratadas previamente de manera tal que puedan ser adecuadas para su descarga respectiva a los sistemas naturales como ríos, mares, etc. Tanto por motivos ambientales como por las legislaciones ambientales existentes a nivel nacional e internacional, la implementación de plantas de tratamiento para efluentes es, actualmente, una parte obligatoria en todas las instalaciones industriales que produzcan este tipo de desecho **(Alvarez A., 2009).**

El adecuado tratamiento de aguas residuales industriales y su posterior reutilización para múltiples usos contribuye a un consumo sostenible del agua y a la regeneración ambiental del dominio público hidráulico y marítimo y de sus ecosistemas. Sin olvidar que el agua de calidad es una materia prima crítica para la industria **(Rodríguez A., 2006).**

ANTECEDENTES

Actualmente a nivel mundial la industria está generando residuos contaminantes a partir de sus actividades en la búsqueda, producción, transporte y procesamiento del petróleo. La generación de estos residuos proviene de diferentes fuentes, pueden ser de los fondos de los tanques de almacenamiento en una refinería, en baterías de producción o de un buque carguero. De ciertos derrames por diferentes operaciones, cambio de tubería u operaciones en la etapa de perforación, producción, servicio de pozos y/o transporte, etc. Estos residuos son una mezcla de hidrocarburos, sólidos y agua, que normalmente se presenta como una emulsión difícil de separar. En el mejor de los casos, mediante la decantación estática se necesitaría miles de horas y costosos tratamientos químicos a su vez contaminantes para que la emulsión se separe en sus componentes, pero no en una separación notable sino hasta cierto nivel en el que se encontrará fases de transición, aun así cada una de las fases separadas tendrían trazas de las otras (**Valdez C., 2011**).

Según (**Chavez L., 2012**), **Evaluación del sistema de tratamiento de aguas oleosas residuales**. En su tesis concluye que los resultados de la caracterización del agua residual y de los monitoreos periódicos son imprescindibles en la evaluación del sistema de tratamiento residual, sirviendo para determinar que sus parámetros críticos son HC y SST. De la relación concentración de contaminantes-equipos fregados/actividad/mantenimiento (antes de instalar filtro) puede concluirse que las concentraciones de DQO, DBO y SST son directamente proporcionales al tamaño de los equipos que se friegan, así como las grasas y aceites son mayores cuando se friegan equipos de remolque con carga de combustibles, fundamentalmente de productos negros. El tipo de equipo y su capacidad/tamaño tiene probada influencia en la carga contaminante, por el gasto o consumo de agua que generan tanto el fregado como las pruebas tecnológicas que se les realizan y consecuentemente el flujo de aguas residuales producidas.

Según (**Valdez C., 2011**), **Tratamiento físico-químico de residuos oleosos**. En su tesis concluye que el uso de Esta tecnología es un sistema de separación efectivo que garantiza una recuperación de crudo más allá del 99% tanto en los residuos fluidos ("slop oil") como sólidos (Borras). Ofrece una alta relación costo/capacidad de proceso

Tesis: "Diseño de una unidad piloto para simulación de tratamientos de aguas residuales oleosas utilizando el software HYSYS v3.2 en la Facultad de Ingeniería Química-UNAP"

debido a la alta eficiencia y capacidad de separación, flexibilidad en la calidad de alimentación, alta calidad en los efluentes de agua y sólidos.

Según **(Espinoza J., 2009), Tratamiento y disposición final de residuos industriales generados en una Refinería**. En su artículo concluye que es posible utilizar borra y lodos petrolizados, previamente acondicionados, en uso como combustible industrial (en hornos de ladrilleras, por ejemplo) o en uso como asfalto en caminos o carreteras; asimismo, que la aplicación de una sola de las tecnologías de tratamiento no es suficiente para tratar completamente los desechos provenientes de una refinería; y que la alternativa seleccionada dependerá de un análisis técnico económico y ambiental.

Según **(Carrasco M. Y Ore J., 2008), Tratamiento de las borras ácidas producidas en la manufactura de las bases lubricantes del tipo L.C.T. en la Refinería Talara Perú**. En su artículo concluye el método óptimo desde el punto de vista ambiental para el tratamiento de las Borrás Ácidas es "Extracción del Ácido" se eliminan los rellenos industriales que estas implicaban. Con el método de Extracción del Ácido se puede realizar la remoción del ácido sulfúrico residual de las Borrás Ácidas y con la Borra Neutra obtenida en el tratamiento realizar mezclas con Bases Asfálticas.

Según **(Espinoza I., 2006), Construcción de un prototipo para el tratamiento de lodos de aceite de una Central Termoeléctrica (Elecaustro)**. En su tesis concluye que el método convencional de filtro-prensa es el adecuado para el tratamiento de lodos de aceite lubricante ya que la producción de ésta masa en el día sería de 4 tortas con un peso de 5.36 Kg. cada una; se tiene que por año la masa total de sólidos sería de 7718.4 Kg. recolectados en 1440 paquetes; diariamente se tienen que por cuatro limpiezas se obtienen 72.672 litros; mensualmente se obtendrían 2180.16 litros y finalmente el volumen de agua estimada anualmente sería de 26161.92 litros.

En la facultad de Ingeniería Química de la UNAP, no hay antecedentes de diseño de unidad para el tratamiento de aguas residuales oleosas.

OBJETIVOS

GENERAL

- Diseñar una unidad piloto para simulación de tratamientos de aguas residuales oleosas utilizando el software HYSYS v3.2.

ESPECÍFICOS.

- Determinar las condiciones y cálculos de diseño.
- Determinar y optimizar los parámetros de operación de la unidad.
- Evaluar la unidad estableciendo y determinando las condiciones óptimas de funcionamiento mediante el software HYSYS v3.2.

JUSTIFICACIÓN

En el desarrollo de una región es indispensable la inversión en proyectos que estén íntegramente relacionados con el cumplimiento de políticas ambientales, la capacidad de los gobernantes o inversionistas que tengan una visión clara y con propósitos de desarrollar y engrandecer nuestra región industrialmente sería un paso muy acertado porque generaría fuentes de trabajo, desarrollo, entre otras cosas más.

En la región Loreto existen empresas importantes como Refinería Iquitos – OPS Petroperú, Electro Oriente S.A., entre otras empresas de menor magnitud y tamaño dentro del mercado. Es importante recalcar que Electro Oriente S.A. invierte en compras de combustibles como el residual 6, gasolinas y aceites lubricantes de los motores de generación; del mismo modo Refinería Iquitos tiene tanques donde almacenan combustibles, para comercializar y para uso propio; los cuales generan miles de toneladas de residuos peligrosos como aguas residuales oleosas, lodos y borras, que hasta ahora significa millones de soles para que sean dispuestos en rellenos de seguridad en la ciudad de Lima y no le dan un tratamiento para recuperar algo de estos residuos para que sean reutilizados.

La Refinería Iquitos cuenta con una poza API-CPI, el cual es una poza de tratamiento para los residuos de combustible de la Planta de Operación; en Electro Oriente existe un recuperador de residual que hasta la fecha está en desuso y no cuenta con condiciones óptimas para su manejo. Estas dos empresas tienen un problema muy importante que es darle un tratamiento adecuado a las aguas oleosas, borras y lodos petrolizados que son vertidos muchas veces en los ríos y destinados pocas veces a rellenos de seguridad, lo cual causa impacto negativo a seres vivos acuáticos y al ambiente y por lo tanto gastan millones de soles en todo este proceso.

La necesidad de contar con una unidad piloto para el tratamiento de aguas oleosas, lodos y borras petrolíferos en la Región, es de gran importancia, ya que haciendo una evaluación de mercado simple, es propicio para generar fuentes de trabajo y mitigar en gran parte un problema latente que hay por el transporte de estos residuos por vía terrestre y fluvial.

CAPÍTULO I: MARCO TEÓRICO

1.1 Efluentes Industriales

Los desechos o residuos líquidos producidos por las industrias son denominados efluentes. La gama de efluentes industriales es muy amplia, su composición varía según el tipo de actividad que lo genera y no es constante para cada caso específico resulta necesario estudiar primero el efluente para poder proyectar un tratamiento eficiente y económico. En los efluentes de la industria petrolera (agua de producción) se hallan dos tipos de emulsiones, una emulsión de aceite en agua (agua aceitosa), es aquella donde el aceite está disperso en la fase acuosa y la emulsión agua en aceite se refiere al agua dispersa en el aceite.

1.1.1 Métodos usados en el tratamiento de efluentes industriales.

1.1.1.1 Métodos químicos: Consisten en dosificar productos surfactantes en puntos ubicados estratégicamente de acuerdo a las características del efluente, la tasa de producción o los requerimientos de calidad e infraestructura del sistema. Con los productos químicos se logra que las partículas de crudo presentes en forma de emulsión se aglomeren formando flóculos de petróleo que suben a la superficie originando una capa continua (nata) de crudo, la cual puede separarse del agua.

1.1.1.2 Métodos mecánicos: Una vez formada la capa continua de crudo en la superficie del agua se separa por métodos mecánicos, para lo cual se hace pasar por dispositivos de diferentes diseños que facilitan y aceleran su recolección. Generalmente estos métodos químicos y mecánicos se combinan para lograr con éxito un buen tratamiento.

1.1.2 Tecnologías disponibles para el tratamiento de efluentes industriales.

Las tecnologías aplicables al tratamiento de efluentes industriales varían ampliamente de acuerdo a las características del mismo, y al nivel de purificación que se desea lograr de acuerdo a las legislaciones ambientales aplicables. En la tabla 1.1 se presentan las diferentes alternativas de tratamiento de acuerdo a las impurezas que se desea eliminar.

Tabla 1.1 Procesos de tratamiento usados para remover los contaminantes principales encontrados en efluentes industriales.

Contaminante	Proceso de Tratamiento	Contaminante	Proceso de Tratamiento
Sólidos suspendidos	Debaste, sedimentación, separación agua-aceite, filtración, flotación con aire, adición de polímeros, coagulación/sedimentación.	Nitrógeno	Nitrificación y desnitrificación en crecimiento suspendido, nitrificación y desnitrificación en capa fija, despojo de amoníaco, intercambio iónico, cloración.
Sustancias orgánicas biodegradables	Lodos activados, filtros percoladores, biodiscos, lagunas de estabilización, filtración con arena, sistemas físico-químicos.	Fósforo	Adición de sales de metales, coagulación con cal/sedimentación, tratamiento biológico.
Sustancias orgánicas volátiles	Adsorción en carbón activado, despojo de gases	Metales pesados	Precipitación química, intercambio iónico.
Agentes patógenos	Cloración, tratamiento con bromo y cloro, ozonificación, radiación ultravioleta.	Sólidos orgánicos disueltos	Intercambio iónico, ósmosis inversa, electrodiálisis.

Para el diseño de una planta de tratamiento de efluentes industriales es importante también incluir tecnologías para el tratamiento y manejo de desechos sólidos, ya que durante el tratamiento de efluentes se generará una cantidad de lodos que deben ser tratados y dispuestos correctamente según las legislaciones ambientales.

1.1.3 Tratamiento para efluentes (agua-aceite)

Los sistemas de alta remoción de aceites son requeridos para recuperar la máxima cantidad de hidrocarburos para el tratamiento de aguas aceitosas, así como para hacer el efluente más apto para su posterior tratamiento y también para cumplir los requerimientos ambientales de control de la contaminación.

Según Thanh (2002), las principales tecnologías empleadas para el tratamiento de aguas aceitosas producidas en plantas petroquímicas, petroleras y químicas son divididas en tres categorías:

1.1.3.1 Tratamiento Primario

Incluye: separadores API, separadores de platos corrugados CPI, separadores de pared paralelos, entre otros; estos tratamientos separan el aceite contenido en el agua mediante fuerzas gravitacionales, sin embargo, estas tecnologías no tienen la

capacidad de separar la fracción soluble de aceite y romper emulsiones de aceite en el agua. Los tratamientos secundarios y terciarios han sido desarrollados con el objeto de remover dicha fracción soluble de aceite en el agua a ser tratada, en la siguiente figura se muestra las distintas tecnologías disponibles para el tratamiento de aguas aceitosas producidas en plantas petroquímicas, petroleras y químicas.

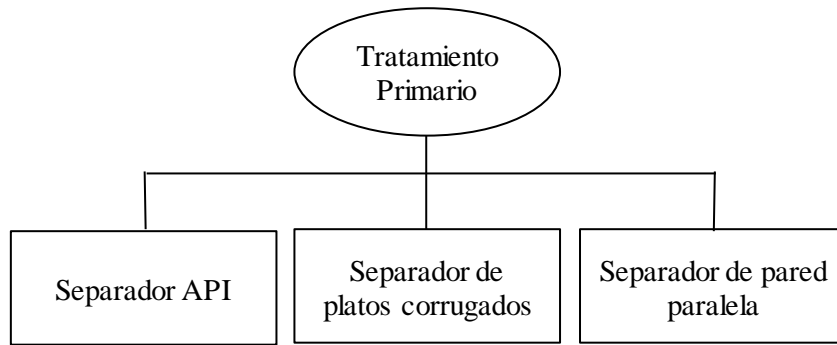


Fig. 1.1 Tratamiento primario para aguas aceitosas producidas en plantas petroquímicas, petroleras y químicas (Thanh, 2002).

1.1.3.2 Tratamiento Secundario

Consta de equipos de filtración, coalescencia y de flotación, los cuales se basan en una separación por gravedad mejorada y diferencias de concentraciones entre el agua, aceite y las partículas sólidas. En algunos casos se utilizan burbujas de aire, ya que proveen la flotabilidad necesaria para separar el aceite y las partículas sólidas suspendidas en el agua (Koytsoykos, 2009).

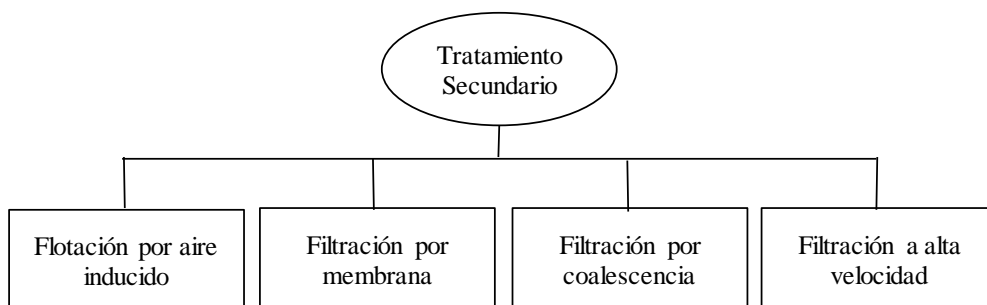


Fig. 1.2 Tratamiento secundario para aguas aceitosas producidas en plantas petroquímicas, petroleras y químicas (Thanh, 2002).

1.1.3.3 Tratamientos Terciarios o Especiales

En algunos casos, es necesario remover de los efluentes algunas sustancias o compuestos en particular, ácidos o sales, para lo cual se aplican tratamientos especiales que dependen del tipo de contaminante que se desee eliminar, entre estos tratamientos se tienen: procesos de adsorción, ozonización, desalinización, extracción por solventes, intercambio de iones, entre otros.

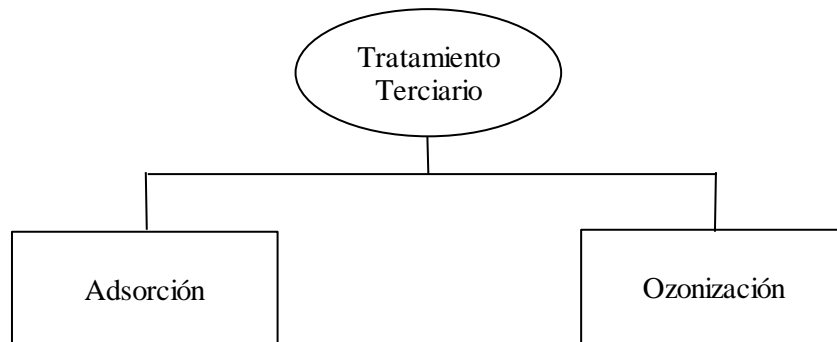


Fig. 1.3 Tratamiento terciario para aguas aceitosas producidas en plantas petroquímicas, petroleras y químicas (Thanh, 2002).

1.1.4 Equipos utilizados para el tratamiento de efluentes (agua-aceite)

1.1.4.1 Equipos primarios de separación.

Dentro de esta categoría, los dos separadores más utilizados son: el separador API (American Petroleum Institute) y el separador de placas corrugadas CPI (Corrugated Plate Interceptor).

a. Separadores API.

El separador API es un equipo de separación por gravedad, basado en la Ley de Stoke para definir el incremento en la velocidad de gotas de aceite por sus densidades y tamaño. El diseño del separador está basado en la diferencia de gravedad específica entre el aceite y el agua a ser tratada porque esa diferencia es mucho menor que la

diferencia de gravedad específica entre los sólidos suspendidos y el agua. Basándose en los criterios de diseño, la mayoría de los sólidos suspendidos se sedimentarán en el fondo del separador como una capa de sedimentos, el aceite ascenderá al tope del separador y el agua de desecho será la capa intermedia entre el aceite del tope y los sólidos del fondo (Beychok, 1967).

Según Rhee (1987), "Cuando el aceite libre o disperso en agua es sometido a un proceso de coalescencia por un tiempo suficiente, las gotas de aceite se separarán eventualmente del agua formando una capa de aceite flotante que debe ser desnatada".

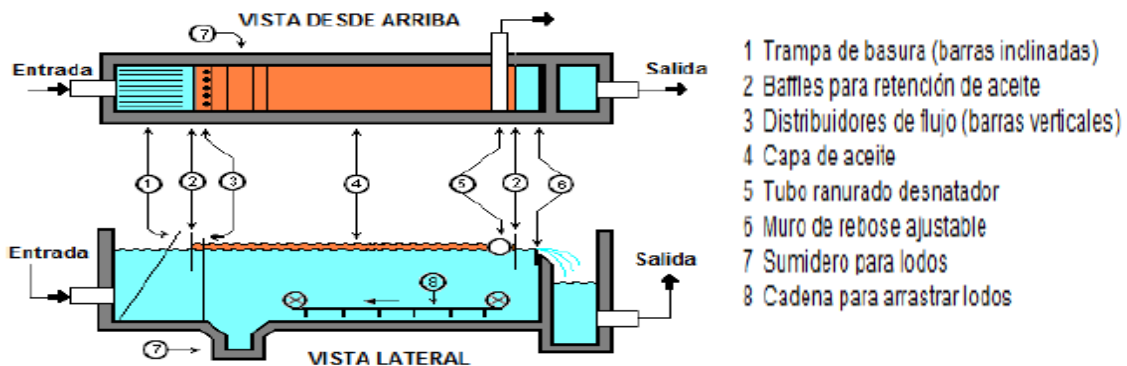


Fig. 1.4 Diagrama esquemático de un sistema de separación API (API, 1997)

Las ventajas de este separador son:

- La principal ventaja del separador API es que su gran volumen puede interceptar a las grandes masas de aceite libre y sólidos. Este factor ayuda a mejorar el rendimiento de las etapas aguas abajo del proceso de tratamiento de aguas aceitosas.
- Operación sencilla.
- Fácil mantenimiento respecto al separador CPI, ya que no se taponan por no tener componentes internos (platos).

En cuanto a las desventajas, se tiene que:

- Tienen limitada eficiencia para diámetros de glóbulos de aceite inferior a 0,015 cm.
- Ocupan grandes espacios.
- Presenta problemas para el manejo de vapores y olores.

- Se requiere como mínimo dos unidades para facilitar las operaciones de limpieza sin afectar la operación de la planta.

b. Separadores de platos corrugados.

Los separadores CPI (Interceptor de Placas Corrugadas) se utilizan principalmente en la separación de aceite libre de aguas residuales o sólidos suspendidos para el tratamiento de las aguas aceitosas.

El principio básico de la diferencia de gravedad entre fases (líquido-líquido o sólido-líquido) es empleado en el tratamiento de aguas aceitosas debido a la separación de las dos fases. Este fenómeno se define como la separación por gravedad; por tanto, es evidente que la fase de alta densidad se asentará y en la superficie flotadora el fluido de baja densidad (<http://www.plateseparator.com/>).

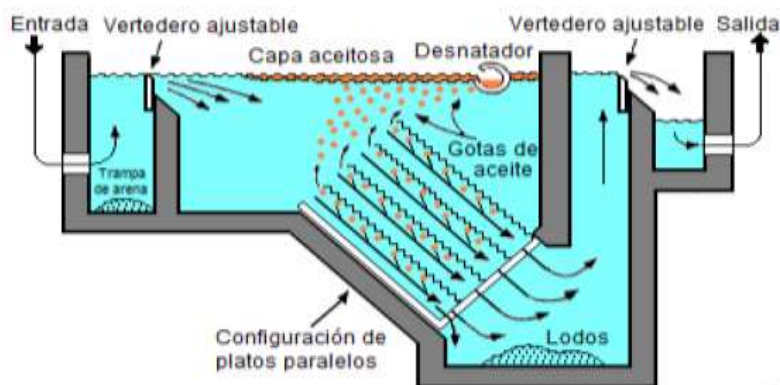


Fig. 1.5 Diagrama esquemático de un sistema de separación de Platos Corrugados (CPI). (API, 1997)

Un separador de placas corrugadas está formado de láminas de cartón corrugado especialmente diseñado para colocarse en contracorriente al flujo, es decir, los caudales de efluentes hacia abajo mientras que el aceite fluye hacia arriba a la superficie.

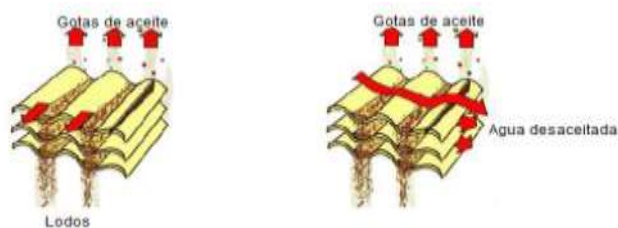


Fig. 1.6 Diagrama de paquetes de platos corrugados (Koytsoykos, 2009).

Las ventajas de los separadores de placas corrugadas son:

- Las ventajas son una pequeña superficie y el aumento de la eficiencia ya que puede eliminar pequeñas gotitas de aceite.
- Tiene excelente desempeño en aguas a altas temperaturas y en aguas de producción, especialmente para caudales bajos.
- Unidades compactas con respecto a los separadores API.
- Las placas paralelas por lo general se fabrican de un material plástico que elimina los problemas de corrosión.
- El desplazamiento ascendente del aceite y descendente del lodo a través de las placas contribuye a reducir los problemas de levantamiento y resuspensión debido al flujo del agua.
- Favorece la coalescencia.
- Equipo sencillo de operar.

En cuanto a las desventajas se tiene que:

- Eficiencia limitada para tamaño de glóbulo inferior a 0,006 cm.
- Requieren de una mayor frecuencia de limpieza al año por problemas de taponamiento, lo que se traduce en mayores costos de mantenimiento.
- Dificultad de limpieza de las placas para ciertas profundidades.
- Se requiere como mínimo de dos unidades para facilitar las labores de limpieza.
- Presenta problemas para manejar efluentes con alto contenido de hidrocarburos.

1.1.4.2 Equipos Secundarios de separación.

Consta de equipos de filtración, coalescencia y de flotación, los cuales se basan en una separación por gravedad mejorada y diferencias de concentraciones entre el agua, aceite y las partículas sólidas. En algunos se utilizan burbujas de aire, ya que proveen la flotabilidad necesaria para separar el aceite y las partículas sólidas suspendidas en el agua (Koytsoykos, 2009).

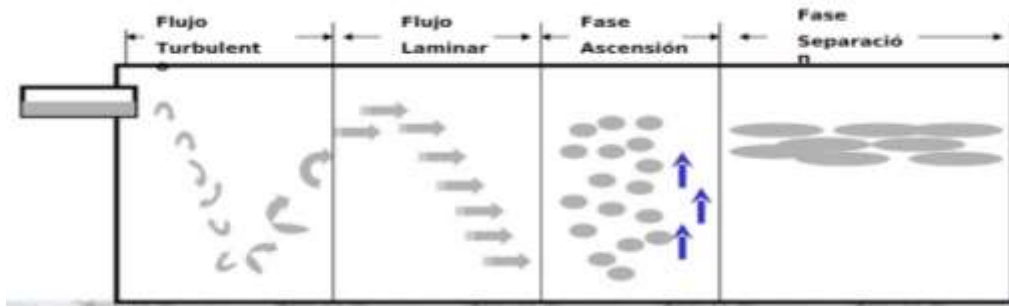


Fig. 1.7 Remoción de aceite libre contenido en agua.

a. Flotación por aire disuelto (DAF)

La flotación es otro tipo de tratamiento secundario que consiste en el proceso de separación de aceites emulsionados y sólidos presentes en el efluente por medio de burbujas de aire que aceleran el ascenso de los mismos. Estas burbujas se adhieren a las partículas en suspensión y producen una disminución de la densidad aparente del conjunto burbuja-partícula hasta que la misma se vuelve menor que la del agua. La diferencia de densidades origina un impulso ascendente que hace que las partículas se acumulen en la superficie.

El sistema DAF utiliza agua presurizada y sobresaturada con aire para producir burbujas de 30 a 60 μm de diámetro, las cuales aparecen en el momento en el que el efluente entra al tanque de flotación y se despresuriza. Por lo general, esta tecnología puede ser aplicada en tres configuraciones: presurización total, presurización parcial y reciclo presurizado, siendo esta última la configuración preferida para el 80% de los sistemas de tratamiento de efluentes de refinerías.

A fin de manejar el proceso se hace uso de sustancias químicas, tales como coagulantes y floculantes, que se adicionan previamente. Estas sustancias se dividen en tres grandes grupos: compuestos químicos inorgánicos (cloruro de aluminio, sulfato de aluminio, sulfato ferroso, sílice), polímeros naturales (almidón, guar, taninos y sustancias proteicas) y polímeros sintéticos (polielectrolitos).

Los principales equipos involucrados en un sistema DAF son:

- El tanque de flotación, el cual está equipado con pantallas internas y desnatadores para remover los desechos flotantes.

- El sistema de reciclo conformado por: bomba de reciclo, el compresor para el aire, y el tanque de presurización donde se satura la corriente de aire.
- Tanque de floculación y dispositivos de mezclado rápido para la agitación del coagulante.

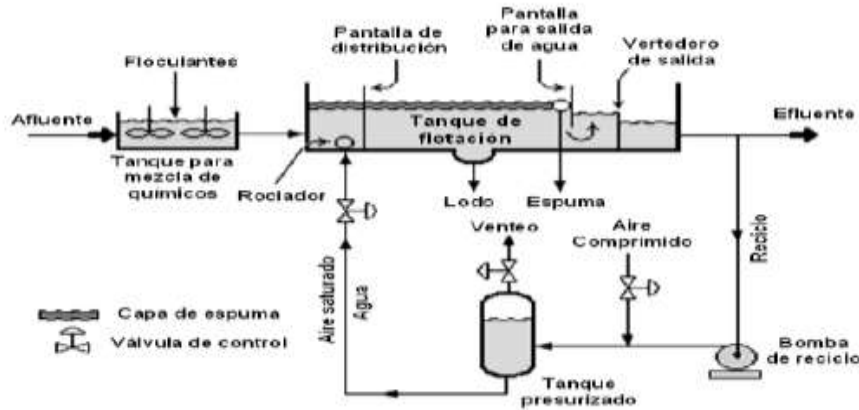


Figura 1.8 Diagrama de un sistema DAF con reciclo presurizado.

Entre las ventajas que ofrece esta tecnología están:

- Remueve partículas con densidad mayor que la del agua.
- Puede trabajar tanto con gas como con aire.
- Las fluctuaciones hidráulicas pueden ser compensadas fácilmente por manipulación de la operación.
- El tamaño de burbuja de aire formada permite mayores eficiencias para determinados efluentes.

En cuanto a las desventajas se tiene que:

- Requiere del uso de sustancias químicas.
- Requerimientos de equipos mecánicos (bombas, compresores), lo que implica mayor mantenimiento y costos operativos.

b. Coagulación / floculación / sedimentación

La coagulación y floculación son dos procesos que pueden resumirse como una etapa cuyo objetivo es propiciar el aglutinamiento de las partículas en pequeñas masas llamadas flóculos, de manera que su peso específico sea mayor que el del agua y puedan precipitar. Por lo general, se utiliza como un paso acoplado a otra tecnología, como es el caso de sistemas DAF, centrifugación, sedimentación, entre otros.

La sedimentación se puede separar en tres clasificaciones: discreta, floculenta y por zona. En la sedimentación discreta, las partículas mantienen su individualidad y no ocurren cambios de tamaño, forma o densidad durante dicho período. La sedimentación floculenta ocurre cuando las partículas se aglomeran durante el período de retención resultando un cambio en el tamaño de las partículas. La sedimentación por zona involucra una suspensión de flóculos que forman una estructura reticular que se deposita en el fondo como fuese una única unidad de masa, demostrando una interface visible a medida que se mueve hacia el fondo el tanque.

Los sedimentadores, también llamados clarificadores, pueden ser diseñados con sección cilíndrica o rectangular. En las Figuras 9 y 10 se muestran los diagramas para cada uno de ellos.

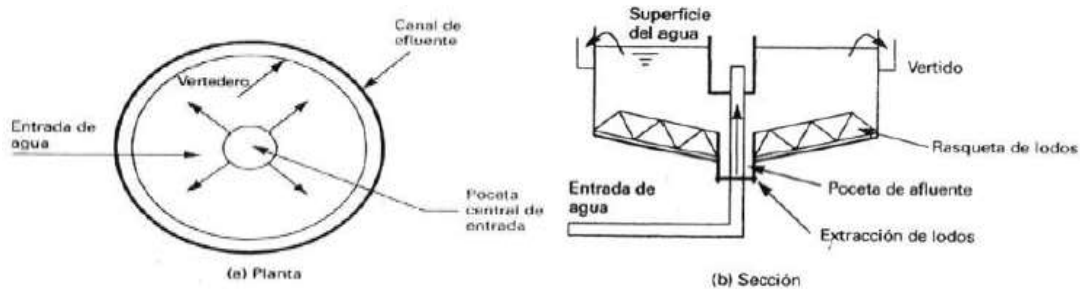


Figura 1.9 Sedimentador de sección cilíndrica

El uso de floculantes y coagulantes en conjunto con la sedimentación tiene como ventajas:

- Remueve partículas con densidad mayor que la del agua.
- Remueve aceite emulsionado
- Bajos consumos de energía
- Mayor flexibilidad del sistema ante cambios bruscos de calidad y volumen.
- Altas eficiencias de remoción.

En cuanto a las desventajas se tiene que:

- Requiere del uso de sustancias químicas
- Ocupa mayor área que otros sistemas

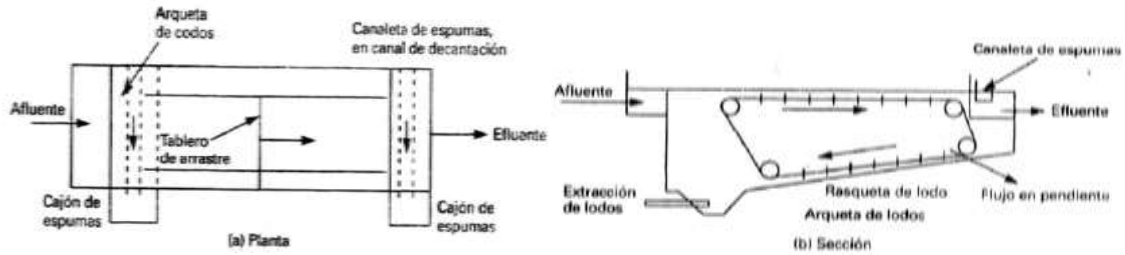


Figura 1.10 Sedimentador de sección rectangular.

c. Aeración

La aeración es un proceso mecánico que provee un contacto íntimo entre el aire y el agua, permitiendo la transferencia de las moléculas gaseosas provenientes del aire, principalmente el oxígeno, a la fase acuosa conformada por el efluente. El uso de la aeración varía ya que la misma puede ser utilizada para varios fines, entre los cuales están:

- Aumentar el contenido de oxígeno disuelto en el agua para cumplir con los estándares de descarga.
- Proporcionar el oxígeno necesario para llevar a cabo tratamientos biológicos.
- Mantener condiciones de mezcla perfecta.
- Remoción de gases indeseables como CO_2 y metano (CH_4), también llamado desgasificación.
- Oxidación de impurezas inorgánicas como hierro, manganeso y sulfuro de hidrógeno.
- Oxidación de la materia orgánica.

c.1 Difusores

En este tipo de aeración, el aire es forzado a través de un difusor el cual libera pequeñas burbujas cerca del fondo del tanque, estableciendo un buen contacto entre el oxígeno y el agua. Básicamente existen dos tipos: los porosos que producen diminutas burbujas al hacer pasar el aire por una membrana o un medio poroso; y los no porosos que generan burbujas de mayor tamaño a partir de fuerzas hidráulicas cortantes o de orificios en tuberías y platos perforados.

c.2 Turbinas

Este tipo de unidades dispersan el aire comprimido a través de la acción del bombeo y de las fuerzas cortantes que generan. Debido a que el mezclado es independientemente controlado por la potencia de la turbina, no existen limitaciones en cuanto a la geometría del tanque. Normalmente se colocan pantallas del tanque de aeración para eliminar los vórtices y remolinos.

c.3 Aeradores superficiales

Mientras que los aeradores sumergidos (difusores) ponen en contacto al aire con el agua; los aeradores de superficie funcionan de manera contraria, poniendo en contacto el agua con la atmósfera. Su funcionamiento general consiste en elevar grandes volúmenes de agua por encima de la superficie, exponiendo pequeñas gotas del líquido a la atmósfera. Este tipo de aerador puede venir en forma de tubos generadores de corrientes, platos o hélices, los cuales se ubican en la superficie del líquido en el tanque o justo debajo de ella.

El uso de sistemas de aeración tiene como ventaja:

- Permite eliminar malos olores y despojar gases indeseados.
- Al mismo tiempo, se puede oxidar tanto materia orgánica como inorgánica.
- Sirve para elevar el contenido de oxígeno disuelto en el agua a valores exigidos por la norma.

En cuanto a las desventajas se tiene que:

- Requiere de espacio físico considerable.
- En el caso de los difusores, es necesario limpiezas frecuentes para evitar taponamientos en el sistema.
- Por lo general, se requieren largos tiempos de retención, los cuales varían de acuerdo con la eficiencia del aerador y las condiciones del afluente y el tratamiento específico que se aplique.

d. Cloración

Uno de los tratamientos terciarios más comunes es la desinfección, la cual involucra la destrucción selectiva de los microorganismos patógenos. La desinfección de efluentes antes de la descarga final asegura que las bacterias, virus y otros sean reducidos a niveles aceptables.

Existen muchas formas de lograr esto: agentes químicos, agentes físicos, medios mecánicos y radiación sin embargo, el más común de todos es la cloración.

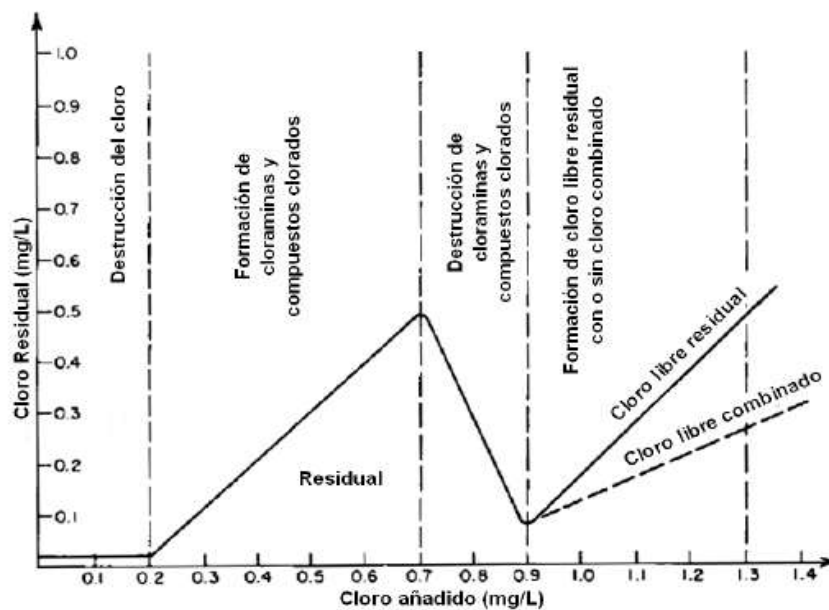


Figura 1.11 Punto de quiebre de la cloración

La efectividad de la desinfección por cloración es una función del pH, la temperatura y el tiempo de contacto, donde este último, en conjunto con la dosis aplicada de cloro, es de suma importancia para la eliminación de virus.

La dosis de cloro necesaria para el tratamiento del efluente es determinada a través de pruebas de laboratorio realizadas previamente al agua que se desea tratar. Antes de realizar estas pruebas se debe conocer la concentración de cloro residual permitida por las legislaciones ambientales aplicables al proyecto.

Los usos del cloro, sus diferentes presentaciones y modos de inyección se presentan en la Figura 1.12, mostrada a continuación.

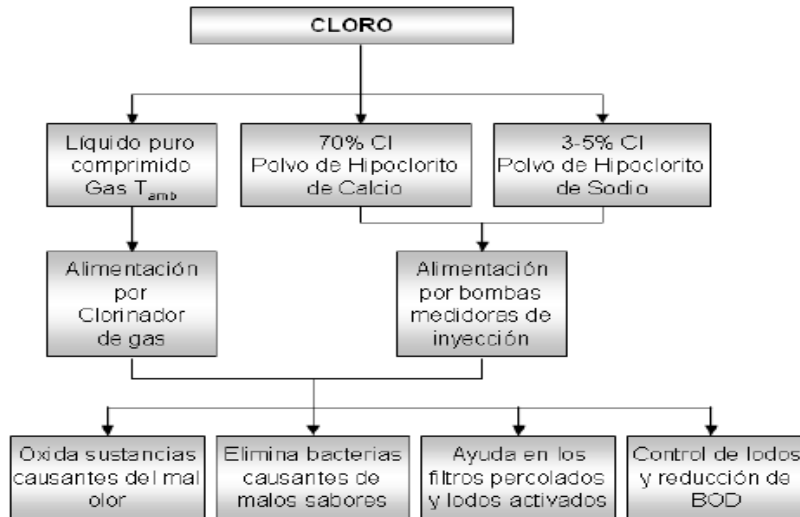


Figura 1.12 Usos del cloro

El uso de sistemas de cloración tiene como ventajas:

- Permite eliminar malos olores y sabores del efluente.
- Elimina o reduce considerablemente la concentración de organismos patógenos.
- En ciertos casos, puede ser utilizado para reducir la DBO.
- Es más económico que otros métodos de desinfección disponibles como el ozono y la radiación ultravioleta.

En cuanto a las desventajas se tiene que:

- Requiere equipos de control estrictos que monitoreen constantemente las condiciones del efluente para asegurar que la dosis de cloro sea la adecuada.
- El sistema completo requiere el uso de varios equipos como: unidades de bombeo, tanques de contacto, sistemas de inyección de cloro, tanques de almacenamiento de químicos, agitadores, entre otros.
- Puede presentar problemas de corrosión, debido a que el cloro es un fuerte oxidante.
- En presencia de luz solar y materia orgánica presente en el agua, genera compuesto conocidos como halometanos, los cuales son perjudiciales para el ambiente.

1.1.4.3 Equipos Terciarios de separación.

a. Adsorción

El proceso de adsorción es normalmente usado como un tratamiento terciario para la remoción de trazas de aceites y emulsificante. Entre los absorbentes comunes se encuentra materiales a base de sílica, polímeros orgánicos, bentonita, carbón activado, entre otros (Thanh, 2002).

El carbón activado es de especial interés debido a su capacidad de adsorción, ya que posee una gran área de superficie. Las propiedades de la superficie de carbón activado dependerán tanto del material inicial utilizado para producir el carbón como del procedimiento exacto de producción (Metcalf y Eddy, 1991). Generalmente, el carbón granular de carbón bituminoso tiene un tamaño de poro pequeño, gran área de superficie y la más alta densidad aparente. Lignito de carbón tiene el mayor tamaño de poro, área de superficie y al menos la más baja densidad aparente (Eckenfelder, 2000).

La capacidad del carbón activado para adsorber los contaminantes se encuentra en función tanto de las características y la concentración de los contaminantes como de la temperatura (Thanh, 2002).

b. Ozonización.

El ozono es un oxidante potente, segundo en lugar respecto al radical libre de hidroxil, entre los químicos usados frecuentemente para el tratamiento de agua. De esta forma, es capaz de oxidar gran cantidad de compuestos orgánicos e inorgánicos contenidos en el agua, estas reacciones producen un consumo de ozono en el agua tratada, la cual debe ser suministrada durante la ozonización hasta alcanzar un nivel residual de ozono medible.

El ozono es escasamente soluble en el agua, a 20°C la solubilidad es de 570 mg/L (Kinman, 1975).

El ozono se descompone espontáneamente durante el tratamiento de agua por un mecanismo complejo que envuelve la generación de radicales libres hidroxilo.

El ozono reacciona en el agua mediante dos mecanismos:

- Oxidación directa de compuestos por ozono molecular.
- Oxidación de compuestos por radicales libres OH producido durante la descomposición del ozono.

1.1.5 Evaluación técnico económico de las tecnologías de tratamiento de efluentes existentes.

Tabla 1.2 Equipos utilizados para la separación de grasa y aceite.

	TECNOLOGÍA SEPARACIÓN AGUA-ACETE POR GRAVEDAD			SEPARACIÓN POR FLOTACIÓN		ELECTRO COAGULACIÓN, ELECTRO FLOCULACIÓN Y ELECTRO FLOTACIÓN	TECNOLOGÍA SEPARACIÓN POR FILTRACIÓN	REMOCIÓN DE GRASAS Y ACEITES CON ULTRAFILTRACIÓN	TRATAMIENTO BIOLÓGICO DE GRASAS Y ACEITES
	SEPARACIÓN API	SEPARADORES DE PLACAS	TANQUES DESNATADORES	SEPARACIÓN POR FLOTACIÓN CON AIRE DISUELTO-DAF	SEPARADORES POR FLOTACIÓN CON AIRE INDUCIDO-IAF				
COSTOS	Costo inicial alto. Costo de mantenimiento bajo.	Costo inicial	Costo inicial muy alto. Costo de mantenimiento bajo.	Costo de mantenimiento más bajo que el IAF. El costo de inversión es aproximadamente dos veces el costo del IAF.	Costo de Mantenimiento alto. Costo de inversión bajo.	Los costos de inversión inicial son altos al igual que los costos de operación.	Los filtros lentos son de bajo costo. Costos de mantenimiento son bajos.	Se requiere de una inversión inicial más grande que los procesos físicos y/o químicos. Costos bajos por mantenimiento. Costo de operación, la disposición final y almacenamiento de residuos pueden hacer de esta una inversión muy interesante	Bajo costo inicial.
ANÁLISIS VIABILIDAD	Aplicación en grandes instalaciones, refinerías y petroquímicas		Aplicación en grandes instalaciones, refinerías y petroquímicas, etc.	En el campo de producción del caso de estudio tiene aplicación en cuanto permite la recuperación de crudo y disminución del área de intervención con menores costos de operación que el IAF	En el campo de producción del caso de estudio tiene aplicación en cuanto permite la recuperación de crudo y disminución del área de intervención pero tiene mayores costos de operación que el DAF por lo cual se puede descartar.	En el campo de producción del caso de estudio podría aplicarse para reducir los residuos correspondientes a las canecas de 55 galones en que se entrega, así como su gestión para su devolución al proveedor. También se permite disminuir aún más el área de intervención del sistema de tratamiento disminuyendo el riesgo de contaminación al suelo y al agua.	En el campo solo se puede usar una vez se haya separado las grasas y aceites emulsificados retirados por coagulación, floculación y sedimentación, de tal forma que sirva de acción de pulimento separando las grasas y aceites solubles.	No se justifica usarlo en el campo hasta que efectivamente no se logre obtener un afluente de mejor calidad de tal forma que el agua pueda ser vendida, con el fin de que se recupere la inversión.	Los sistemas de lodos activados tienen un requerimiento de área grande lo cual contribuiría en aumentar el área de intervención del sistema lo cual no es deseable. El tratamiento con el producto NONTOX puede ser mejor usado para la eliminación de grasas y aceites solubles de tal manera que no utilicen grandes cantidades de esta forma reemplazando a los filtros.

Fuente: Ibid. P. 18, 22, 23, 27, 29, 30, 31

1.2 Programa de Simulación HYSYS 3.2

HYSYS es un programa de simulación de procesos completamente interactivo desarrollado por la empresa HYPROTECH. Es un software de procesos que condensa toda la información necesaria para realizar los cálculos flash y propiedades físicas, lo cual permite definir toda la información pertinente (paquete de propiedades: componentes, reacciones químicas, entre otros). Considera simular cada unidad del proceso en forma independiente pero teniendo en cuenta el funcionamiento de todos ellos como un conjunto, también nos permite descomponer un proceso complejo en procesos menores con componentes más concisos y usar paquetes termodinámicos independientes.

1.3 Leyes Fundamentales

1.3.1 Descripción del proceso de la planta piloto de tratamiento y de los equipos involucrados

Para el proceso se tomó datos de diferentes empresas (Petroperú, Electro Oriente y Orvisa) de los cuales se escogió como referencia datos de la empresa Petroperú para iniciar el proceso.

A.1. Separador API

El proceso comienza con el almacenamiento de los efluentes líquidos oleosos en el tanque de mezcla agua/aceite, luego se conduce a separador API donde se separan las grasas y aceites, consiste en la eliminación del agua residual de este tipo de contaminantes siempre que se cumplan las siguientes **condiciones**:

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

Generalmente el punto de corte se fija en $150 \cdot 10^{-6}$ m, valor adoptado en este proyecto.

El tipo de separadores consiste en un canal de sección rectangular, trabajando en régimen de flujo laminar y con un tiempo de retención que permita a las gotas de aceite a separar alcanzar la superficie donde serán eliminadas.

A.2. Separador CPI

El proceso involucra la instalación de una serie de platos paralelos al eje longitudinal de una API, estos platos son corrugados (como el material de los techos) con el eje de corrugación paralelo a la dirección de flujo. Los platos o placas forman una "V" cuando son vistos a lo largo del eje de flujo, el empaque de la placa está inclinado en un ángulo de 45° y la mayor parte del agua es forzada a fluir hacia abajo. Las capas de petróleo ascienden contra el flujo de agua y se concentran en el tope de cada corrugación. Cuando el petróleo llega al final del empaque de platos es recolectado en un canal y enviado a la interfase petróleo agua de donde son removidos.

El eje de las corrugaciones, es paralelo a la dirección de flujo, con una inclinación estándar de 45° por donde el agua es forzada a fluir hacia abajo y así poder remover las partículas de aceite presentes en el agua. Las gotas de aceite ascienden en sentido contrario al flujo de agua y se concentran en el tope de cada corrugación formando una capa en la superficie. Cuando el aceite alcanza el último paquete de platos se recoge en un canal y se lleva a la interface agua-aceite.

Eficientes si las gotas son mayores de $30 \cdot 10^{-6}$ m. Placas corrugadas mejores que separadores de flujo cruzado e interceptores de platos paralelos.

A.3. Sistema de flotación por aire disuelto (DAF)

En el proceso de flotación no es posible la separación de los coloides (partículas cargadas eléctricamente), ni de aquellas partículas de grasas o aceites que se encuentren en emulsión.

Coagulación-Floculación

En los procesos de coagulación-floculación se neutralizan las cargas eléctricas de los coloides y emulsiones presentes en el agua residual, seguido de un reagrupamiento de las partículas, de tal forma que sea factible su separación posterior ya sea por decantación o bien por flotación.

Es de indicar que en el proceso de coagulación-floculación, no tiene lugar separación alguna de contaminantes, sino una adecuación de determinadas partículas para que puedan ser separadas físicamente a través de otros procesos instalados a continuación, como decantación o flotación.

El proceso de coagulación se puede realizar por tres vías diferentes:

Adición de iones que se adsorban o reaccionen con la superficie del coloide y en consecuencia disminuyan su potencial, adición de un polielectrolito y adición de sales metálicas.

Reactor de coagulación

Por tratarse de una reacción de tipo químico de primer orden, la misma tiene lugar de forma prácticamente instantánea, viniendo determinado el tiempo de retención del sistema por el preciso para que el agua residual se mezcle perfectamente con el reactivo.

El tiempo de retención para una correcta coagulación, cuando se dispone de agitación vigorosa está comprendido entre 2 y 3 minutos.

Los reactores utilizados para llevar a cabo el proceso de coagulación, pueden ser de dos tipos:

- Sección circular: En este caso el diámetro y altura del reactor tiene aproximadamente la misma dimensión.
- Sección rectangular: Siendo los tres lados de las mismas dimensiones.

Floculación

Debido a que las partículas formadas en el proceso de coagulación son de un tamaño muy pequeño, es necesaria su reagrupación en otras de mayor tamaño formando una especie de piña o ristra entre ellas, a este proceso de reagrupamiento de las partículas en otras de mayor tamaño se le denomina floculación.

Los hidróxidos metálicos formados en el proceso de coagulación, y con una agitación suave, tienen tendencia a formar unos coágulos que adsorben las partículas en suspensión, formando unos flóculos de tamaño visible. Los mencionados flóculos son bastante higroscópicos, lo que da lugar a retenciones de molécula de agua.

Para mejorar de forma notable la formación de flóculos es práctica habitual la dosificación de polielectrolitos orgánicos, consistentes en polímeros de alto peso molecular y larga cadena que fijan las partículas sólidas, formando unas nuevas partículas de mayor tamaño, compactas y fácilmente decantables.

El tiempo de retención para floculación, cuando se dispone de una agitación suave está comprendido entre 20 y 30 minutos.

Reactivos utilizados

Los productos químicos normalmente utilizados para la coagulación son:

- Sales de aluminio fundamentalmente el sulfato de aluminio o policloruro de aluminio.
- Sales de hierro como el cloruro férrico, sulfato férrico y sulfato ferroso.
- Agente neutralizante. Con el fin de ajustar el pH de la coagulación al valor idóneo, así como neutralizar la acidez que producen las sales metálicas, se utiliza cal o hidróxido sódico.

Flotación

El proceso de flotación con aire es utilizado en el tratamiento de aguas residuales con el fin de eliminar:

- Sólidos en suspensión de densidad igual o inferior a la del agua.
- Partículas de grasas y aceites si se encuentran en estado libre.

La separación se lleva a cabo introduciendo o formando burbujas de aire de un tamaño muy fino en el agua residual. Estas burbujas tienden a fijarse en la superficie de la materia a separar, de tal forma que el peso específico del conjunto partícula-aire es menor que el del agua, creándose una velocidad ascensional suficiente para que la partícula alcance la superficie del líquido, consiguiendo con este método, que incluso partículas con mayor densidad que el agua, puedan ser separadas por flotación en superficie, de donde son retiradas mediante los mecanismos apropiados.

Se empleará un **sistema de flotación por disolución de aire:**

En este sistema el aire es disuelto hasta saturación en el agua residual bajo una presión entre cuatro y seis atmósferas, seguido de una descompresión a presión atmosférica.

Cuando la presión del líquido disminuye, el gas disuelto en exceso es liberado en forma de finas burbujas, a lo largo de toda la masa del líquido.

Por otra parte, la generación de microburbujas, tiene tendencia a formarse en la interfase sólido-líquido, produciéndose la fijación del aire sobre las partículas y en consecuencia facilitando la flotación de las mismas.

A través de una válvula despresurizadora, el agua a presión y saturada en aire a esa presión, se introduce en un tanque atmosférico, formándose en toda la masa del líquido una gran cantidad de microburbujas (de 30 a 120 micras de diámetro) que se fijan a los cuerpos a eliminar y son arrastrados hacia la superficie, donde unas barrederas retiran las espumas formadas.

Igualmente que sobre los sólidos en suspensión, las microburbujas se fijan sobre las gotas de grasas y aceites, provocando su separación. El líquido clarificado es retirado por la superficie, mediante vertedero protegido por deflectores que evitan la fuga de flotables.

Las partículas en suspensión de densidad elevada que pueda llevar el agua residual y que no sean capturadas por las burbujas de aire, pueden decantar en el tanque de

despresurización, siendo arrastradas por unas rasquetas de fondo y purgados en forma de fangos de manera periódica, al igual que en los decantadores.

Presurización de la recirculación

En esta variante, una parte del efluente del tanque de flotación es recirculado e introducido en el sistema de presurización, pasando el agua a tratar directamente al mencionado tanque.

La cantidad de agua a recircular es función directa de los sólidos en suspensión y aceites a eliminar.

Tanque de Flotación

En estos tanques es donde tiene lugar la despresurización del agua residual presurizada previamente y saturada en aire, y en consecuencia donde tiene lugar la formación de burbujas y la flotación de los contaminantes a eliminar.

La construcción de estos tanques puede ser de forma rectangular o bien circular, estando provisto en el primer caso de unas barrederas superficiales arrastradas por cadenas sinfín para la extracción de las espumas y en el segundo caso las barrederas son radiales. Con el fin de poder ajustar la velocidad de giro o de desplazamiento de las barrederas, se debe disponer de variador de la velocidad en el mecanismo de arrastre.

A. 4. Sistema de aeración

Adición de aire

El aire utilizado en este proceso, normalmente es tomado de los servicios generales de la industria, o bien se instala un compresor, siendo suficiente una sobrepresión de dos atmósferas superior a la de trabajo del calderín de presurización. La cantidad de aire necesaria va a depender de la cantidad de contaminantes a separar, presión de trabajo y temperatura del agua.

Calderín de presurización

En este tanque tiene lugar la disolución del aire en el agua recirculada, siendo el tiempo de retención para saturar el agua en aire del orden de varios minutos.

En estos equipos, es fundamental el mantener constante el nivel de agua en el mismo, con el fin de garantizar el tiempo de contacto, disponiendo para ello el calderín de una válvula de flotador o de cualquier otro sistema.

Igualmente el calderín deberá disponer de válvula de seguridad (al ser un tanque a presión) así como de manómetros, válvula de purga, etc.

A.5. Sedimentador o Clarificador

Este proceso está planteado como complementario en el desarrollo total de la limpieza del agua. La función básica de la sedimentación es separar las partículas suspendidas del agua. Los sistemas de decantación pueden ser simples, es decir trabajar únicamente con la gravedad, eliminando las partículas más grandes y pesadas, o bien, se pueden utilizar sistemas coagulantes, para atraer a las partículas finas y retirarlas del agua.

La decantación simple trabaja junto con otros factores como son la luz solar, la aireación y la fricción que existe entre los elementos, que puede ser producida por la presión del agua, además de variar dependiendo de la magnitud de la partícula.

A.6. Cloración

El cloro es un elemento activo que reacciona con muchos compuestos químicos contenidos en el agua, formando componentes nuevos o menos ofensivos. Hidrólisis e ionización ocurren cuando se añade cloro gaseoso al agua, el cual forma el ácido hipocloroso, HOCl, y el ion hipoclorito, OCl⁻, ambos llamados cloro libre o residual. Las sales de hipoclorito de calcio, Ca(OCl)₂, y de sodio, Na(OCl), pueden ser añadidas al agua para formar cloro libre. HOCl es la forma predominante a pH < 7,0 lo cual es beneficioso para la cloración ya que su poder desinfectante es de aproximadamente 40 a 80 veces el de OCl⁻.

HOCl reacciona con el amoníaco en el agua para formar diferentes tipos de cloraminas, compuesto que constituyen lo que se llama cloro libre combinado. Debido a que las cloraminas tienen un poder desinfectante inferior, es necesario añadir una cantidad de cloro extra para asegurar la presencia de cloro residual. En la figura 1.6 se muestra un esquema del fenómeno de reacción resultante cuando se añade cloro a un agua residual con contenido de amoníaco.

1.3.2 Balance de materia y energía

1.3.2.1 Ecuaciones básicas para el diseño y dimensionamiento de equipos

A fin de definir la temperatura y la presión de diseño de todos equipos, se hizo uso de los criterios establecidos en la Norma PDVSA MDP-01-DP-10 "Temperatura y Presión de diseño". Los mismos se presentan en las Tabla A.1 y Tabla A.2.

Tabla 1.3 Temperatura de Diseño

Temperatura de Operación, °C	Temperatura de diseño, °C
$T < -17,78$	$T - 1,11$
$0 < T < 398,89$	$T + 10$
$T > 398,89$	T

Tabla 1.4 Presión de Diseño

Presión de Operación, atm	Presión de diseño, atm
$P < 2,382$	3,402
$2,382 < P < 17,011$	$P_d + 1,701$
$17,011 < P < 39,467$	$P_d + 10\%$
$39,467 < P < 78,933$	$P_d + 3,947$
$P > 78,933$	$P_d + 5\%$

El resto de los cálculos individuales de cada equipo se presentan a continuación.

A.1. Separador API

Para el dimensionamiento del separador API será necesario contar con la siguiente información:

- Presión de operación, P
- Temperatura de operación, T
- Flujo de entrada, Q_{in}
- Densidad del agua a la temperatura de operación, ρ_w
- Densidad de la mezcla de hidrocarburos, ρ_o
- Viscosidad absoluta del agua a la temperatura de operación, μ_w
- Radio equivalente promedio de las gotas de hidrocarburos, r_o

Además, también es necesario establecer ciertos criterios de diseño los cuales son requeridos para el procedimiento de cálculo:

- **Profundidad del separador, D**

Para que los equipos mecánicos no originen muchas perturbaciones sobre el proceso, la profundidad del tanque debe estar comprendida en el rango de 0.91 a 2.44 m.

- **Ancho de canal, W_c**

El ancho del canal queda limitado entre 1.83 y 6.10 m.

- **Factor de corto circuito, F_{cc}**

Se recomienda un valor de 1.2.

- **Relación Profundidad – Ancho de canal (D/W_c)**

El cociente de la profundidad con respecto al ancho de canal debe estar comprendido entre 0.3 y 0.5.

- **Relación Largo – Ancho (L/W_c)**

Para garantizar una buena separación, se recomienda que el cociente entre el largo y el ancho del canal sea igual o superior a 5. El diseño del separador API se detalla a continuación:

a. Velocidad de ascenso de las gotas de hidrocarburo, v_{as}

Para el cálculo de este parámetro, se puede utilizar la Ley de Stokes (Ecuación 1)

$$v_{as} = \frac{2 \cdot g \cdot r_o^2 \cdot (\rho_w - \rho_o)}{9 \cdot \mu_w} \dots \dots \dots (ec. 1)$$

Donde v_{as} es la velocidad de ascenso de las gotas de aceite y g es la aceleración de la gravedad; o la ecuación establecida en la Norma PDVSA *MDP – 09 – EF – 05 "Diseño Conceptual de Tecnologías de Control de Efluentes"* (Ecuación 2).

$$v_{as} = \frac{0,0241 \cdot (S_w - S_o)}{\mu_w} \dots \dots \dots (ec. 2)$$

Donde S_w y S_o son la gravedad específica del agua y del hidrocarburo respectivamente. En esta ecuación se asume que el diámetro promedio de la gota de hidrocarburo es 0,015 cm.

b. Velocidad horizontal, v_h

Este valor viene dado por la Ecuación 3. Si $v_h > 0,01524$ m/s, entonces se obvia el valor arrojado por la ecuación y se utiliza como velocidad horizontal 0,01524 m/s.

$$v_h = 15 \cdot v_{as} \dots \dots \dots (ec. 3)$$

c. Factor de turbulencia, F_T

Este factor, el cual se calcula a partir de la Ecuación 4, representa los efectos de la turbulencia sobre el comportamiento hidráulico ideal

$$F_T = 0,022 \cdot (v_h/v_{as}) + 1,013 \dots \dots \dots (ec. 4)$$

$$R^2 = 0,983$$

Para la obtención de dicha ecuación, primero se graficaron (Figura A.1) los datos proporcionados por la Norma PDVSA *MDP – 09 – EF – 05 "Diseño Conceptual de Tecnologías de Control de Efluentes"*, los cuales se presentan en la Tabla 1.5, y luego se realizó un ajuste a la línea de tendencia descrita por los mismos.

Tabla 1.5 Valores para el factor de turbulencia de acuerdo a la relación v_h/v_{as}

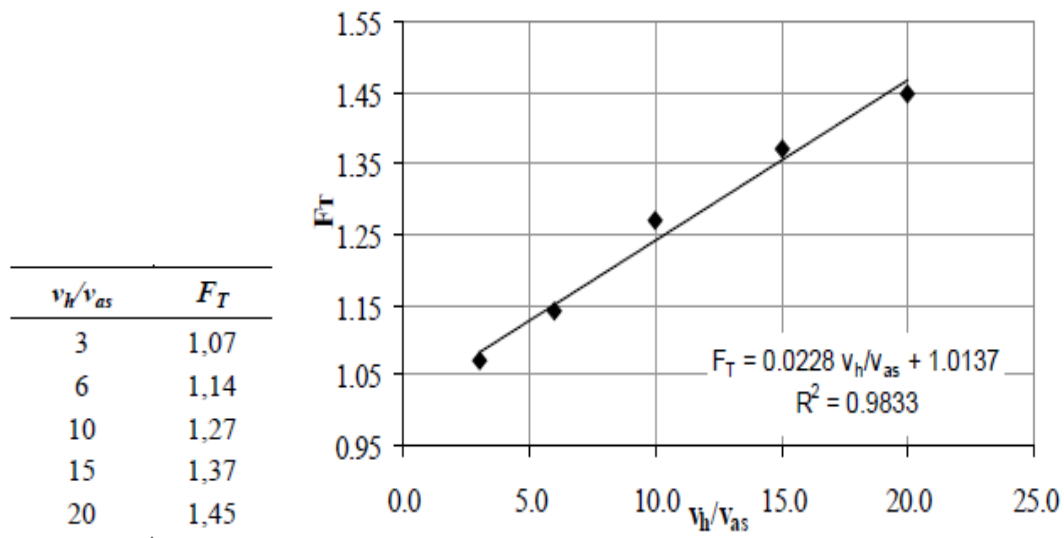


Figura 1.13 Factor de turbulencia (F_T) en función de la relación v_h/v_{as} .

d. Factor de diseño, F

Este factor toma en cuenta los efectos de corto circuito (F_{cc}) y turbulencia (F_T) que afectan el comportamiento hidráulico y lo desvían de la idealidad. El mismo se determina a partir de la Ecuación 5.

$$F = F_T \cdot F_{cc} \dots \dots \dots (ec. 5)$$

e. Área superficial mínima, A_s

El área horizontal o superficial mínima viene expresada por la siguiente relación

$$A_s = F \cdot (Q_{in}/v_{as}) \dots \dots \dots (ec. 6)$$

Donde Q_{in} es caudal de entrada a la unidad.

f. Área transversal, A_t

El área transversal de la unidad viene expresada como:

$$A_t = \frac{Q_{in}}{v_h} \dots \dots \dots (ec. 7)$$

g. Número de canales, N_c

Dicho valor se obtiene a partir de

$$N_c = \frac{A_t}{W_c \cdot D} \dots \dots \dots (ec. 8)$$

h. Profundidad definitiva del canal, D_c

La profundidad del canal viene dada por la siguiente expresión

$$D_c = \frac{A_t}{W_c \cdot N_c} \dots \dots \dots (ec. 9)$$

Es importante verificar que se con este valor de profundidad la relación profundidad – ancho (D/W) se siga manteniendo entre 0.3 y 0.5.

i. Longitud de canal, L_c

La longitud del canal del separador viene dada por la expresión que se presenta a continuación

$$L_c = F \cdot D \cdot \left(\frac{v_h}{v_{as}} \right) \dots \dots \dots (ec. 10)$$

j. Altura de salida del líquido, H

La altura sobre el vertedero puede ser obtenida de dos maneras. La primera es a través de la Ecuación de Francis:

$$H = \left[\frac{1}{1838} \cdot \frac{Q}{\frac{A_h}{L_c}} + \left(\frac{v_h^2}{2g} \right)^{3/2} \right]^{2/3} - \left(\frac{v_h^2}{2g} \right) \dots \dots \dots (ec. 11)$$

La segunda, corresponde a la simplificación de la Ecuación de Francis presentada en la Norma PDVSA MDP – 09 – EF – 05 "Diseño Conceptual de Tecnologías de Control de Efluentes", la cual resulta en la siguiente expresión

$$H = 0,212 \left(\frac{Q \cdot L_c}{A_h} \right)^{2/3} \dots \dots \dots (ec. 12)$$

A.2. Separador CPI

Antes de iniciar con los cálculos para dimensionar el separador CPI, es imprescindible disponer de la siguiente información:

- Presión de operación, P
- Temperatura de operación, T
- Flujo de agua, Q_{in} ;
- Densidad de la mezcla de hidrocarburos, ρ_o ;
- Radio equivalente promedio de las gotas de hidrocarburos, r_o ;
- Densidad del agua a la temperatura de operación, ρ_w ;

- Viscosidad absoluta del agua a la temperatura de operación, μ_w ; o viscosidad cinemática, ν_w .

Además, es necesario establecer ciertos criterios de diseño en cuanto a las dimensiones de las placas corrugadas. Los valores para el ancho, W_P , largo, L_P y espesor, e_P son obtenidos por parte de los proveedores. Sin embargo, los mismos no deben ser mayores que 2 m para W_P y L_P y 1 cm para e_P .

- **Dimensiones de la placa**

El tamaño del separador está estrechamente relacionado con las dimensiones de las placas corrugas que se vayan a utilizar.

- **Inclinación de las placas, θ_P**

El ángulo de inclinación varía entre 45 y 60° de acuerdo a la mayoría de los modelos comerciales y a las especificaciones de la Norma PDVSA *MDP – 09 – EF – 03 "Sistemas de Control de Efluentes"*.

- **Separación entre las placas, s_P**

La separación entre las placas por lo general oscila entre los 2 y 5 cm. En cuanto al dimensionamiento del separador CPI, se tiene que:

- a. Velocidad crítica de sedimentación, v_{sc}**

La velocidad de sedimentación crítica (Ecuación 13) es la velocidad mínima necesaria para que el fluido que atraviesa el separador resuspenda los sólidos depositados en el fondo

$$v_{sc} = \left[\frac{8g\beta d_o(1 - S_o)}{F_f} \right]^{0,5} \dots \dots \dots (ec. 13)$$

Donde β es una constante cuyo valor es 0,06 por tratarse de un material no uniforme, d_o es el diámetro de las gotas de hidrocarburos y F_f es el factor de fricción de Weisbach – Darcy, cuyo valor se tomará como 0.03 por tratarse de un flujo laminar

- b. Velocidad entre las placas, v_P**

La teoría que sustenta el proceso de sedimentación laminar se basa en la siguiente relación

$$v_p = \frac{L_p + s_p \tan \theta}{\frac{\alpha \cdot s_p}{v_{sc}} + \frac{0,058 s_p^2}{v_w}} \dots \dots \dots (ec. 14)$$

Donde v_p es la velocidad de desplazamiento entre las placas [m/s], v_{sc} es la velocidad crítica de sedimentación [m/s], L_p es la longitud de placa [m], s_p es la separación entre las placas [cm], v_w es la viscosidad cinemática del agua [m²/s] y α es una constante cuyo valor es 1.3 para el flujo laminar entre las placas.

c. Verificación del número de Reynolds, Re

Debido a que para el cálculo de la velocidad de desplazamiento del fluido entre las placas se requiere el uso de una constante, cuyo valor es sólo válido para el caso de flujo laminar, es necesario comprobar que el fluido se encuentre en dicho estado, por lo cual el número de Reynolds debe estar comprendido entre 400 y 1600

$$Re = \frac{v_p \cdot s_p}{v_w} \dots \dots \dots (ec. 15)$$

d. Área Superficial, A_s

El área superficial de la unidad se puede determinar de acuerdo a la siguiente expresión

$$A_s = \frac{Q_{in}}{v_p} \dots \dots \dots (ec. 16)$$

e. Número de placas, N_p

La cantidad de placas dentro del separador viene dada por

$$N_p = \frac{A_s \cdot \sin \theta}{W \cdot (s_p + e_p)} \dots \dots \dots (ec. 17)$$

El valor de W , el cual representa el ancho de la zona de sedimentación, será fijado tomando como referencia los anchos de las placas comerciales, W_p .

f. Longitud del separador, L

Por último, la longitud de la unidad se puede obtener según

$$L = \frac{A_s}{W} \dots \dots \dots (ec. 18)$$

A.3. Sistema de flotación por aire disuelto (DAF)

Para el dimensionamiento del sistema de flotación por aire disuelto (DAF) será necesario contar con la siguiente información:

- Presión de operación, P
- Temperatura de operación, T
- Flujo de entrada, Q_{in}
- Concentración de sólidos suspendidos en la entrada, $C_{S\ in}$
- Concentración de sólidos suspendidos en la salida, $C_{S\ out}$
- Concentración de hidrocarburos en la entrada, $C_{o\ in}$
- Concentración de hidrocarburos en la salida, $C_{o\ out}$
- Tasa de producción de lodo por cantidad de coagulante agregado, CL
- Presión manométrica del tanque presurizado, P_{man}
- Dosis de coagulante, Cg
- Porcentaje de sólidos en el lodo, $\%S\ lodo$.

El valor para la presión manométrica del tanque presurizado, por lo general, se fija entre 2.72 y 4.08 atm.

Por otra parte, es necesario realizar pruebas de laboratorio con el efluente que se desea tratar para poder determinar la dosis de coagulante óptima, Cg , y los parámetros: $C_{S\ out}$, $C_{o\ out}$, $\%S\ lodo$. Además, es necesario establecer ciertos criterios de diseño, los cuales son requeridos para el procedimiento de cálculo:

- **Factor de eficiencia, F_E**

Se refiere al nivel de eficiencia que tiene el equipo en cuanto a la remoción tanto de hidrocarburos como de sólidos suspendidos. El valor de F_E varía entre 0.5 y 0.8.

- **Tiempo de retención en el tanque presurizado, $tr\ pres$**

Este valor se refiere a la cantidad de tiempo que debe permanecer cierto volumen de agua para que se alcance la concentración deseada de aire disuelto en la misma. Por lo general, dicho valor es obtenido experimentalmente a través de pruebas de laboratorio, sin embargo, el mismo oscila entre 1 y 3 min.

- **Tiempo de retención en el tanque de floculación, $tr\ floc$**

El período de retención en el tanque de floculación es el tiempo necesario para que el coagulante ejerza su función y propicie la formación de partículas lo suficientemente grandes como para que puedan ser arrastradas por las burbujas de aire hacia la superficie o para que sedimenten por su propio peso. Este tiempo usualmente se

determina experimentalmente, sin embargo, por lo general se encuentra entre 5 y 15 min.

• **Tiempo de retención en el tanque de flotación, t_r flot**

Al igual que el caso anterior, este valor se obtiene a partir de estudios previos sobre el efluente y comúnmente varía entre 20 y 40 min. El tiempo de retención dentro de este tanque representa el tiempo necesario para lograr una separación óptima, es decir, obtener un efluente lo suficientemente clarificado para continuar el tren de tratamiento, sin tener que contar con equipos excesivamente grandes para compensar mayores tiempos de retención.

a. Relación aire /sólido, m_a/m_s .

Representa el factor más importante en la eficiencia de la flotación, y depende del tipo de efluente a tratar. Se refiere a la masa de aire liberado en la despresurización por masa de sólidos presentes en el afluente, y puede afectar el proceso de flotación, por cuanto influye en la concentración final de sólidos o aceites en el efluente, así como en la velocidad de ascenso de éstos.

La Norma PDVSA *MDP – 09 – EF – 05* proporciona una serie de datos (Tabla 1.6) que representan la variación de la relación m_a/m_s en función de la concentración de sólidos suspendidos en el efluente, $C_{S\ out}$.

Tabla 1.6 Relación m_a/m_s en función de la concentración de sólidos suspendidos en el Efluente.

$C_{S\ out}$ [mg/L]	m_a/m_s
12,5	0,068
16,0	0,050
15,0	0,055
20,0	0,030
25,0	0,022
30,0	0,019
40,0	0,015
50,0	0,013

A partir del gráfico realizado (Figura 1.14), se obtuvo un par de correlaciones. La Ecuación 19 es válida cuando la concentración de sólidos suspendidos en el efluente,

$C_{S\ out}$, oscila entre 12.5 y 20 mg/L; mientras que la Ecuación 20 es válida para cuando $C_{S\ out}$ está entre 20 y 50 mg/L, $A = \pi r^2$.

$$m_a/m_s = -0,005 \cdot C_{sout} + 0,13 \dots \dots \dots (ec. 19)$$

$$R^2 = 1$$

$$m_a/m_s = 2.10^{-5} \cdot C_{sout}^2 - 0,002 \cdot C_{sout} + 0,061 \dots \dots \dots (ec. 20)$$

$$R^2 = 0,973$$

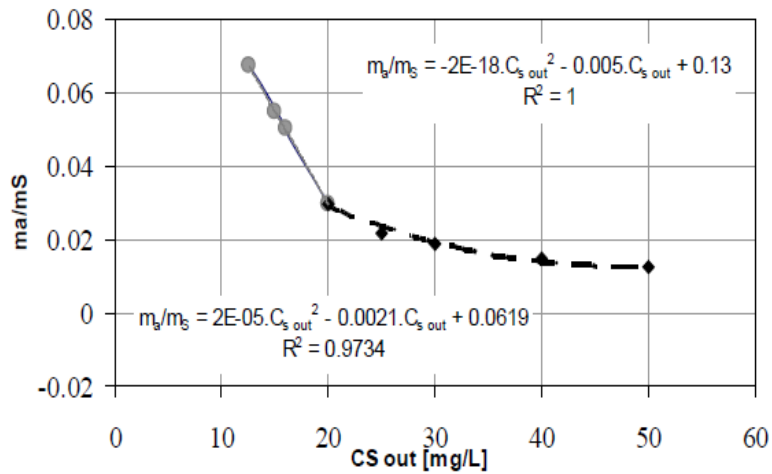


Figura 1.14 Relación ms/mS v Cs out

b. Tasa de desbordamiento superficial, T_s

Como criterio de diseño este valor se encuentra comprendido entre 2.445 y 9.779 $m^3/(m^2 \cdot h)$.

La tasa de desbordamiento se puede determinar a partir de las correlaciones presentadas en las Ecuaciones 21 y 22, las cuales son válidas cuando $C_{o\ out}$ está entre 14 y 23 mg/L para el primer caso, y 23,0 y 37,5 mg/L para el segundo.

$$T_s = -0,02 \cdot C_{oout}^2 + 0,949 \cdot C_{oout} - 8,297 \dots \dots \dots (ec. 21)$$

$$R^2 = 0,990$$

$$T_s = -0,0002 \cdot C_{oout}^2 + 0,044 \cdot C_{oout} - 2,065 \dots \dots \dots (ec. 22)$$

$$R^2 = 1$$

Dichas correlaciones fueron obtenidas al graficar (Figura 1.15) los valores de la Tabla 1.7 y hacer los ajustes correspondientes.

Tabla 1.7 Tasa de desbordamiento superficial en función de la concentración de hidrocarburos en el efluente

T_s [gpm/ft ²]	$C_{o\ out}$ [mg/L]
0,70	14,0
1,00	14,0
1,50	15,0
2,00	16,5
2,60	20,0
3,00	23,0
3,25	30,0
3,50	37,5

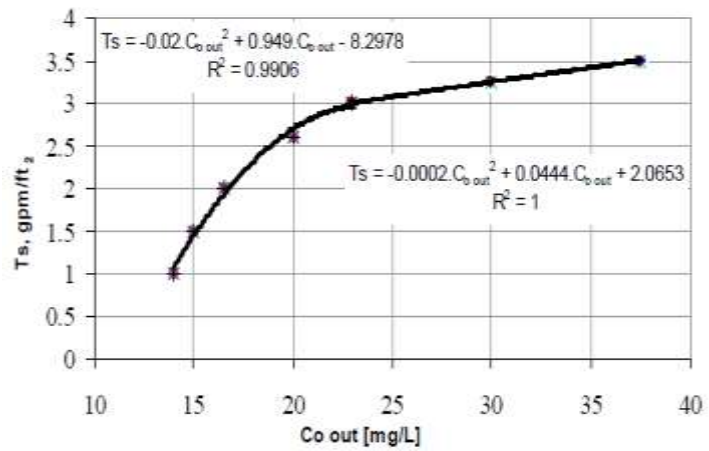


Figura 1.15 T_s en función de $C_{o\ out}$

c. Solubilidad del aire, C_s

La solubilidad del aire en el agua es un factor que depende de la temperatura. Se calcula a partir de la Ecuación 23, la cual se obtuvo a partir del ajuste hecho a la gráfica (Figura 1.16) derivada de los datos de la Tabla 1.8.

$$C_s = 4.10^{-8} \cdot T^4 - 3.10^{-5} \cdot T^3 + 0,007 \cdot T^2 - 0,880T + 58,80 \dots \dots \dots (ec. 23)$$

$$R^2 = 0,999$$

Tabla 1.8 Solubilidad del aire en agua a diferentes temperaturas (P = Patm)

T [°F]	Cs [mg/L]
32	37,2
50	29,3
68	24,3
86	20,9
104	18,5
122	17,0
140	15,9
158	15,3
176	15,0
194	14,9
212	15,0

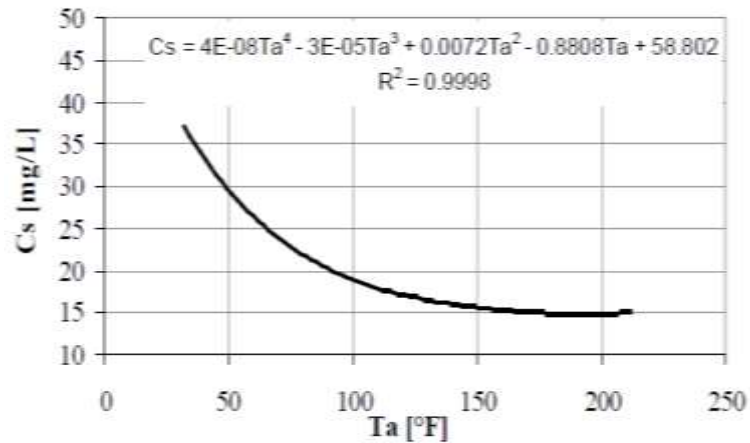


Figura 1.16 Solubilidad del aire, Cs, en función de la temperatura, T a presión atmosférica (1atm).

d. Caudal de reciclo, QR

El caudal de recirculación o reciclo viene definido por la siguiente expresión

$$Q_R = \frac{m_a/m_s \cdot Q_{in} \cdot C_{sout}}{C_s \cdot [F_E \cdot (P_{man}/14,7 + 1) - 1]} \dots \dots \dots (ec. 24)$$

Donde QR es el caudal de reciclo (m³/h), ma/ms es la relación aire/sólido, Qin es el caudal del afluente (m³/h), Cs es la solubilidad del aire, Csout es la concentración de sólidos suspendidos en el efluente [mg/L] y Pman es la presión manométrica en el tanque presurizado (atm). FE es el factor de eficiencia de la disolución del aire en el agua, el cual varía entre 0.5 y 0.8.

e. Porcentaje de reciclo, %R

Éste se determina por

$$\%R = \left(\frac{Q_R}{Q_{in}} \right) \cdot 100 \dots \dots \dots (ec. 25)$$

Normalmente, el reciclo varía entre 30 y 40%, pero pueden aceptarse reciclos por encima del 15%.

f. Área superficial del tanque de flotación, Asflot

El cálculo del área superficial requerida en el tanque de flotación sería según

$$A_{sflot} = \frac{Q_{in} + Q_R}{T_S} \dots \dots \dots (ec. 26)$$

g. Volumen del tanque de flotación, V_{flot}

El volumen del tanque de flotación sería según

$$V_{flot} = (Q_{in} + Q_R) \cdot t_{rflot} \dots \dots \dots (ec. 27)$$

h. Profundidad del tanque de flotación, D_{flot}

Una vez obtenido el volumen y el área superficial del tanque, la profundidad del mismo será:

$$D_{flot} = \frac{V_{flot}}{A_{sflot}} \dots \dots \dots (ec. 28)$$

i. Volumen del tanque presurizado, V_{pres}

Se tiene que

$$V_{pres} = Q_R \cdot t_{rpres} \dots \dots \dots (ec. 29)$$

j. Volumen del tanque de floculación, V_{floc}

Este parámetro se obtiene por

$$V_{floc} = (Q_R + Q_{in}) \cdot t_{rfloc} \dots \dots \dots (ec. 30)$$

k. Flujo másico de lodo (sólidos suspendidos), m_{lodos}

El lodo producido por los sólidos suspendidos contenidos en el afluente tiene un flujo másico, que se puede obtener mediante la siguiente expresión

$$m_{lodos} = (C_{Sin} + C_{Sout}) \cdot Q_{in} \dots \dots \dots (ec. 31)$$

l. Flujo másico de lodo (coagulante), m_{lodoC}

La masa de coagulante agregada al caudal de entrada también produce una cantidad significativa de lodo que se determina mediante la expresión presentada a continuación

$$m_{lodoC} = Cg \cdot CL \cdot Q_{in} \dots \dots \dots (ec. 32)$$

m. Flujo másico de lodo (total), m_{lodo}

El flujo másico total de lodo producido por la unidad sería la sumatoria del lodo proveniente de la remoción los sólidos suspendidos y del producido por el coagulante

$$m_{lodo} = m_{lodos} + m_{lodoC} \dots \dots \dots (ec. 33)$$

n. Caudal de lodo, Q_{lodo}

Tomando como referencia el porcentaje en peso de sólidos contenido en el lodo se puede determinar el caudal de producción del mismo, tal como lo expresa la Ecuación 34.

$$Q_{lodo} = \frac{m_{lodo}}{\%s_{lodo}} \cdot 100 \dots \dots \dots (ec. 34)$$

A. 4. Sistema de aeración

En caso del dimensionamiento del sistema de aeración será necesario contar con la siguiente información:

- Presión de operación, P
- Temperatura de operación, T
- Flujo de entrada, Q_{in}
- Demanda biológica de oxígeno en la entrada, DBO_{in}
- Demanda biológica de oxígeno a la salida, DBO_{out}

Por otra parte, también es importante establecer ciertos criterios de diseño requeridos durante el procedimiento de cálculo:

• **Tiempo de retención, t_r**

Éste se refiere al tiempo que debe permanecer cierto volumen del fluido tratado dentro del aerador, para lograr reducir la demanda biológica de oxígeno (DBO) hasta el nivel deseado. En la mayoría de los casos, el tiempo de retención es determinado de manera experimental, ya que el mismo puede variar considerablemente según las características del afluente y el tipo de aeración que se elija.

Los dos tipos de aeración más utilizados son la convencional y la de mezcla completa, cuyos tiempos de retención son 4-8 h y 3-5 h respectivamente.

• **Profundidad o nivel de agua en el tanque, D_w**

El nivel de agua en el tanque debe oscilar entre 1.83 y 4.57 m de profundidad.

- **Relación Ancho / Profundidad del tanque, (W/D)**

Para garantizar buenas condiciones de mezcla, la relación W/D debe estar entre 1.5 y 2.

- **Altura libre sobre el nivel del agua (Freeboard), H_F**

Se refiere a la distancia entre el nivel normal del líquido y el tope del tanque. Esta altura adicional depende del tipo de aerador que se escoja para el tanque. Para el caso de los aeradores de superficie, se recomienda que la altura adicional no sea menor a 0,91 m, en cambio, para los de difusión se recomienda un valor estándar de 0,46 m.

- **Porcentaje de exceso de oxígeno, $\%O_2$**

El oxígeno es el componente principal para lograr la oxidación de la materia orgánica en el efluente. Por lo tanto la cantidad requerida del mismo viene dada por el porcentaje de disminución de DBO que se desee. Como en todo proceso, los requerimientos reales en condiciones de operación siempre se alejan de los teóricos, razón por la cuál es necesario añadir un exceso de oxígeno para propiciar que las condiciones de operación se asemejen lo más posible a las teóricas. Por lo general, en el diseño se incluye un 20% de exceso de oxígeno.

- **Temperatura del aire, T_a**

La temperatura del aire influye en el grado de solubilidad del gas en el agua, hecho que afecta de manera directa el proceso de oxidación.

- **Tipo de aerador**

Tal como se mencionó anteriormente, los aeradores se clasifican en dos grandes grupos de acuerdo al principio de su funcionamiento: aeradores mecánicos de superficie y los de difusión. De acuerdo a las características mencionadas y a las necesidades del efluente se debe seleccionar uno de los siguientes tipos: turbina, difusor poroso o no poroso y aerador superficial de plato o de hélice. Para el dimensionamiento del sistema de aeración:

a. Volumen de agua, V_w

La cantidad de volumen de agua en el tanque implica el volumen mínimo del mismo. Este valor viene dado por el caudal de entrada a la unidad, Q_{in} , y el tiempo de retención de la misma, t_r .

$$V_w = Q_{in} \cdot t_r \dots \dots \dots (ec. 35)$$

b. Ancho del tanque, W

Al fijar la relación W/D y la profundidad del agua en el tanque se obtiene directamente el ancho del mismo de la siguiente forma

$$W = D_w \cdot \left(\frac{W}{D}\right) \dots \dots \dots (ec. 36)$$

c. Largo del tanque, L

Dado el volumen total de agua del tanque y sus dimensiones de ancho y alto, la longitud queda determinada según:

$$L = \frac{V_w}{W \cdot D_w} \dots \dots \dots (ec. 37)$$

d. Profundidad del tanque, D

La profundidad total del tanque de aeración se obtiene a partir de la contribución de la altura de líquido, D_w , y el espacio libre (*freeboard*) que se deja como borde sobre el mismo, H_F . Por lo tanto

$$D = D_w + H_F \dots \dots \dots (ec. 38)$$

e. Volumen del tanque, V

El volumen total del tanque se obtiene a través de la sumatoria del volumen ocupado por el agua y el volumen adicional obtenido cuando se agrega el borde libre (*freeboard*)

$$V = W \cdot L \cdot (D_w + H_F) \dots \dots \dots (ec. 39)$$

f. Requerimiento de oxígeno, m_{O_2}

El flujo másico de oxígeno requerido depende de los niveles de DBO en el afluente y que tan alto sea el porcentaje de remoción. A su vez, incluye el exceso de oxígeno establecido anteriormente

$$m_{O_2} = (DBO_{in} - DBO_{out}) \cdot Q_{in} \cdot (1 - \%O_2/100) \dots \dots \dots (ec. 40)$$

g. Requerimiento de aire, m_a

Debido a que la mayoría de los sistemas de aeración funcionan con aire y no con oxígeno puro, es necesario calcular la cantidad equivalente de aire en función del oxígeno requerido. Para esto, se debe considerar que la fracción molar del oxígeno en el aire es 0,21 y que su peso molecular es 32 kg/kmol, mientras que el del aire es 28,9 kg/kmol. Partiendo del flujo másico oxígeno necesario en kg/d se hacen las transformaciones necesarias (Ecuación 41) y se obtiene el flujo de aire requerido:

$$m_a = m_{O_2} \cdot 4,301(kg_{aire}/kg_{O_2}) \dots \dots \dots (ec. 41)$$

h. Consumo energético, p

El consumo energético se refiere a la potencia necesaria para poder suministrar la cantidad de aire requerida para lograr el proceso de oxidación y para mantener los sólidos en suspensión. El cálculo del mismo depende del tipo de aerador que se emplee.

• Aerador mecánico de superficie

En este caso, la potencia requerida para suministrar el oxígeno viene dada por la Ecuación 42, donde m_a es la demanda de aire [kg_{aire}/d] y R_{O_2} es la tasa de transferencia de oxígeno [kg_{O₂}/(hp*h)] que varía de acuerdo al tipo de aerador según se muestra en la Tabla 1.9

$$p_{O_2} = \frac{m_a}{24h/d \cdot R_{O_2}} \dots \dots \dots (ec. 42)$$

Tabla 1.9 Tasa de transferencia de oxígeno según el tipo de aerador mecánico de superficie

Tipo de aerador	R_{O_2} [lb _{O₂} /hp.h]
Plato	2,0-2,5
Turbina	3,0-3,5
Hélice	2,5-3,5

En cuanto a la energía para mantener los sólidos en suspensión se debe utilizar la Ecuación 43, donde V_w es el volumen de agua en el tanque [m³] y p_{O_2} es la potencia [hp] calculada por la expresión anterior (Ecuación 42)

$$p = \frac{p_{O_2}}{V_w} \dots \dots \dots (ec. 43)$$

Si el valor obtenido es mayor o igual a 0.14, implica que la potencia calculada con la Ecuación 43 es suficiente para suministrar la cantidad de aire necesaria y mantener los sólidos en suspensión. Si dicho valor es menor a 0.14, entonces la potencia total necesaria tanto para los requerimientos de oxígeno como para el de los sólidos suspendidos se obtiene a partir de la Ecuación 44, donde el V_w es el volumen de agua en el tanque [m³]

$$p = 1,4 \cdot 10^{-4} \cdot V_w \dots \dots \dots (ec. 44)$$

• Aerador por difusión

Para los sistemas de aeración por difusión se utiliza una única ecuación.

Caudal de aire necesario

El caudal de aire requerido Q_a [scfm] viene dado por la expresión

$$Q_a = 96,62 \cdot \frac{m_a}{12} \cdot \frac{100}{\%E} \dots \dots \dots (ec. 45)$$

Donde %E se refiere al porcentaje de eficiencia del aerador (Tabla 1.10), y m_a es la masa de aire requerida [kg_{O2}/h].

Tipo de aerador	%E
Poroso	12
No poroso	8

Potencia requerida

La ecuación para el cálculo de la potencia es:

$$p = 6,6099 \cdot 10^{-4} \cdot Q_a \cdot (T_a + 460) \cdot \left[\left(\frac{P_{amb} + 0,433 \cdot D + 1,5}{P_{amb} - 0,2} \right)^{0,283} - 1 \right] \dots \dots \dots (ec. 46)$$

Donde P_{amb} es la presión atmosférica [atm], T_a es la temperatura del aire [°C], Q_a es el caudal de aire [scfm: factor de conversión scfm*1.69=m³/h] y D es la profundidad del tanque [m].

A.5. Sedimentador o Clarificador

Para el dimensionamiento del clarificador será necesario contar con la siguiente información:

- Presión de operación, P
- Temperatura de operación, T
- Flujo de entrada (promedio), $Q_{in\ av}$
- Flujo de entrada (pico), $Q_{in\ p}$
- Concentración de sólidos suspendidos en la entrada, C_S .

Por otra parte, también es importante establecer ciertos criterios de diseño requeridos durante el procedimiento de cálculo:

- **Porcentaje de reciclaje, %R**

Se refiere al porcentaje del efluente clarificado que es recirculado nuevamente a la unidad. El porcentaje varía entre 0 y 30%.

- **Tiempo de retención, t_r**

Implica el tiempo en el que un volumen determinado de afluente debe permanecer dentro del tanque para su tratamiento. Normalmente este valor se obtiene de forma experimental de acuerdo a las características que presente el afluente.

- **Razón de alimentación de sólidos (promedio), R_{sav}**

Especifica la velocidad con que se alimentan los sólidos por unidad de superficie de clarificador para el caso del caudal promedio de la planta. El valor debe oscilar entre 4-6 kg/(h*m²).

- **Razón de alimentación de sólidos (pico), R_{sp}**

Especifica la velocidad con que se alimentan los sólidos por unidad de superficie de clarificador para el caso del caudal pico de la planta. El valor recomendado es 10 kg/(h*m²).

- **Profundidad de la capa de lodo en el fondo del clarificador, D_{lodo}**

Representa la profundidad del clarificador que estará ocupada por la capa de lodo formado por los sólidos sedimentados. Este valor por lo general se encuentra en 0.6-0.9 m.

• **Relación Largo / Ancho, L/W**

Esta relación es necesaria para el dimensionamiento del clarificador de sección rectangular. Su valor debe estar ubicado en el rango 2-5.

• **Relación Largo / Profundidad, L/D**

Este valor se requiere en el caso de un clarificador de geometría rectangular. La relación largo/profundidad debe estar comprendida entre 5-20.

• **Número de unidades, N_{rec} o N_{cir}**

Se refiere al número de unidades en las cuales se desea distribuir la carga total a tratar. Este número debe ser asignado tanto para unidades con base de geometría rectangular como circular. El diseño de este equipo es como se describe a continuación:

a. Flujo másico de sólidos, m_s

El flujo másico de sólidos que recibe el clarificador, tanto para caudal promedio como caudal pico se calcula a través de la Ecuación 47. Tomando en cuenta que para el caso promedio, m_{sav} se utiliza como caudal de entrada $Q_{in\ av}$, y para el caso de m_{sp} se utiliza $Q_{in\ p}$

$$m_s = Q_{in} \cdot \left(1 + \frac{\%R}{100}\right) \cdot C_s \dots \dots \dots (ec. 47)$$

b. Área superficial total requerida, A_s

El área superficial total requerida depende del flujo másico de sólidos alimentados y la tasa de alimentación de los mismos. Este valor debe ser calculado para condiciones de caudal promedio y pico. El caso que dé como resultado un área mayor será el dominante y por lo tanto, ese será el valor designado como área de diseño, $A_{s\ d}$

$$A_s = m_s / R_s \dots \dots \dots (ec. 48)$$

c. Área superficial por clarificador, A_s'

El área superficial que tendrá cada clarificador depende del número de unidades en las que se haya decidido distribuir la carga de tratamiento. El cálculo es el mismo sin importar el tipo de geometría (rectangular o circular) que se elija para el clarificador

$$A_s' = A_s / N \dots \dots \dots (ec. 49)$$

Donde N varía de acuerdo a si se trata de un clarificador de base rectangular, N_{rec} , o uno de base circular, N_{cir} . Después de obtener el área por unidad, es importante verificar que la misma no sea mayor a 1741.9 m^2 para el caso rectangular y 1140.1 m^2 para el caso circular. Estos valores de área provienen de las dimensiones máximas para las cuales el desempeño del clarificador no se ve afectado. En el caso del clarificador circular, el diámetro máximo es de 38.1 m . En cuanto al clarificador rectangular, el largo y el ancho máximo es de 76.2 y 22.86 m , respectivamente.

d. Dimensiones del clarificador

Las dimensiones finales de cada unidad dependen de la geometría escogida para las mismas.

• Clarificador rectangular

Este tipo de geometría queda definido al obtener el largo, ancho y profundidad. Para esto, se consta de un sistema de tres ecuaciones con tres variables

$$L/W = J \dots \dots \dots (ec. 50)$$

$$L/D = K \dots \dots \dots (ec. 51)$$

$$A_s = L \cdot W \dots \dots \dots (ec. 52)$$

Debido a que J y K fueron preestablecidos en los criterios de diseño, el largo, ancho y profundidad quedan definidos según:

$$L = \sqrt{A_s \cdot J} \dots \dots \dots (ec. 53)$$

$$W = L/J \dots \dots \dots (ec. 54)$$

$$D = (L/K) + D_{lodo} \dots \dots \dots (ec. 55)$$

• Clarificador circular

Para este tipo de geometría es necesario definir el diámetro y la profundidad de acuerdo a las siguientes ecuaciones

$$d = \sqrt{\frac{4 \cdot A_s'}{\pi}} \dots \dots \dots (ec. 56)$$

$$D = \frac{Q_{in} \cdot t_r}{A_s} \dots \dots \dots (ec. 57)$$

e. Tasa de desbordamiento superficial, HLR

La tasa de desbordamiento superficial se obtiene mediante la Ecuación 58. Por criterios de diseño, este parámetro debe estar comprendido entre 5.17 y 15.52 m³/(m²*h)

$$HLR = \frac{Q_{in}}{A_s} \dots \dots \dots (ec. 58)$$

f. Tasa de desbordamiento perimetral, WLR

Esta variable se puede calcular de acuerdo a la expresión presentada en la Ecuación 59. Por criterios de diseño, este parámetro debe estar comprendido entre 0.34 y 2.21 m³/(m*h)

$$WLR = \frac{Q_{in}}{pe \cdot N} \dots \dots \dots (ec. 59)$$

Donde *pe* es el perímetro del clarificador. Para el caso del circular *pe*=*d*.π.....(ec. 60) y para el caso del rectangular *pe* = 2*W*+2*L*.....(ec. 61)

A.7. Cloración

Para el dimensionamiento del sistema de cloración será necesario contar con la siguiente información:

- Presión de operación, *P*
- Temperatura de operación, *T*
- Flujo de entrada (promedio), *Q_{in av}*
- Flujo de entrada (pico), *Q_{in p}*
- Dosis de cloro, *C_c*
- Concentración de cloro disponible en la solución a utilizar en la cloración, *C_{Cl}*.

Por otra parte, también es importante establecer ciertos criterios de diseño requeridos durante el procedimiento de cálculo:

• **Tiempo de contacto o retención, *t_r***

Tiempo que debe pasar el volumen a tratar dentro del tanque de cloración para lograr que el cloro disponible en el efluente sea el deseado. Este valor se determina de forma

experimental a partir de análisis realizados al afluente tanto en condiciones de flujo promedio como en condiciones de flujo pico.

• **Número de pantallas (baffles) dentro del tanque, N_B**

Las pantallas facilitan el contacto entre el fluido y el cloro, ya que proporcionan condiciones de flujo turbulento que favorece el estado de mezcla completa. Su número varía de forma impar entre 3 y 11.

• **Ancho del canal, W_C**

Se refiere al ancho del canal por donde circula el fluido, más no al ancho de la unidad.

• **Profundidad del agua, D_W**

Se refiere al nivel de líquido dentro del tanque.

• **Altura libre sobre el nivel del agua (Freeboard), H_F**

Se refiere a la distancia entre el nivel normal del líquido y el tope del tanque.

Para su dimensionamiento se tiene:

a. Volumen del tanque, V

El volumen del tanque se puede obtener de acuerdo a la Ecuación 62, donde tanto el caudal como el tiempo de retención deben ser sustituidos por los valores correspondientes a las condiciones promedio y pico. Éste debe ser calculado para condiciones de flujo promedio y pico, de manera de determinar cuál es la condición crítica y tomar dicho volumen como el volumen de diseño

$$V = Q_{in} \cdot t_r \dots \dots \dots (ec. 62)$$

b. Relación Profundidad/Ancho, D_C/W_C

Este parámetro resultante del cociente de la profundidad con el ancho del canal debe ser menor a uno (1).

c. Área transversal del canal, A_t

El área transversal de cada canal viene dada por la expresión mostrada a continuación

$$A_t = W_C \cdot D_W \dots \dots \dots (ec. 63)$$

d. Longitud total del canal, L_C

La longitud total que tiene que recorrer el líquido para poder atravesar la unidad, es decir, la longitud total del canal es según la Ecuación 64

$$L_C = V/A_t \dots \dots \dots (ec. 64)$$

e. Longitud de cada paso, L_n

La longitud de cada paso depende del número seleccionado de pantallas, tal como se muestra a continuación

$$L_n = L_C/N_B \dots \dots \dots (ec. 65)$$

f. Relación Largo/Ancho, L/W_c

Este parámetro resultante del cociente del largo con el ancho del canal debe estar entre 40 y 70.

g. Dimensiones del tanque

En cuanto al largo del tanque, L , este será igual al largo de cada paso. Para el caso de la profundidad, D ; ésta será igual a la sumatoria de la contribución de la profundidad del agua y del espacio libre dejado sobre el nivel de la misma

$$D = D_W + H_F \dots \dots \dots (ec. 66)$$

Por último, al ancho de la unidad, W , vendrá dado por el ancho de canal y el número de pantallas

$$W = W_c \cdot N_B \dots \dots \dots (ec. 67)$$

h. Consumo de cloro, m_{Cl}

El consumo de cloro varía de acuerdo al caudal alimentado a la unidad y a la dosis de cloro suministrada. El mismo representado en forma de flujo másico se presenta en la Ecuación 68

$$m_{Cl} = Q_{in} \cdot Cc \dots \dots \dots (ec. 68)$$

i. Caudal de cloro necesario, Q_{Cl}

El caudal de solución de cloro requerido en la unidad depende del flujo másico de cloro necesario y de a concentración de cloro en la solución inyectada

$$Q_{Cl} = m_{Cl}/C_{Cl} \dots \dots \dots (ec. 69)$$

1.3.2.2 Ecuaciones para los cálculos hidráulicos de la red de tuberías

Para iniciar los cálculos hidráulicos se hace necesario determinar la velocidad del fluido, usando la siguiente ecuación:

$$v = \frac{Q}{A} \dots \dots \dots (ec. 70)$$

Donde:

v =velocidad del fluido (m/s)

Q =caudal (m³/h)

A =área de la tubería (m²)

Los cálculos de Ingeniería para especificar las tuberías de entrada y salida de la Planta de Tratamiento; así como las correspondientes a la descarga de hidrocarburo recuperado y la de aire para el tanque de presurización, cumplieron con las Normas PDVSA en lo concerniente a velocidades (gas, líquido, mezcla, erosión) y caída de presión. Los diámetros fueron evaluados en función del flujo volumétrico, presión, temperatura y longitud de la tubería utilizando el simulador.

Las premisas consideradas como base para la realización de los cálculos hidráulicos de las diferentes tuberías dimensionadas, fueron las siguientes:

Premisas generales.

Todo diseño debe cumplir con el criterio más riguroso o la condición más desfavorable de operación, de tal forma que la ocurrencia de menor magnitud queda solapada.

Las condiciones de diseño de la tubería, incluyendo temperatura y presión, están de acuerdo con los requerimientos de la norma PDVSA 90616.1.024 "Dimensionamiento de Tuberías de Proceso" o PDVSA L-TP-1.5 "Cálculo hidráulico de tuberías", la que aplique de acuerdo al servicio y ubicación de la línea.

La velocidad máxima en líneas bifásicas no deberá exceder la velocidad de límite erosional, estimada según la siguiente ecuación para servicios continuos dados en la norma API RP 14 E sección 2.5 y norma PDVSA 90616.1.024:

$$V_e = \frac{100}{\sqrt{\rho_m}} \dots \dots \dots (ec. 70)$$

Donde:

ρ_m : Densidad de la mezcla a condiciones de operación en Kg/m³

Se estimará un 20% adicional en los tramos de longitudes de tuberías, para determinar la caída de presión en válvulas y accesorios no considerados.

El dimensionamiento de las tuberías internas pertenecientes al paquete serán definidas por el proveedor, ya que esta es una ingeniería de tipo conceptual y no de detalle ni construcción, sin embargo se hacen los dimensionamiento de tuberías que representan las salidas del sistema, como las salidas de aceites recuperados, la entrada y salida del sistema como tal y la entrada de aire al el DAF.

Como referencia para el dimensionamiento de las líneas se colocaron los estándares de velocidades típicas de los líquidos en tuberías de acero con la finalidad de tener valores de guía para establecer comparaciones y escoger la mejor configuración.

Fórmulas utilizadas

La ecuación básica para el cálculo de caída de presión para circulación de fluidos en tuberías entre dos puntos (1 y 2) y accesorios es la ecuación de Bernoulli generalizada, la cual asume densidad constante:

$$Z_1 + \frac{P_1}{\rho_1 \cdot g} + \frac{V_1^2}{2 \cdot g} = Z_2 + \frac{P_2}{\rho_2 \cdot g} + \frac{V_2^2}{2 \cdot g} + h_L \dots \dots \dots (ec. 71)$$

V: Velocidad del fluido (m/s)

$\rho_{1,2}$: Densidad del fluido (Kg/m³)

Z₁: Altura del punto 1 (m)

Z₂: Altura del punto 2 (m)

g: gravedad (m/seg²)

P₁: Presión requerida (atm)

P₂: Presión de operación del recipiente de descarga (atm)

h_L: Pérdida por fricción

Velocidad erosional

Para el diseño de tuberías que manejan gases y/o fluidos multifásicos se debe calcular la velocidad erosional con el fin de comprobar que la velocidad del fluido en la tubería no sobrepase el 60% de ésta.

$$Vs = \frac{C}{\sqrt{\rho_m}} \dots \dots \dots (ec. 72)$$

C: 100 para servicio continuo y 125 para servicio no continuo

Tesis: "Diseño de una unidad piloto para simulación de tratamientos de aguas residuales oleosas utilizando el software HYSYS v3.2 en la Facultad de Ingeniería Química-UNAP"

ρ_m : Densidad de la mezcla (Kg/m^3)

V_s : Velocidad erosional (m/s)

Si los valores de velocidad y caída de presión en la tubería se encuentran en los rangos establecidos en las normas de diseño de tuberías para cada fluido en estudio, entonces el diámetro inicialmente supuesto es correcto y se finaliza el procedimiento.

Longitud de tramos

Las longitudes se determinan en función a los tramos de entrada y salida de cada equipo.

Diámetros de los tramos

Los diámetros son determinados con el simulador y deben cumplir con los parámetros de caída de presión y velocidad lineal de acuerdo a las directrices de la norma PDVSA L-TP-1.5 "Cálculo Hidráulico de Tuberías" y 90616.1.024 "Dimensionamiento de Tuberías de Proceso".

Caídas de presión y velocidades.

Para las caídas de presión y velocidades permisibles en tuberías se tomó como base la norma PDVSA L-TP-1.5 "Cálculo Hidráulico de Tuberías" y 90616.1.024 "Dimensionamiento de Tuberías de Proceso".

1.4 Marco Legal

- La Constitución Política del Perú de 1993 (art. 2º, inc. 22º; art. 66º y 67º).
- Decreto Legislativo N° 28611, 13-10-2005: La Ley General del Ambiente (art. 1º, 91º y 113º).
- Decreto Legislativo N° 757, 13-11-91: Ley Marco para el Crecimiento de la Inversión Privada en el Perú (art. 49º).
- Ley N° 29338: Ley de recursos hídricos, numeral 15.3 del art. 15º.
- Resolución Jefatural N°224-2013-ANA: Reglamento para el otorgamiento de autorizaciones de vertimiento y reuso de aguas residuales tratadas (art. 5º, 6º y 7º).
- Decreto Legislativo N° 613, 08-09-90: Código del Medio Ambiente y los Recursos Naturales (art. 14º, 73º, 76º y 77º)

- Ley N° 26221, 26-08-93: Ley Orgánica de los hidrocarburos.
- Decreto Supremo N° 032-2004-EM: Reglamento de las Actividades de Exploración y Explotación de Hidrocarburos (art. 122°, 132° y 165°).
- Decreto Supremo N° 043-2007-EM: Reglamento de Seguridad para las Actividades de Hidrocarburos (art. 70° y 145°).
- Decreto Supremo N° 039-2014-EM: Reglamento para la Protección Ambiental en las Actividades de Hidrocarburos (art. 3°, 52°, 57°, 58°, 82°, 84°, 93° y 95°)
- Ley N° 29134: Ley que regula los Pasivos Ambientales del Subsector Hidrocarburos, 20-11-2007 (art. 4° y 6°).
- Decreto Legislativo N° 613 (08-09-90); Código del Medio Ambiente y los Recursos Naturales (art. 14° y 73°).
- Decreto Supremo N° 039-2014-EM Reglamento para la Protección Ambiental en las Actividades de Hidrocarburos (art. 3°, 57°, 58°, 82°, 84° y 93°).
- Estándares del Banco Mundial (*World Bank Standards*), *Water Resources and Environment. Water Quality: Assesment and Protection*,
- Decreto Supremo N° 002-2008-MINAM (Artículo 1°.- Aprobación de los Estándares Nacionales de Calidad Ambiental para Agua).
- Decreto Supremo N° 003-2010-MINAM, Límites máximos permisibles para los efluentes de plantas de tratamiento de aguas residuales domésticas o municipales (PTAR).
- Decreto Supremo N° 037-2008-PCM, Límites máximos permisibles de efluentes líquidos para el subsector hidrocarburos.
- R.D. N° 008-97-EM/DGAA.-Aprueban niveles máximos permisibles para efluentes líquidos producto de las actividades de generación, transmisión y distribución de energía eléctrica.
- Decreto Supremo N° 057-2004-PCM, Reglamento de la Ley N° 27314, Ley General de Residuos Sólidos, (art. 17° y 47°).

CAPÍTULO II: CONDICIONES Y CÁLCULOS DE DISEÑO

2.1 Condiciones iniciales para el diseño

Los datos de partida para el dimensionamiento de los equipos de este proyecto son los siguientes:

Tabla 2.1 PARÁMETROS FÍSICOS DEL FLUIDO

PARÁMETRO	UNIDAD	VALOR
Caudal	m ³ /h	0.1-6.0
Presión	atm	1.0-10
Temperatura	°C	1.0-100
pH	Adim.	7.5-10.5
AGMH	mg/L	1.0-400
SST	mg/L	10-300
Densidad agua (40°C)	kg/m ³	994.1
Densidad aceite (40°C)	kg/m ³	936.44
Viscosidad absoluta agua (40°C)	kg/(m*s)	0.000653
Viscosidad absoluta aceite (40°C)	kg/(m*s)	0.00053
Viscosidad cinemática agua (40°C)	m ² /s	6.571*10 ⁻⁷
Gravedad específica agua (40°C)	Adim.	0.9922
Gravedad específica aceite (40°C)	Adim.	0.942

Fuente: Norma PDVSA MDP – 09 – EF – 05 "Diseño Conceptual de Tecnologías de Control de Efluentes"-Tablas termodinámicas del agua y aceite (29 DEG API).

2.1.1 Condiciones y caracterización del material a tratar

Los parámetros recopilados para el agua aceitosa son: T, color, sólidos suspendidos totales (SST),DBO,DQO,aceites y grasas minerales e hidrocarburos (AGMH), nitrógeno

total (NT), fósforo total (FT), sulfuros, fluoruros, fenoles y coliformes totales (CT), valores presentados en las tablas 2.2.

Tabla 2.2 PROMEDIO, DESVIACIÓN Y RANGO DE LOS PARÁMETROS FISCOQUÍMICOS DEL EFLUENTE

PARÁMETRO	UNIDAD	PROMEDIO	DESVIACIÓN	RANGO
T	°C	31.29	3.8	28-39
pH	Adm.	8.47	1.14	7.08-11.98
COLOR	Unid. Pt-Co	43.24	67.8	5-300
SST	mg/L	250.0	85.5	10-300
DBO	mg/L	120.59	80.5	12-307
DQO	mg/L	366.82	221.33	66-854
AGMH	mg/L	150.0	82.42	1.00-400
NT	mg/L	12.65	13.62	2.00-48
FT	mg/L	0.53	0.98	0.01-3.73
SULFUROS	mg/L	1.73	2.05	0.01-6
FLUORUROS	mg/L	1.32	1.48	0.01-5.33
FENOLES	mg/L	0.07	0.05	0.01-0.21
CT	NMP/100mL	1343.53	1734.91	200-4750

Fuente: Petroperú 2016

Tabla 2.3 PROMEDIO, DESVIACIÓN Y RANGO DE LOS PARÁMETROS FISCOQUÍMICOS DEL EFLUENTE

PARÁMETRO	UNIDAD	PROMEDIO	DESVIACIÓN	RANGO
T	°C	29.8	2.68	25-35
pH	Adm.	8.47	1	7.62-11.7
COLOR	Unid. Pt-Co	115	190.23	5-750
SST	mg/L	221.0	81.3	10-300
DBO	mg/L	199.87	139.5	51-390
DQO	mg/L	818.4	687.43	184-2111
AGMH	mg/L	140	80.48	1-400
NT	mg/L	13.34	16.69	0.1-52
FT	mg/L	1.42	2.29	0.01-7.55
SULFUROS	mg/L	1.69	1.7	0.01-5.05

Tesis: "Diseño de una unidad piloto para simulación de tratamientos de aguas residuales oleosas utilizando el software HYSYS v3.2 en la Facultad de Ingeniería Química-UNAP"

FLUORUROS	mg/L	2.22	2.9	0.01-7.65
FENOLES	mg/L	0.12	0.15	0.01-0.63
CT	NMP/100mL	840	1281.07	200-4800

Fuente: Electro Oriente 2016

2.2 Cálculos efectuados para el diseño

A fin de definir la temperatura y la presión de diseño de todos equipos, se hizo uso de los criterios establecidos en la Norma PDVSA *MDP-01-DP-10 "Temperatura y Presión de diseño"*. Los mismos se presentan en las Tabla 1.3 y Tabla 1.4.

Tabla 1.3 Temperatura de Diseño

Temperatura de Operación, °C	Temperatura de diseño, °C
$T < -17,78$	$T - 1,11$
$0 < T < 398,89$	$T + 10$
$T > 398,89$	T

Tabla 1.4 Presión de Diseño

Presión de Operación, atm	Presión de diseño, atm
$P < 2,382$	3,402
$2,382 < P < 17,011$	$P_d + 1,701$
$17,011 < P < 39,467$	$P_d + 10\%$
$39,467 < P < 78,933$	$P_d + 3,947$
$P > 78,933$	$P_d + 5\%$

2.2.1 Balance de Materia y Energía

El resto de los cálculos individuales de cada equipo se presentan a continuación:

A.1. Separador API

Para el dimensionamiento del separador API será necesario contar con la siguiente información:

Datos Iniciales:

- $P=1.00 \text{ atm}$
- $T=40^\circ\text{C}$
- $Q_{in}=5.96 \text{ m}^3/\text{h}$
- $\rho_w=994.10 \text{ kg/m}^3$
- $\rho_o=936.44 \text{ kg/m}^3$
- $\mu_w=0.000653 \text{ kg/(m*s)}$
- $r_o=0.00015 \text{ m}$

• **Profundidad del separador**

Rango de 0.91 a 2.44 m; se asume 20% de 0.91 m, $D=0.182 \text{ m}$

• **Ancho de canal**

Rango entre 1.83 y 6.10 m; se asume el 20% de 1.83 m, $W_c=0.366 \text{ m}$

• **Factor de corto circuito**

Se toma $F_{cc}=1.2$

• **Relación Profundidad – Ancho de canal**

Rango entre 0.3 y 0.5; se asume $D/W_c=0.5$

• **Relación Largo – Ancho**

Rango igual o superior a 5; se asume $L/W_c=5$

a. Velocidad de ascenso de las gotas de hidrocarburo

$$v_{as} = 0.00108 \text{ m/s}$$

Se asume que el radio equivalente de la gota de hidrocarburo es 0,00015 m.

b. Velocidad horizontal

Calculado por la ec.; $v_h = 0.0162 \text{ m/s}$, este valor es $> 0.01524 \text{ m/s}$, entonces se asume $v_h = 0.01524 \text{ m/s}$

c. Factor de turbulencia

De la gráfica 2.1,

$$v_h/v_{as} = 14.079$$

$$F_T = 1.33$$

d. Factor de diseño

$$F = 1.60$$

e. Área superficial mínima

$$A_s = 2.45 \text{ m}^2$$

f. Área transversal

$$A_t = 0.11 \text{ m}^2$$

g. Número de canales

$N_c=1.631$, aproximadamente 2, número final de canales se asume $N_c=2$

h. Profundidad definitiva del canal

$$D_c=0.182 \text{ m}$$

Se mantiene la relación $D/W_c=0.5$

i. Longitud de canal

$$L_c=4.1 \text{ m}$$

j. Altura de salida del líquido

$$H = 0.25 \text{ m}$$

k. Tiempo de retención

$$t_r=0.046 \text{ h}$$

A.2. Separador CPI

Antes de iniciar con los cálculos para dimensionar el separador CPI, es imprescindible disponer de la siguiente información:

- $P=1 \text{ atm}$
- $T=40^\circ\text{C}$
- $Q_{in}= 3.58 \text{ m}^3/\text{h}$
- $\rho_o=936.4422 \text{ kg/m}^3$
- $r_o=0.00015 \text{ m}$

Tesis: "Diseño de una unidad piloto para simulación de tratamientos de aguas residuales oleosas utilizando el software HYSYS v3.2 en la Facultad de Ingeniería Química-UNAP"

- $\rho_w=994.1 \text{ kg/m}^3$
- $\mu_w=0.0006532$
- $v_w=6.571 \times 10^{-7}$

• **Dimensiones de la placa**

No deben ser mayores que 2 m, se asume para $W_p=0.5 \text{ m}$, $L_p=1.1 \text{ m}$ y $e_p=1 \text{ cm}$

• **Inclinación de las placas,**

Entre 45 y 60°, se asume $\theta_p=45^\circ$

• **Separación entre las placas**

Entre los 2 y 5 cm, se asume $s_p=5 \text{ cm}$

a. Velocidad crítica de sedimentación

$$v_{sc} = 0.05226 \text{ m/s}$$

Donde $\beta=0.06$ por tratarse de un material no uniforme,

$F_r=0.03$ por tratarse de un flujo laminar

b. Velocidad entre las placas

$$v_p = 0.005322 \text{ m/s}$$

$\alpha=1.3$ para el flujo laminar entre las placas.

c. Verificación del número de Reynolds, Re

Entre 400 y 1600,

$$Re = 404.955$$

d. Área Superficial

$$A_s = 0.187 \text{ m}^2$$

e. Número de placas, N_p

$$N_p = 5.3, \text{ se considera } 5$$

Se asume $W=0.15 \text{ m}$

f. Longitud del separador, L

$$L = 0.4 \text{ m}$$

A.3. Sistema de flotación por aire disuelto (DAF)

- $P=1 \text{ atm}$
- $T=40^\circ\text{C}$
- $Q_{in}=3.58 \text{ m}^3/\text{h}$
- $C_{S \text{ in}}=150 \text{ mg/L}$
- $C_{S \text{ out}}=20 \text{ mg/L}$ (entre 12.5 a 20 mg/L)
- $C_{o \text{ in}}=100 \text{ mg/L}$ (entre 30 a 150 mg/L)
- $C_{o \text{ out}}=20 \text{ mg/L}$ (entre 14 a 23 mg/L)
- $CL=0.04$
- $P_{man}=1.3 \text{ atm}$ (entre 1 a 4.08 atm)
- $Cg=50 \text{ mg/L}$
- $\%S_{lodo}=80$

- **Factor de eficiencia**

Entre 0.5 y 0.8, se asume $F_E=0.52$

- **Tiempo de retención en el tanque presurizado**

Entre 1 y 3 min, se asume $tr_{pres}=3 \text{ min}$

- **Tiempo de retención en el tanque de floculación**

Entre 5 y 15 min, se asume $tr_{floc}=10 \text{ min}$

- **Tiempo de retención en el tanque de flotación**

Entre 20 y 40 min, se asume $tr_{flot}=20 \text{ min}$

a. Relación aire /sólido,

A 20 mg/L, $m_a/m_s=0.03$

b. Tasa de desbordamiento superficial,

Entre 2.445 y 9.779 $\text{m}^3/(\text{m}^2\cdot\text{h})$, $T_s=2.683 \text{ m}^3/(\text{m}^2\cdot\text{h})$

c. Solubilidad del aire en agua

A 40°C y 1 atm: $C_s=17.75$ mg/L en agua pura, para aguas residuales se asume 70% del valor teórico, siendo $C_s=12.43$ mg/L

d. Caudal de reciclo

$$Q_R = 1.31 \text{ m}^3/\text{h}$$

e. Porcentaje de reciclo

Entre 30 y 40%, $\%R = 36.74$

f. Área superficial del tanque de flotación

$$A_{sflot} = 1.82 \text{ m}^2$$

g. Volumen del tanque de flotación

$$V_{flot} = 1.63 \text{ m}^3$$

h. Profundidad del tanque de flotación

Entre 0.91-2.44 m, $D_{flot} = 0.91$ m

i. Volumen del tanque presurizado

$$V_{pres} = 0.066 \text{ m}^3$$

j. Volumen del tanque de floculación

$$V_{floc} = 0.82 \text{ m}^3$$

k. Flujo másico de lodo (sólidos suspendidos)

$$m_{lodoS} = 0.61 \text{ kg/h}$$

l. Flujo másico de lodo (coagulante)

$$m_{lodoC} = 0.007 \text{ kg/h}$$

m. Flujo másico de lodo (total), m_{lodo}

$$m_{lodo} = 0.615 \text{ kg/h}$$

n. Caudal de lodo, Q_{lodo}

$$Q_{lodo} = 0.77 \text{ m}^3 / \text{h}$$

A. 4. Sistema de aeración

- $P=1 \text{ atm}$
- $T=40^\circ\text{C}$
- $Q_{in}=3.58 \text{ m}^3$
- $DBO_{in}=250 \text{ mg/L}$ (entre 250-350 mg/L)
- $DBO_{out}=50 \text{ mg/L}$

• **Tiempo de retención**

Entre 3 y 5 h, se asume $t_r=1 \text{ h}$

• **Profundidad o nivel de agua en el tanque**

Entre 1.83 y 4.57 m, se asume $D_w=1 \text{ m}$

• **Relación Ancho / Profundidad del tanque**

Entre 1.5 y 2, se asume $W/D=1.5$

• **Altura libre sobre el nivel del agua (Freeboard), HF**

Para aeradores de superficie altura no sea menor a 0.91 m, se asume $HF=0.91$

Para aeradores de difusión un valor estándar de 0.46 m, se asume $HF=0.46$

• **Porcentaje de exceso de oxígeno**

20% de exceso de oxígeno, se asume $\%O_2=25.2$

• **Temperatura del aire**

Se asume, $T_a=40^\circ\text{C}$

• **Tipo de aerador**

Se considera eficiencia de aerador poroso, $E=12\%$

• **Remoción de DBO**

$DBO=80\%$

a. Volumen de agua

$$V_w = 3.58 \text{ m}^3$$

b. Ancho del tanque

$$W = 1.5 \text{ m}$$

c. Largo del tanque

$$L = 2.38 \text{ m}$$

d. Profundidad del tanque

$$D = 1.46 \text{ m}$$

e. Volumen del tanque

$$V = 5.22 \text{ m}^3$$

f. Requerimiento de oxígeno

$$m_{O_2} = 0.022 \text{ kg/h}$$

g. Requerimiento de aire

$$m_a = 0.096 \text{ kg/h}$$

h. Consumo energético

Caudal de aire necesario

$$Q_a = 10.87 \text{ m}^3/\text{h}$$

Potencia requerida

$$p = 1.7 \text{ hp}$$

A.5. Sedimentador o Clarificador

- $P=1 \text{ atm}$
- $T=40^\circ\text{C}$
- $Q_{in,av}=3.58 \text{ m}^3/\text{h}$
- $Q_{in,p}=3.935 \text{ m}^3/\text{h}$
- $C_S=250 \text{ mg/L}$

- **Porcentaje de recicló**

Entre 0 y 30%, se asume $\%R=30$

- **Tiempo de retención**

Se asume, $t_r=10 \text{ min}$

- **Razón de alimentación de sólidos (promedio)**

Entre 4 y 6 $\text{kg}/(\text{h}\cdot\text{m}^2)$, se asume $R_{sav}=4 \text{ kg}/(\text{h}\cdot\text{m}^2)$

- **Razón de alimentación de sólidos (pico)**

Valor recomendado es, $R_{sp}=10 \text{ kg}/(\text{h}\cdot\text{m}^2)$

- **Profundidad de la capa de lodo en el fondo del clarificador**

Entre 0.6 y 0.9 m, se asume $D_{lodo}=0.6 \text{ m}$

- **Relación Largo/Ancho**

Entre 2 y 5, se asume $L/W=5$

- **Relación Largo/Profundidad**

Entre 5 y 20, se asume $L/D=20$

- **Número de unidades**

Se asume, $N_{rec}=N_{cir}=1$

- a. **Flujo másico de sólidos**

$$m_s = 1.16 \text{ kg/h}$$

- b. **Área superficial total requerida**

$$A_s = 0.29 \text{ m}^2$$

- c. **Área superficial por clarificador, A_s'**

Se asume $N=1$, $A_s' = 0.041 \text{ m}^2$

- d. **Dimensiones del clarificador**

- **Clarificador rectangular**

Se asume, $J = 5$ y $K = 20$

$$A_s = 0.041 \text{ m}^2$$

$$L = 1.21 \text{ m}$$

$$W = 0.24 \text{ m}$$

$$D = 0.85 \text{ m}$$

- **Clarificador circular**

$$d = 0.61 \text{ m}$$

$$D = 2.05 \text{ m}$$

e. Tasa de desbordamiento superficial

Entre 5.17 y 15.52 $\text{m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$, $HLR = 12.31 \text{ m}^3/(\text{m}^2 * \text{h})$

f. Tasa de desbordamiento perimetral

Entre 0.34 y 2.21 $\text{m}^3/(\text{m} \cdot \text{h})$, $WLR = 1.87 \text{ m}^3/(\text{m} * \text{h})$

Perímetro del clarificador

Circular $pe=1.91 \text{ m}$ y rectangular $pe = 2.89 \text{ m}$

A.6. Cloración

- $P=1 \text{ atm}$

- $T=40^\circ\text{C}$

- $Q_{in\ av}=3.58 \text{ m}^3/\text{h}$

- $Q_{in\ p}=3.93 \text{ m}^3/\text{h}$

- $Cc=1.35 \text{ mg/L}$

- $Cc=60\%$

- **Tiempo de contacto o retención**

Se asume, $t_r=30 \text{ min}$ (promedio) y $t_r=40 \text{ min}$ (pico)

- **Número de pantallas (baffles) dentro del tanque**

Entre 3 y 11, $N_B=5$

• **Ancho del canal**

Se asume, $W_C=1\text{ m}$

• **Profundidad del agua**

Se asume, $D_W=0.9\text{ m}$

• **Altura libre sobre el nivel del agua (Freeboard)**

Se asume, $H_F=0.5\text{ m}$

a. Volumen del tanque

$$V = 2.62\text{ m}^3$$

b. Relación Profundidad/Ancho

Menor a 1, se asume $D_C/W_C=0.95$

c. Área transversal del canal

$$A_t = 0.9\text{ m}^2$$

d. Longitud total del canal

$$L_C = 2.91\text{ m}$$

e. Longitud de cada paso

$$L_n = 0.58\text{ m}$$

f. Relación Largo/Ancho

Entre 40 y 70, se asume $L/W_C=40$

g. Dimensiones del tanque

Profundidad del tanque

$$D = 1.4\text{ m}$$

Ancho del tanque

$$W = 5\text{ m}$$

h. Consumo de cloro

$$m_{Cl} = 0.005 \text{ kg/h}$$

i. Caudal de cloro necesario

$$Q_{Cl} = 8.05 * 10^{-5} \text{ m}^3/\text{h}$$

2.2.2 Cálculo hidráulico de la red de tuberías (líneas)

Las propiedades físicas del fluido necesarias para los cálculos hidráulicos como son: temperatura de operación, densidad y viscosidad se muestran en la tabla 2.4, las características del tramo de tubería como su diámetro nominal, diámetro interno, área transversal y longitud se presentan en la tabla 2.5, mientras que los accesorios mecánicos presentes en la tubería se muestran en la tabla 2.6.

Tabla 2.4 Propiedades físicas del fluido.

Propiedad	Unidad	Valor
Temperatura de operación	°C	25
Densidad	Kg/m ³	994.1
Viscosidad	Kg/(m*s)	0,000653

Tabla 2.5 Características de las tuberías

Descripción	Unidad	Valor
Diámetro nominal	Pulg	3
Diámetro interno	m	0,0762
Área transversal	m ²	0,006
Longitud Total	m	13,5

Tabla 2.6 Accesorios mecánicos presentes en la tubería

Accesorio mecánico	Cantidad
Codo estándar 90°	3
Válvula check	6

Considerando un caudal de 5.96 m³/h con valor del área de tubería de 0.0762 m, tomada de la tabla 2.5 y sustituyendo en la ecuación:

$$v = \frac{5,96 \text{ m}^3/h}{0,006 \text{ m}^2}$$

$$v = 993,3 \text{ m/h} = 0,276 \text{ m/s}$$

Tomando como dato el valor calculado de velocidad y los valores diámetro, densidad y viscosidad de las tablas 2.4 y 2.5, sustituyendo se tiene:

$$Re = \frac{0,0762 \text{ m} \times 0,276 \frac{\text{m}}{\text{s}} \times 994,1 \text{ kg/m}^3}{0,000653 \text{ kg/m.s}}$$

$$Re = 32017,02$$

Con el número de Reynolds obtenido, el diámetro interno de la tubería y la rugosidad de la tubería asumida para tuberías nuevas ($\Theta=0,002 \text{ mm}$) del diagrama de Moody, se obtiene:

$$f = 0,020$$

Para el cálculo de las pérdidas por longitud de tubería se tomaron como datos los valores de longitud de la tabla 2.5, los valores obtenidos de velocidad y factor de fricción y se sustituyó en la ecuación se tiene:

$$h_L = 0,020 \times \frac{13,5 \text{ m}}{0,0762 \text{ m}} \times \frac{(0,276 \text{ m/s})^2}{2 \times 9,8 \text{ m/s}^2}$$

$$h_L = 0,014 \text{ m}$$

Tomando las relaciones para obtener K de la tabla xxx, la cantidad de accesorios y el factor de fricción, se tiene:

$$\text{Codo } 90^\circ: K = 3 \times 30 \times f = 3 \times 30 \times 0,02 = 1,8$$

$$\text{Válvula check: } K = 6 \times 50 \times f = 6 \times 50 \times 0,02 = 6$$

$$\text{Teniendo un K total de: } K_t = 7,8$$

Sustituyendo los valores obtenidos de velocidad y K total en la ecuación se tiene:

$$h_A = 7,8 \times \frac{(0,276 \text{ m/s})^2}{2 \times 9,8 \text{ m/s}^2}$$

$$h_A = 0,03 \text{ m}$$

Para obtener las pérdidas totales del tramo de descarga se sustituye los valores obtenidos de pérdida por longitud y por accesorios en la ecuación, se tiene:

$$h_f = 0,014 \text{ m} + 0,03 \text{ m}$$

$$h_f = 0,034 \text{ m}$$

Longitud de tramos

$$L_t = 13.5 \text{ m}$$

Diámetros de los tramos

$$D = 0.0762 \text{ m}$$

Caídas de presión y velocidades.

$$\Delta P = 0.27$$

$$v = 0,276 \text{ m/s}$$

2.2.3 Cálculo para la inyección de químicos

- Se considera como químico desemulsificante el propilenglicol (1,2-C3diol) y se inyecta a una concentración del 100% a razón de 0,17 L/h.
- Se considera como químico floculante el cloruro de aluminio (AlCl_3) y se inyecta a una concentración del 50% a razón de 0,60 L/h.
- Se inyectan 2,70 L/h de solución de soda cáustica al 45% para control de pH.
- La solución de hipoclorito inyectada en el tanque de desinfección es de 10% y se inyectan 5 ppm que equivale a 0,30 L/h.
- Como agente coagulante de los lodos en el proceso de filtrado se añadirán a los lodos provenientes del digester una solución de polielectrolito al 100%, a razón de 0,33 L/h y como ayuda a los procesos anticorrosivos se agrega trietanolamina en una proporción de 0,03 L/h.

Tabla 2.7 Consumo de químicos.

Nº	Nombre del químico	Servicio	Dosis (l/h)	Cosumo estimado (L)
1	Propilenglicol (100%)	Desemulsificante	0.17	62
2	Cloruro de aluminio (50%)	Floculante	0.60	214
3	Soda cáustica (Sol. 45%)	Control de pH	2.70	961
4	Poliectrolito (100%)	Floculante	0.33	119
5	Hipoclorito de sodio (10%)	Desinfección	0.30	107
6	Trietanolamina	Anti incrustante	0.03	10.4

2.2.4 Consumo de carga y tensión de los equipos eléctricos

Tabla 2.8 Consumo de energía eléctrica.

Descripción	Nº de unidades	Filosofía		Consumo de electricidad (Hp/Kw)	Tensión (V)
		Operativa	Respado		
Bomba 1	2	1	1	1.5/1.6	480
Bomba 2	2	1	1	1.5/1.6	480
Bomba 3	2	1	1	1.5/1.6	480
Agitador de tanque floculador	1	N/A	N/A	0.5/0.53	480
Motor	1	N/A	N/A	2/2.13	480

CAPÍTULO III: DISEÑO Y SIMULACIÓN DE LA UNIDAD

3.1 Diseño y simulación de la unidad

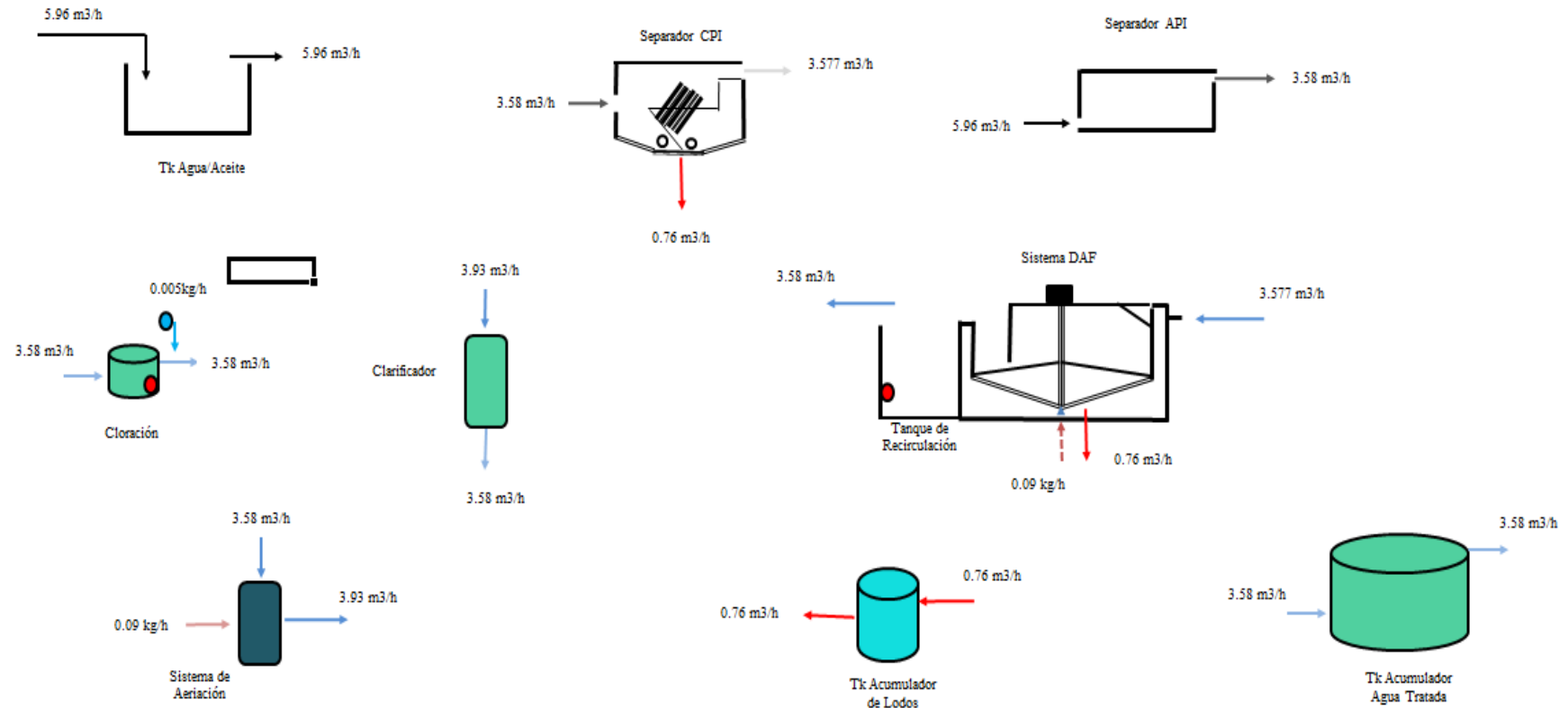
3.1.1 Diseño de la unidad

El primer paso para la etapa de diseño de la unidad es conocer las propiedades físico-químicas del material a tratar, esto permite establecer los requisitos que debe cumplir. El diseño consiste básicamente en identificar claramente cada uno de los subprocesos y los requisitos, determinando así los equipos y demás insumos de control necesarios para lograr cumplir con los requisitos establecidos por las normas ambientales para vertimiento a un cuerpo de agua.

Tabla 3.1 Diseño de las dimensiones de los equipos utilizado en la unidad piloto.

Equipo	Función	Alto (m)	Largo (m)	Ancho (m)
Tanque de almacenamiento	Almacenamiento de efluente	1.46	-----	2.50
Separador API	Separador físico	0.18	4.10	0.37
Separador CPI	Separador físico	1.10	0.37	0.50
Tanque desmulsificante	Tanque de química	0.27	-----	0.20
Tanque de floculantes	Tanque de química	0.41	-----	0.30
Tanque de soda cáustica	Tanque de química	0.68	-----	0.46
Tanque de polielectrolito	Tanque de química	0.34	-----	0.23
Tanque de Hipoclorito	Tanque de química	0.33	-----	0.22
Tanque DAF	Separación Físico Química	0.91	3.27	2.24
Tanque Presurización	Presurización del DAF	0.91	-----	1.00
Tanque Aceites recuperados	Almacenamiento de aceites	0.46	-----	0.38
Sedimentor o calificador	Separador mecánico	0.85	1.20	0.24
Tanque de desinfección	Ajuste de variables	0.90	2.00	1.00
Tanque de trietanolamina	Tanque de química	0.20	-----	0.10

Figura 3.1 Diseño de equipos para la unidad piloto de tratamiento de aguas residuales oleosas.



3.1.2 Diseño de la simulación de la unidad

Las simulaciones de procesos con el programa HYSYS versión 3.2 de Hyprotech se realizaron con el modelo termodinámico seleccionado en la simulación general como lo es el NRTL-Ideal. Con esto se determinaron las características físico-químicas de todas las corrientes, que van a servir de base para el dimensionado de equipos, tuberías y válvulas de control de presión como parte del desarrollo del proyecto.

El diseño tiene el fin de alcanzar las condiciones físico-químicas del agua, de acuerdo a las condiciones de trabajo como: presión, temperatura, flujo, densidad, viscosidad, entre otros; se utilizaron equipos de separación, líneas de flujo, tanques de almacenamiento, de aireación, de dosificación de químicos.

a. Características del efluente:

Tabla 2.2 PROMEDIO, DESVIACIÓN Y RANGO DE LOS PARÁMETROS FÍSICOQUÍMICOS DEL EFLUENTE

PARÁMETRO	UNIDAD	PROMEDIO	DESVIACIÓN	RANGO
T	°C	31.29	3.8	28-39
pH	Adm.	8.47	1.14	7.08-11.98
COLOR	Unid. Pt-Co	43.24	67.8	5-300
SST	mg/L	250.0	85.5	10-300
DBO	mg/L	120.59	80.5	12-307
DQO	mg/L	366.82	221.33	66-854
AGMH	mg/L	150.0	82.42	1.00-400
NT	mg/L	12.65	13.62	2.00-48
FT	mg/L	0.53	0.98	0.01-3.73
SULFUROS	mg/L	1.73	2.05	0.01-6
FLUORUROS	mg/L	1.32	1.48	0.01-5.33
FENOLES	mg/L	0.07	0.05	0.01-0.21
CT	NMP/100mL	1343.53	1734.91	200-4750

Fuente: Petroperú 2016

b. Condiciones de entrada a la simulación

Presión : 1 atm

Temperatura : 25°C

Flujo : 5.96 m³/h

Modelo Termodinámico : NRTL-Ideal

Unidad de Ingeniería : Sistema Intenacional

Composición : Aguas oleosas

c. Características físico-químicas / especificaciones de alimentación y productos

Para acondicionar esta agua, es necesario eliminar tanto los hidrocarburos libres y emulsionados como los sólidos en suspensión, los disueltos, los cloruros y la DQO, además se requieren productos químicos acondicionadores para facilitar el tratamiento.

Para el proceso de simulación se toman las siguientes características y especificaciones técnicas, que se presentan a continuación:

- La capacidad nominal de la unidad piloto de tratamiento de aguas oleosas es de 5.962 m³/h.
- Se considera como químico desémulsificante el propilenglicol (1,2-C3diol) al 100% y dosificación de 40 ppm en una corriente de 0.17 l/h de solución agua + desémulsificante.
- Se considera como químico floculante el cloruro de aluminio (AlCl₃) al 50% y dosificación de 50 ppm en una corriente de 0.6 l/h de solución agua + floculante.
- Se considera como químico para ajustar el pH, la soda cáustica al 45% y dosificación de 2.7 l/h, para un pH de 4.4 unidades.
- La solución de hipoclorito inyectada en el tanque de desinfección es al 10% de concentración y dosificación de 5 ppm en una corriente de 0.30 l/h.
- Las condiciones de descarga de las bombas se consideran: 5,96 m³/h, 25°C y 1 atm.
- Para el proceso de simulación se tomaron como premisas, las especificaciones técnicas:
- La eficiencia de remoción de hidrocarburos de las unidades de flotación DAF es del 90% y se remueven 6 ppm de DQO por cada ppm de hidrocarburo removido.
- Para mejorar la eficiencia de separación de los lodos, se inyecta una solución de polielectrolito (AlCl₃) al tanque floculador.

Tesis: "Diseño de una unidad piloto para simulación de tratamientos de aguas residuales oleosas utilizando el software HYSYS v3.2 en la Facultad de Ingeniería Química-UNAP"

- La eficiencia de remoción de sólidos suspendidos de las unidades de flotación DAF es del 80%
- El valor de DQO a la salida de los tanques, en el que se elimina un 80% y 45% respectivamente de cada parámetro mencionado.
- Las 03 etapas del proceso de tratamiento de efluentes: eliminación de hidrocarburos, ajuste de las variables y ajuste de sólidos suspendidos-desinfección son continuas.
- La presión de operación del agua presurizada hacia las unidades DAF es de 1.00 atm, luego de ser tomada a 1.34 atm las líneas de aire de servicio.
- La recirculación (agua presurizada) en las unidades de flotación DAF es el 40% del flujo de entrada correspondiente.
- La caída de presión máxima a 0.27 atm.

Producto de la 1ra fase: La finalidad de esta etapa fue reducir en un 90% la concentración de hidrocarburos, 80% los sólidos en suspensión y el DQO en una relación de 6 ppm de DQO/1 ppm de hidrocarburos removidos presentes en el agua sometida a tratamiento, mediante el uso de equipos separadores de placas como el CPI (Interceptor de Placas Corrugadas).

Los efluentes son recolectados en los tanques de almacenamiento principales a la entrada de la planta, fueron bombeados para dosificar al sistema de separación API a una tasa de 5.962 m³/h mediante las bombas de entrada a la planta de tratamiento. En el API se llevo a cabo la primera fase de separación de hidrocarburos, sólidos suspendidos y DQO, enviando estos al tanque de aceites recuperados para su posterior traslado a separadores CPI, este equipos tiene una eficiencia de operación del 80% y esta conformado por un empaque de placas inclinadas a 45° que permitió la separación de los hidrocarburos, sólidos suspendidos, disminución de DQO por la acción de la gravedad.

Producto de la 2da fase: En la segunda fase, posterior a la incorporación de los productos químicos como floculantes, desemulsificante y soda cáustica que modificaron propiedades del efluente en los tanques de mezcla antes del DAF para facilitar los procesos, se unió la separación de hidrocarburos con el control de las variables biológicas. El equipo de flotación por aire disuelto contribuyó con la separación de los hidrocarburos y sólidos suspendidos, para luego seguir a los reactores quienes desarrollaron el tratamiento biológico, para remover los sólidos no

Tesis: "Diseño de una unidad piloto para simulación de tratamientos de aguas residuales oleosas utilizando el software HYSYS v3.2 en la Facultad de Ingeniería Química-UNAP"

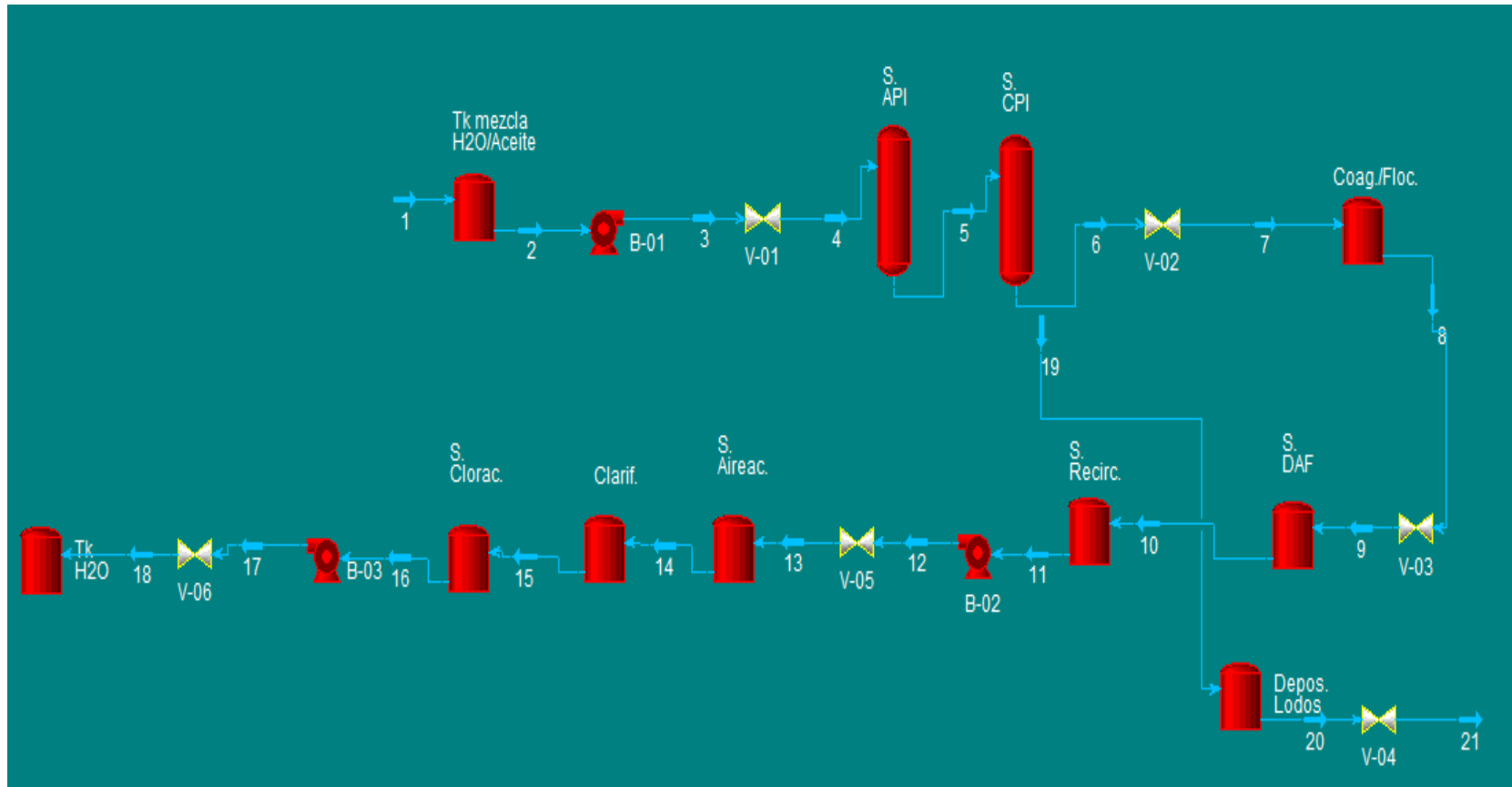
sedimentables y la carga orgánica (DBO, DQO) disuelta en el efluente. Siendo los microorganismos, responsables de la degradación de la materia orgánica y de la estabilización de los desechos orgánicos.

La fase comenzó con una entrada del efluente al DAF, donde se elimina un 90% de hidrocarburos y 80% de sólidos suspendidos, permiten remover el 80% del oxígeno disuelto necesario para la degradación química de los contaminantes orgánicos que contiene el agua, (DQO) y un 45% de sólidos disueltos como NaCl. Este sistema está constituido por el DAF.

Producto de la 3era fase. Esta etapa se hace la desinfección del agua mediante la adición de hipoclorito de sodio al tanque de desinfección, y la eliminación de los sólidos en suspensión mediante las bombas. La adición de hipoclorito de sodio fue al 10% mediante un paquete de inyección de químico, conformado por un tanque atmosférico y unas bombas.

Por último en el proceso, los analizadores instalados en la tubería de salida de la planta de tratamiento indicaran la concentración de hidrocarburos y DQO, si están fuera del rango permitido ($DQO > 350$ y concentración de crudo > 20), entonces el agua retornará hacia el tanque de almacenamiento principal para su reprocesamiento. La medición de sólidos disueltos no será necesaria ya que los mismos son de origen orgánico y no conductivo.

Figura 3.2 Simulación del proceso



3.2 Lista de equipos y líneas

N°	Equipo
1	Tanque de almacenamiento
	Separador API
2	Separador CPI
	Tanque desémulsificante
3	Tanque de floculantes
	Tanque de soda cáustica
4	Tanque de polielectrolito
	Tanque de Hipoclorito
5	Tanque DAF
	Tanque Presurización
6	Tanque Aceites recuperados
	Sedimentor o clarificador
7	Tanque de desinfección
	Tanque de trietanolamina

Tabla 3.2 Lista de equipos.

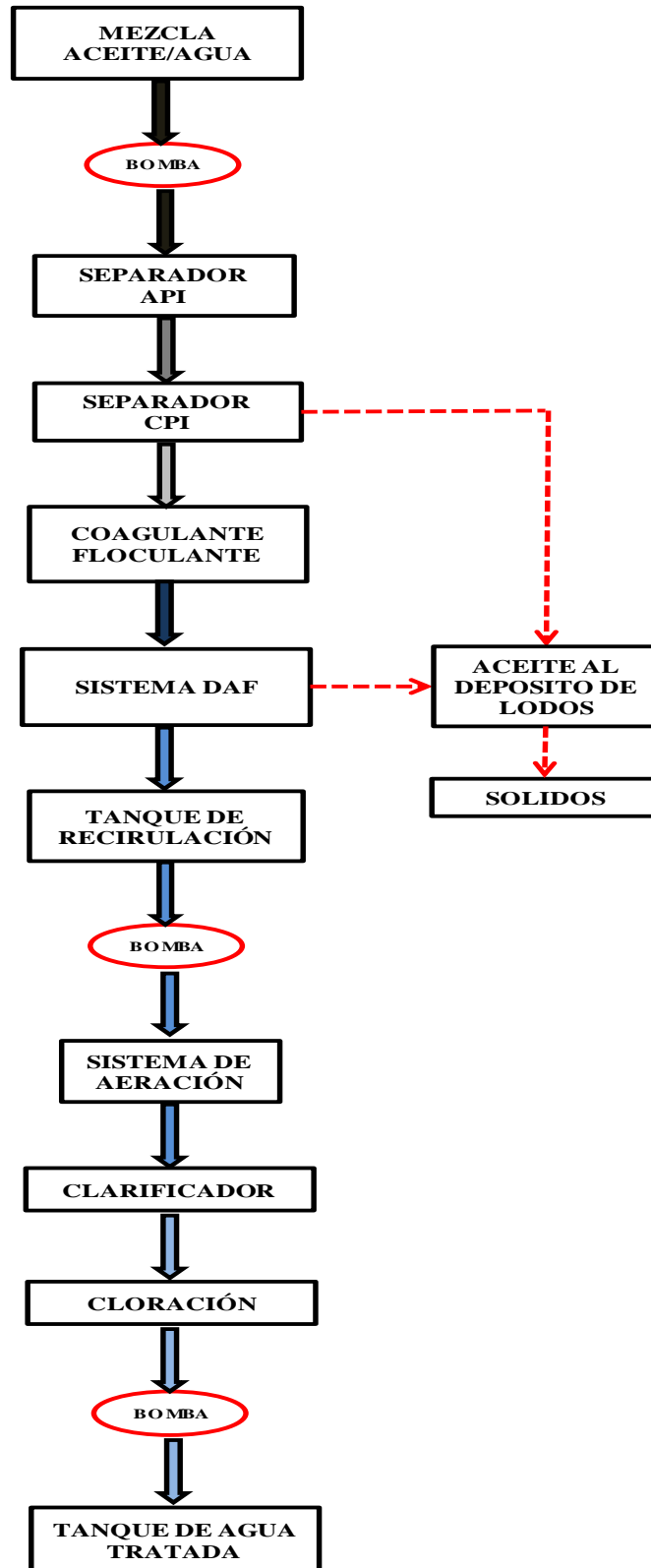
Líneas	Accesorios
L01	Tubería
	Bomba 1
	Válvula 1
L02	Tubería
L03	Tubería
	Válvula 2
L04	Tubería
	Codo
L05	Tubería
	Válvula 3
L06	Tubería
L07	Tubería
	Codo
L08	Tubería
	Válvula 4
	Codo
L09	Tubería
	Bomba 2
	Válvula 5
L10	Tubería
L11	Tubería
L12	Tubería
	Bomba 3
	Válvula 6

Tabla 3.3 Lista de Líneas y accesorios.

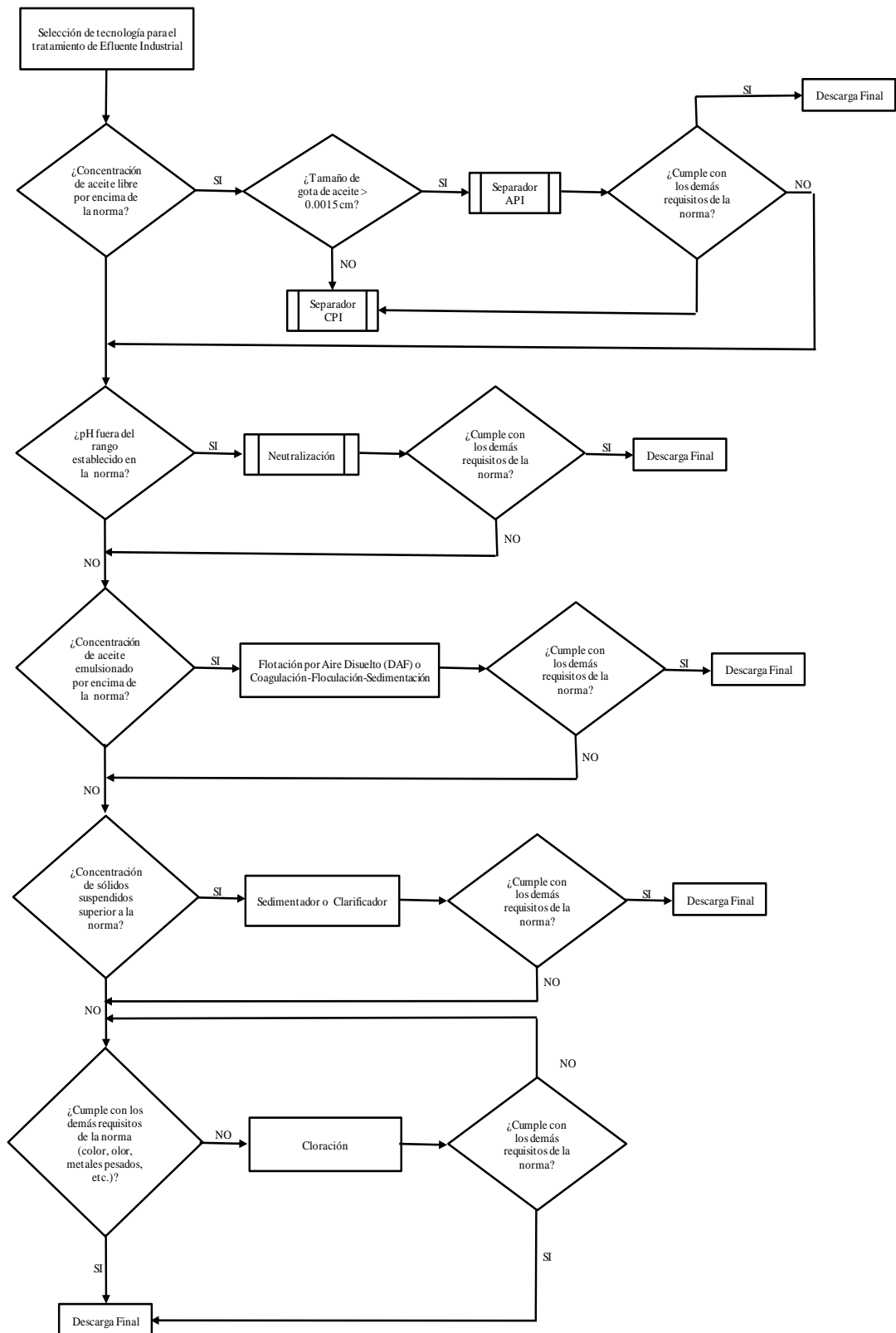
Materiales mecánicos	Cantidad
Tubería AC A-53 GRB cédula 40 de 3 pulg. Φ	13.5 m
Codo soldable AC A-234 cédula 40 de 3 pulg. Φ	3 unid.

Tabla 3.4 Materiales mecánicos.

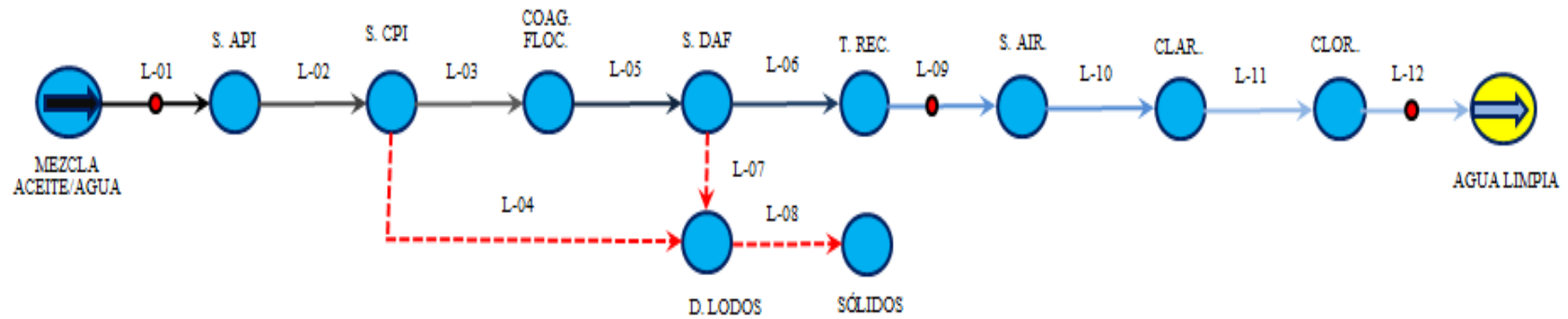
3.3 Diagrama de bloques



3.4 Diagrama de flujo de proceso



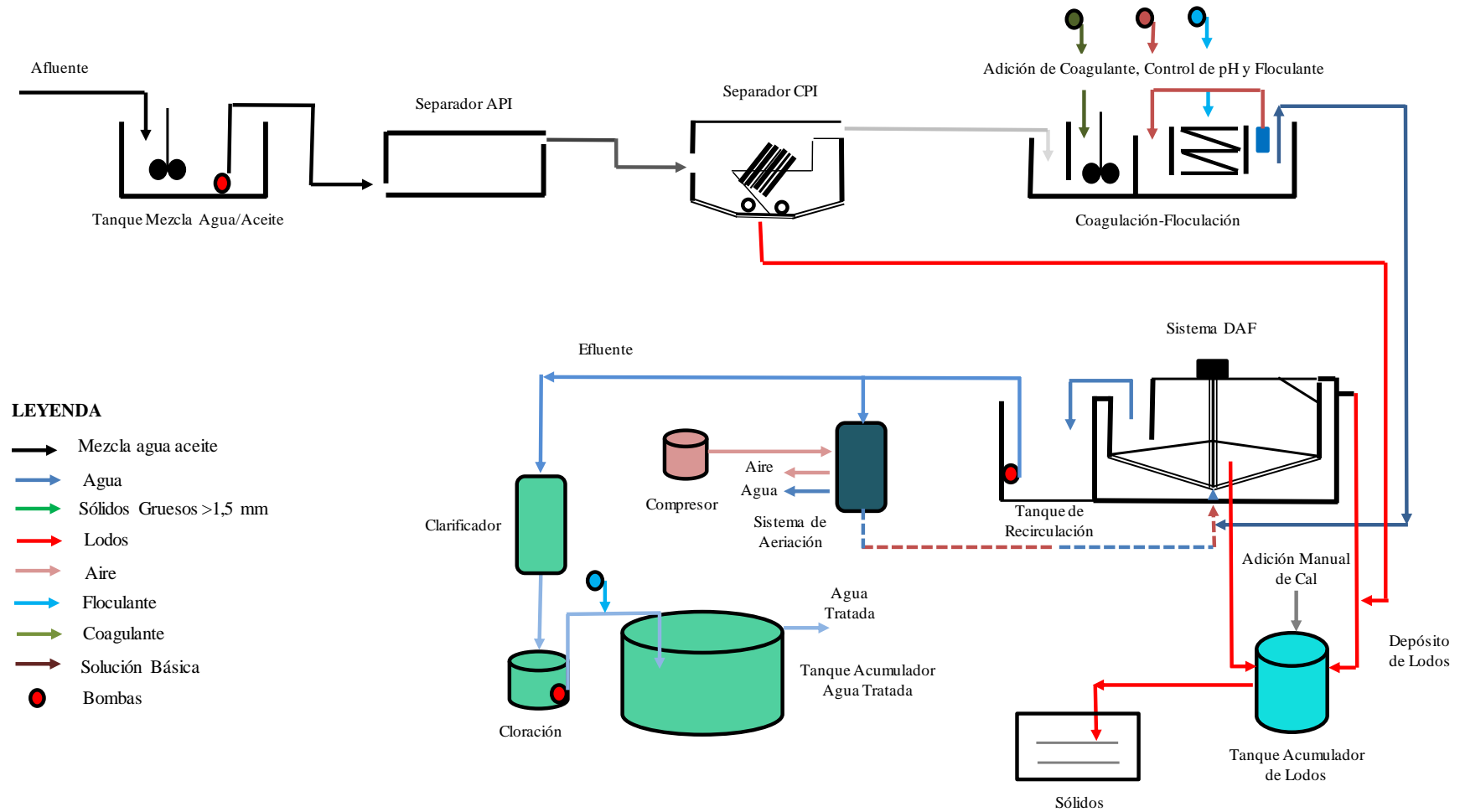
3.5 Diagrama de tuberías (líneas)



LEYENDA:

- L-01, 02, 03 ____ L-12 : LÍNEA DE EFLUENTE
- S. API : SEPARADOR API
- S. CPI : SEPARADOR CPI
- COAG. FLOC. : COAGULANTE / FLOCULANTE
- S. DAF : SISTEMA DAF
- T. REC. : TANQUE DE RECIRCULACIÓN
- D. LODOS : DEPÓSITO DE LODOS
- S. AIR. : SISTEMA DE AIREACIÓN
- CLAR. : CLARIFICADOR
- CLOR. : CLORACIÓN

3.6 Esquema General para el Tratamiento de Efluentes



3.7 Servicios industriales

Los servicios que se incluyen en el proyecto son: aire de servicio, paquete de inyección de químicos y energía eléctrica.

3.7.1 Aire de servicio

La presión requerida para el tanque de presurización será de 1 atm.

El aire de servicio del tanque de presurización será suministrado desde la Bomba 2.

Tabla 3.5 Consumo de aire de servicio de tanque de presurización

Equipo	Requerimiento de aire a 1 atm (Kg/h)
Tk presurización DAF	0.022
TOTAL	0.022

3.7.2 Inyección de químicos

En el proceso de mezclado se inyectará diversos químicos con el fin de ajustar distintas condiciones de diseño en los equipos.

Tabla 2.7 Consumo de químicos.

Nº	Nombre del químico	Servicio	Dosis (l/h)	Cosumo estimado (L)
1	Propilenglicol (100%)	Desemulsificante	0.17	62
2	Cloruro de aluminio (50%)	Floculante	0.60	214
3	Soda cáustica (Sol. 45%)	Control de pH	2.70	961
4	Poliectrolito (100%)	Floculante	0.33	119
5	Hipoclorito de sodio (10%)	Desinfección	0.30	107
6	Trietanolamina	Anti incrustante	0.03	10.4

Tesis: "Diseño de una unidad piloto para simulación de tratamientos de aguas residuales oleosas utilizando el software HYSYS v3.2 en la Facultad de Ingeniería Química-UNAP"

3.7.3 Energía Eléctrica

Se presentan los requerimientos de potencia eléctrica y tensión de los paquetes eléctricos pertenecientes a la unidad piloto de tratamiento.

Tabla 2.8 Consumo de energía eléctrica.

Descripción	N° de unidades	Filosofía		Consumo de electricidad (Hp/Kw)	Tensión (V)
		Operativa	Respado		
Bomba 1	2	1	1	1.5/1.6	480
Bomba 2	2	1	1	1.5/1.6	480
Bomba 3	2	1	1	1.5/1.6	480
Agitador de tanque floculador	1	N/A	N/A	0.5/0.53	480
Motor	1	N/A	N/A	2/2.13	480

3.8 Disposición adecuada

La disposición adecuada será de acuerdo a lo siguiente:

3.8.1 Espacio de servicio

El acceso a la zona donde se instalará la unidad debe estar restringido al personal autorizado solamente.

Para permitir un uso y un mantenimiento seguros de la unidad, ésta se deberá instalar en un lugar con suficiente espacio despejado. Este lugar se identificará como "espacio de servicio".

3.8.2 Entorno de instalación

El entorno debe cumplir los siguientes requisitos:

- Intervalo de temperatura entre +5°C y +50°C, el aire de ambiente en un periodo de 24 h no debe superar los +45°C.
- Intervalo de humedad relativa entre 30 y 95% (sin condensación).

3.8.3 Cimentación / Fijación

Se anclara la unidad con pernos, utilizando orificios de montaje prefabricados.

Se pueden solicitar dispositivos opcionales para el anclaje en la cimentación.

3.8.4 Conexiones con la unidad

Hay que conectar la unidad a las fuentes de alimentación (eléctricas).

CAPÍTULO IV: CONDICIONES DE OPERACIÓN

4.1 Manual de operación

Este Manual de Operaciones ha sido preparado para la unificación de criterios entre los operadores encargados de la unidad piloto de aguas residuales oleosas. Se ha incluido información considerada relevante como: la operación en la fase de separación y flotación de aguas residuales oleosas, depósitos de lodos, clarificador y cloración que implica el desarrollo de cada actividad.

4.1.1 Operación en la Fase de Separación

Esta fase está destinada a separar el hidrocarburo libre de las aguas residuales. El contenido de agua en el hidrocarburo separado depende de la calidad de hidrocarburo. Una bomba B-01 de alimentación bombea el agua oleosa emulsionada desde el tanque de almacenamiento al separador API donde se recuperará el hidrocarburo las veces que sea necesario por presencia de hidrocarburo en las superficies del separador API. Luego pasa al separador CPI donde el agua residual oleosa pasa a través de las placas con el fin de separar el hidrocarburo. El hidrocarburo que continua emulsionado se canaliza hacia un tanque donde se coagula y flocula la finalidad del tratamiento químico es romper el agua emulsionada en partículas y convertirlas en flocas más grandes, que se podrán separar fácilmente mediante flotación.

4.1.2 Operación en la Fase de Flotación

En la fase de flotación las haciendo circular agua tratada y añadiéndole aire comprimido en un depósito separado. Mientras el agua dispersa se libera a una presión más baja en el depósito, se van formando microburbujas. En el depósito, las burbujas de gas se unen a los sólidos formando flocas de sólidos/gas que son más ligeras que el agua y por tanto suben y ayudan a que el hidrocarburo alcance la superficie, de donde se desespuma a un tanque de aceite interno. Desde el tanque de aceite interno el aceite se bombea al depósito de lodos. El agua se recoge en un depósito integrado para un tratamiento más completo en la fase de flotación.

4.1.3 Depósito de lodos

El depósito de lodos es un depósito fabricado con acero al carbono y colocado sobre tierra.

4.1.4 Operación clarificador o sedimentador

Esta operación permite la clarificación del agua al separar los sólidos de la fase acuosa por acción de la gravedad, también permite remover aceite emulsionado por acción conjunta con coagulantes y floculantes.

4.1.5 Operación cloración

Esta operación involucra la desinfección selectiva de los microorganismos patógenos, se inyecta cloro a la línea de descarga, el cual reacciona con muchos compuestos químicos en el agua formando componentes nuevos y menos ofensivos.

4.1.6 Situaciones de emergencia

Falla de bombas

- Cuando la operación normal se ve interrumpida por falla de bombas, es necesario tomar medidas que permitan solucionar las interrupciones a fin de normalizar la operación, poner fuera de servicio las bombas que tengan fallas y cumplir con el mantenimiento preventivo o predictivo.
- Ensuciamiento de válvulas, para lo cual se debe retirar la válvula y limpiarla retirando todo tipo de material extraño.
- Elevado caudal, restringir parcialmente la válvula para reducir la turbulencia en el canal hacia el separador API y CPI.

4.1.7 Procedimientos no rutinarios

- Limpieza de los equipos de la unidad piloto de tratamiento de aguas residuales oleosas.
- Mantenimiento preventivo o predictivo.

Tesis: "Diseño de una unidad piloto para simulación de tratamientos de aguas residuales oleosas utilizando el software HYSYS v3.2 en la Facultad de Ingeniería Química-UNAP"

- Puesto en servicio de los equipos.

4.2 Memoria de cálculo

Los cálculos se realizaron en hojas de cálculos en Excel.

4.2.1 Cálculos y condiciones del separador API.

4.2.2 Cálculos y condiciones del separador CPI.

4.2.3 Cálculos y condiciones del sistema DAF.

4.2.4 Cálculos y condiciones del sistema de aireación.

4.2.5 Cálculos y condiciones del clarificador o sedimentador.

4.2.6 Cálculos y condiciones del sistema de cloración.

4.2.1 Cálculos y condiciones del separador API.

SEPARADOR API

SIMBOLOGÍA

Simb.	Descripción	Unidad	Simb.	Descripción	Unidad
A_s	Área Superficial Mínima	m^2	Q_{in}	Caudal de entrada del afluente	m^3/h
A_t	Área Transversal	m^2	r_o	Radio Equivalente de Partícula (Aceite)	m
D	Profundidad del Separador	m	S_o	Gravedad Específica Hidrocarburo	
F	Factor de Diseño		S_w	Gravedad Específica Agua	
F_{cc}	Factor de Corto Circuito		T	Temperatura de Operación	$^{\circ}C$
F_t	Factor de Turbulencia		T_d	Temperatura de Diseño	$^{\circ}C$
H	Altura de Salida del Líquido	m	v_{as}	Velocidad de Ascenso (Aceite)	m/s
L	Longitud del Separador	m	v_h	Velocidad Horizontal	m/s
L_c	Longitud del Canal	m	W_c	Ancho de Canal	m
N_c	Número de Canales		μ_w	Viscosidad Absoluta del Agua	$kg/(m \cdot s)$
P	Presión de Operación	atm	ρ_o	Densidad del Aceite (Seco)	kg/m^3
P_d	Presión de Diseño	atm	ρ_w	Densidad del Agua	kg/m^3

DATOS DE ENTRADA

- Los datos relacionados con las condiciones de operación, es decir, presión y temperatura.
- Datos sobre el afluente a ser tratado: caudal de agua, caudal de aceite, densidad y viscosidad del agua T y P, densidad del aceite seco y radio equivalente de las partículas de aceite.

TEMPERATURA Y PRESIÓN DE DISEÑO

La temperatura (T_d) y Presión (P_d) de diseño se determinan de acuerdo a las siguiente tablas:

Temperatura de Operación, $^{\circ}C$	Temperatura de diseño, $^{\circ}C$	Presión de Operación, atm	Presión de diseño, atm
$T < -17,78$	$T - 1,11$	$P < 2,382$	3,402
$0 < T < 398,89$	$T + 10$	$2,382 < P < 17,011$	$P_d + 1,701$
$T > 398,89$	T	$17,011 < P < 39,467$	$P_d + 10\%$
		$39,467 < P < 78,933$	$P_d + 3,947$
		$P > 78,933$	$P_d + 5\%$

Fuente: Norma PDVSA MDP-01-DP-10 "Temperatura y Presión de Diseño"

FÓRMULAS USADAS EN LOS CÁLCULOS 3633.33333

Velocidad de ascenso del aceite, v_{as}

$$v_{as} = \frac{2 \cdot g \cdot r_o^2 \cdot (\rho_w - \rho_o)}{9 \cdot \mu_w}$$

Ley de Stokes

Factor de diseño, F

$$F = F_T \cdot F_{tu}$$

Área superficial mínima, A_s

$$A_s = F \cdot (Q_{in} / v_{as})$$

Número de canales, N_c

$$N_c = A_s / (W_c \cdot D)$$

Velocidad horizontal, v_h

$$v_h = 15 \cdot v_{as}$$

Si v_h (calculado) $> 0,01524$ m/s, entonces se toma $v_h = 0,01524$ m/s

Altura de salida del líquido, H

$$H = \left[\frac{1}{183H} \cdot \frac{Q}{A_h / L_c} + \left(\frac{v_h^2}{2g} \right)^{2/3} \right]^{3/4} - \left(\frac{v_h^2}{2g} \right)$$

Ecuación de Francis

$$H = 0,212 \left(\frac{Q \cdot L_c}{A_h} \right)^{2/3}$$

Norma PDVSA MDP-09-EF-05 "Diseño Conceptual de Tecnologías de Control de Efluentes"

CRITERIOS DE DISEÑO

Para que los equipos mecánicos no originen muchas perturbaciones sobre el proceso, la profundidad del tanque debe estar comprendida entre 0.91 y 2.44 m.

El ancho del canal queda limitado entre 1.83 y 6.10 m.

Se recomienda utilizar un valor de 1.2. Sin embargo, el valor puede ser modificado según las exigencias del diseño.

El cociente entre la profundidad y el ancho del canal (D/W_c) debe estar comprendido entre 0.3 y 0.5.

El cociente entre el largo y el ancho del canal (L/W_c) debe ser superior a 5 para garantizar una buena separación.

Para el buen desempeño del equipo, el radio equivalente de las gotas de aceite debe ser superior a 150^{μ} ($10^{\sim}6$) m.

Fuente: Norma PDVSA MDP-09-EF-05 "Diseño Conceptual de Tecnologías de Control de Efluentes".

FACTOR DE TURBULENCIA (F_T)

Este factor representa los efectos de turbulencia generados por el movimiento del fluido. Su valor se obtiene a partir de la siguiente ecuación:

$$F_T = 0,022 \cdot (v_h / v_{as}) + 1,013$$

La cual surge del ajuste realizado a los siguientes datos:

v_h/v_{as}	F_T
5	1.07
6	1.14
10	1.27
15	1.37
20	1.45

Fuente: Norma PDVSA MDP-09-EF-05 "Diseño Conceptual de Tecnologías de Control de Efluentes"

FIQ- UNAP-2016

96

Tesis: "Diseño de una unidad piloto para simulación de tratamientos de aguas residuales oleosas utilizando el software HYSYS v3.2 en la Facultad de Ingeniería Química-UNAP"

Nombre del Equipo	SEPARADOR API				
CONDICIONES DE OPERACIÓN					
Presión de Operación	atm	1	Temperatura de Operación	°C	30
Presión de Diseño	atm	3.4	Temperatura de Diseño	°C	40
DATOS DEL FLUIDO					
Caudal del Agua a T,P	m ³ /h	3.58	Densidad del Aceite Seco (a 40°C)	kg/m ³	936.44
Caudal del Aceite a T,P	m ³ /h	2.38	Densidad de la Mezcla	kg/m ³	936.4422
Caudal Total de Líquido a T,P	m ³ /h	5.96	Flujo Másico de la Mezcla	kg/h	5583.0684
Porcentaje Total de Aceite	%	40	Viscosidad Absoluta del Agua	kg/(m*s)	0.0006532
Densidad del Agua (a 40°C)	kg/m ³	994.1	Radio Equiv. Partícula (Aceite)	m	0.00015
CRITERIOS DE DISEÑO					
Profundidad del Separador	m (0.91-2.44)	0.182	Relación Profundidad/Ancho (D/Wc)	0.3-0.5	0.49726776
Ancho del Separador	m (1.83-6.10)	0.366	Gravedad	m/s ²	9.81
Tiempo de retención	h	0.045853874	Gravedad espec. agua e hidrocarburo (40°C)	0.9922	0.942
Factor de Corto Circuito		1.2	Relación Largo/Ancho	≥5	5
CÁLCULOS DE DIMENSIONAMIENTO					
Velocidad de Ascenso Aceite (Vas)	m/s	0.001082449	Área Transversal	m ²	0.10866871
Velocidad Horizontal (Vh)	m/s (> 0.01524)	0.01524	Número de Canales (Calc.)		1.63136834
(Vh/Vas)		14.079184	Número Final de Canales		2
Factor de Turbulencia	Tabla	1.334705395	Profundidad Final del Canal	m	0.182
Factor de Diseño		1.601646474	Longitud Final del Canal	m	4.10407732
Área Superficial Mínima	m ²	2.450465828	Altura de Salida del Líquido	m	0.24665178

4.2.2 Cálculos y condiciones del separador CPI.

SEPARADOR CPI

SIMBOLOGÍA

Simb.	Descripción	Unidad	Simb.	Descripción	Unidad
A_s	Área Superficial	m^2	s_p	Separación entre Placas	m
e_p	Espesor de la Placa Corrugada	m	T	Temperatura de Operación	$^{\circ}C$
F_f	Factor de Fricción		T_d	Temperatura de Diseño	$^{\circ}C$
g	Aceleración de la Gravedad	m/s^2	v_p	Velocidad entre Placas	m/s
L	Longitud del Separador	m	v_{sc}	Velocidad Crítica de Sedimentación	m/s
L_p	Longitud de la Placa	m	W_p	Ancho de las Placas	m
N_p	Número de Placas		θ_p	Inclinación de las Placas	$kg/(m \cdot s)$
P	Presión de Operación	atm	μ_w	Viscosidad Absoluta del Agua	m^2/s
P_d	Presión de Diseño	atm	ν_w	Viscosidad Cinemática del Agua	kg/m^3
Q_{in}	Caudal de entrada del afluente	m^3	ρ_o	Densidad de la mezcla de hidrocarburo	kg/m^3
R_e	Número de Reynolds		ρ_w	Densidad del Agua	kg/m^3
r_o	Radio Equivalente de Partícula (Aceite)	m	α, β	Constante	

DATOS DE ENTRADA

- Los datos relacionados con las condiciones de operación, es decir, presión y temperatura.
- Datos sobre el afluente a ser tratado: caudal de agua, caudal de aceite, densidad y viscosidad (absoluta o cinemática) del agua a T y P, densidad del aceite seco y radio equivalente de las partículas de aceite.
- Información sobre las dimensiones de las placas corrugadas (Ancho, Largo y Espesor), la separación entre ellas y su inclinación con respecto a la horizontal.

TEMPERATURA Y PRESIÓN DE DISEÑO

La temperatura (T_d) y Presión (P_d) de diseño se determinan de acuerdo a las siguiente tablas:

Temperatura de Operación, $^{\circ}C$	Temperatura de diseño, $^{\circ}C$
$T < -17,78$	$T - 1,11$
$0 < T < 398,89$	$T + 10$
$T > 398,89$	T

Presión de Operación, atm	Presión de diseño, atm
$P < 2,382$	3,402
$2,382 < P < 17,011$	$P_d + 1,701$
$17,011 < P < 39,467$	$P_d + 10\%$
$39,467 < P < 78,933$	$P_d + 3,947$
$P > 78,933$	$P_d + 5\%$

Fuente: Norma PDVSA MDP-01-DP-10 "Temperatura y Presión de Diseño"

FÓRMULAS USADAS EN LOS CÁLCULOS

Velocidad crítica de sedimentación, v_{sc}

$$v_{sc} = \left[\frac{8g\beta d_o (S_o - 1)}{F_f} \right]^{0,5} \quad \beta = 0,06 \text{ (material no uniforme)}$$

$$F_f = 0,03 \text{ (por ser fluido en régimen laminar)}$$

Velocidad entre las placas, v_p

$$v_p = \frac{L_p + s_p \tan \theta}{\alpha \cdot s_p + \frac{0,058 S_o^2}{v_w}} \quad \alpha = 1,3 \text{ (por ser fluido en régimen laminar)}$$

Verificación del número de Reynolds, R_e

$$R_e = \frac{v_p s_p}{\nu_w}$$

Área Superficial, A_s

$$A_s = Q_{in} / v_p$$

Número de placas, N_p

$$N_p = \frac{A_s \cdot \sin \theta}{W \cdot (s_p + e_p)}$$

Longitud del separador, L

$$L = \frac{A_s}{W}$$

Fuente: Norma PDVSA MDP - 09 - EF - 05 "Diseño Conceptual de Tecnologías de Control de Efluentes"

CRITERIOS DE DISEÑO

El ángulo de inclinación de la placa con respecto a la horizontal varía entre 45 y 60°
 La separación entre las placas varía entre 2 y 5 cm.
 Para que las ecuaciones anteriores sean válidas, el número Reynolds debe estar entre 400 y 1600 (régimen laminar).

Tesis: "Diseño de una unidad piloto para simulación de tratamientos de aguas residuales oleosas utilizando el software HYSYS v3.2 en la Facultad de Ingeniería Química-UNAP"

Nombre del Equipo	SEPARADOR CPI				
CONDICIONES DE OPERACIÓN					
Presión de Operación	atm	1	Temperatura de Operación	°C	30
Presión de Diseño	atm	3.4	Temperatura de Diseño	°C	40
DATOS DEL FLUIDO					
Caudal del Afluente a T,P	m ³ /h	3.58	Densidad del Agua	kg/m ³	994.1
Densidad de la mezcla de hidrocarburo	kg/m ³	936.4422	Viscosidad Absoluta del Agua (40°C)	kg/(m*s)	0.0006532
Radio Eq. Partícula (Aceite)	m (mayor a 30*10 ⁻⁶)	0.00015	Viscosidad Cinemática del Agua (40°C)	m ² /s	6.571E-07
DATOS DE LAS PLACAS CORRUGADAS					
Ancho (no debe ser mayor a 2m)	m	0.5	Inclinación de los Platos °	(45° y 60°)	45
Largo (no debe ser mayor a 2m)	m	1.1	Separación entre Platos m	(0.02 a 0.05 m)	0.05
Espesor	m	0.01	Gravedad específica del agua	0.9922	0.942
CÁLCULOS DE DIMENSIONAMIENTO					
Velocidad Crítica de Sedimentación	m/s	0.05225997	Número de Platos (Calc.)		5.295800031
Velocidad entre los Platos	m/s	0.00532192	Número Final de Platos (4 a 48)		5
Número de Reynolds	Laminar (400-1600)	404.954984	Longitud del Separador	m	0.37342424
Área Superficial	m ²	0.18671212	Factor de fricción, α y β	0.03	1.3

4.2.3 Cálculos y condiciones del sistema DAF.

SISTEMA DE FLOTACIÓN POR AIRE DISUELTO (DAF)

SIMBOLOGÍA

Simb.	Descripción	Unidad	Simb.	Descripción	Unidad
A_{xftot}	Área Superficial (Tanque Flotación)	m^2	P_{man}	Presión Manométrica	atm
Cg	Dosis Coagulante	mg/L	Q_{in}	Caudal de entrada del afluente	m^3
CL	Producción Lodo por Coag. Agregado	kg/kg _{coag}	Q_{lodo}	Caudal de Lodo	m^3
$C_{o,in}$	Concentración Aceite (Afluente)	mg/L	Q_R	Caudal de Reciclo	m^3
$C_{o,out}$	Concentración Aceite (Efluente)	mg/L	T	Temperatura de Operación	$^{\circ}C$
C_S	Solubilidad del aire en agua	mg/L	T_d	Temperatura de Diseño	$^{\circ}C$
$C_{s,in}$	Conc. Sólidos Suspendedos (Afluente)	mg/L	t_{rftoc}	Tiempo Retención (Floculación)	min
$C_{s,out}$	Conc. Sólidos Suspendedos (Efluente)	mg/L	t_{rftot}	Tiempo Retención (Flotación)	min
D_{ftot}	Profundidad (Tanque de Flotación)	m	t_{rppres}	Tiempo Retención (Presurización)	min
F_E	Factor de Eficiencia		T_S	Tasa de Desbordamiento Superficial	$m^3/(h \cdot m^2)$
m_a/m_s	Relación masa Aire/masa Sólido	kg _{aire} /kg _{sólido}	V_{ftoc}	Volumen Tanque Floculación	m^3
m_{lodo}	Flujo másico de lodo (Total)	kg/h	V_{ftot}	Volumen Tanque Flotación	m^3
m_{lodos}	Flujo másico de lodo (Sólidos Suspended.)	kg/h	V_{ppres}	Volumen Tanque Presurización	m^3
P	Presión de Operación	atm	%R	% Reciclo	
P_d	Presión de Diseño	atm	%Slodo	% Sólidos en el Lodo	
			SS	Sólidos Suspendedos	

DATOS DE ENTRADA

- Los datos relacionados con las condiciones de operación, es decir, presión y temperatura.
- Datos sobre el afluente a ser tratado: caudal de agua y concentración de aceite y sólidos.
- Concentración de aceite y sólidos suspendidos deseada en el efluente. Dosis de coagulante necesaria para lograr dichas concentraciones. Cantidad de lodo producido por el coagulante.

TEMPERATURA Y PRESIÓN DE DISEÑO

La temperatura (T_d) y Presión (P_d) de diseño se determinan de acuerdo a las siguiente tablas:

Temperatura de Operación, $^{\circ}C$	Temperatura de diseño, $^{\circ}C$	Presión de Operación, atm	Presión de diseño, atm
$T < -17,78$	$T - 1,11$	$P < 2,382$	3,402
$0 < T < 398,89$	$T + 10$	$2,382 < P < 17,011$	$P_d + 1,701$
$T > 398,89$	T	$17,011 < P < 39,467$	$P_d + 10\%$
		$39,467 < P < 78,933$	$P_d + 3,947$
		$P > 78,933$	$P_d + 5\%$

Fuente: Norma PDVSA MDP-01-DP-10 "Temperatura y Presión de Diseño"

FÓRMULAS USADAS EN LOS CÁLCULOS

Caudal de reciclo, Q_R

$$Q_R = \frac{m_a/m_s \cdot Q_{in} \cdot F_E \cdot C_{s,in}}{C_{s,out} - C_{s,in} \cdot (F_E \cdot C_{s,in} / C_{s,out} + 1) - 1}$$

Área superficial del tanque de flotación, A_{xftot}

$$A_{xftot} = \frac{Q_{in} + Q_R}{V_{ftot}}$$

Profundidad del tanque de flotación, D_{ftot}

$$D_{ftot} = \frac{V_{ftot}}{A_{xftot}}$$

Volumen del tanque presurizado, V_{ppres}

$$V_{ppres} = Q_{in} \cdot t_{rppres}$$

Flujo másico de lodo (coagulante), m_{lodos}

$$m_{lodos} = Cg \cdot CL \cdot Q_{in}$$

Porcentaje de reciclo, %R

$$\%R = \left(\frac{Q_R}{Q_{in}} \right) \cdot 100$$

Volumen del tanque de flotación, V_{ftot}

$$V_{ftot} = (Q_{in} + Q_R) \cdot t_{rftot}$$

Volumen del tanque de floculación, V_{ftoc}

$$V_{ftoc} = (Q_{in} + Q_R) \cdot t_{rftoc}$$

Flujo másico de lodo (SS), m_{lodos}

$$m_{lodos} = (C_{s,out} + C_{s,in}) \cdot Q_{in}$$

Caudal de lodo, Q_{lodo}

$$Q_{lodo} = \frac{m_{lodo}}{C_{s,lodo}} \cdot 1000$$

Flujo másico de lodo (total), m_{lodo}

$$m_{lodo} = m_{lodos} + m_{lodos}$$

Fuente: Norma PDVSA MDP - 09 - EF - 05 "Diseño Conceptual de Tecnologías de Control de Efluentes"

CRITERIOS DE DISEÑO

Para que los equipos mecánicos no originen muchas perturbaciones sobre el proceso, la profundidad del tanque debe estar comprendida entre 0,91 y 2,44 m.

La presión manométrica del tanque de presurización deberá establecerse entre 1 y 4,086 atm.

El Factor de eficiencia, F_E , varía entre 0,5 y 0,8.

El cociente entre la profundidad y el ancho del canal (D/W) debe estar comprendido entre 0,3 y 0,5.

El tiempo de retención para el tanque de presurización se establecerá entre 1 y 3 min.

El tiempo de retención para el tanque de floculación se establecerá entre 5 y 15 min.

El tiempo de retención para el tanque de flotación se establecerá entre 20 y 40 min.

Normalmente, el reciclo varía entre 30 y 40% pero pueden aceptarse reciclos por encima del 15%.

Fuente: Norma PDVSA MDP-09-EF-05 "Diseño Conceptual de Tecnologías de Control de Efluentes".

RELACIÓN AIRE / SÓLIDO (m_a/m_s).

Se refiere a la masa de aire liberada en la despresurización en función de la masa de sólidos suspendidos contenida en el efluente. Se obtiene con las ecuaciones obtenidas a partir del ajuste realizado a los gráficos mostrados en la tabla.

$C_{s,out}$ [mg/L]	m_a/m_s
12,5	0,068
16,0	0,100
17,0	0,107
20,0	0,030
23,0	0,022
26,0	0,019
10,0	0,015
20,0	0,015

Válida para: $12,5 < C_{s,out} < 20,0$ mg/L $R^2 = 1$

$$m_a/m_s = 0,1109 \cdot C_{s,out}^2 + 0,0002 \cdot C_{s,out} + 0,061$$

Válida para: $20,0 < C_{s,out} < 50,0$ mg/L $R^2 = 0,9734$

$$m_a/m_s = -2E-18 \cdot C_{s,out}^2 - 0,005 \cdot C_{s,out} + 0,13$$

$m_a/m_s = 2E-05 \cdot C_{s,out}^2 - 0,0021 \cdot C_{s,out} + 0,0619$

SOLUBILIDAD DEL AIRE EN EL AGUA (Cs)

$$C_s = 4E-05T^4 - 3E-05T^3 + 0,0072T^2 - 0,0007T + 0,0002$$

$$R^2 = 0,9998$$

T [$^{\circ}C$]	C_s [mg/L]
22	27,2
20	20,3
28	24,4
26	20,9
10	18,7
12	17,0
14	15,9
16	15,3
18	14,6
19	14,9
21	14,0

Fuente: Norma PDVSA MDP - 09 - EF - 05 "Diseño Conceptual de Tecnologías de Control de Efluentes"

Tesis: "Diseño de una unidad piloto para simulación de tratamientos de aguas residuales oleosas utilizando el software HYSYS v3.2 en la Facultad de Ingeniería Química-UNAP"

Nombre del Equipo	SISTEMA DAF				
CONDICIONES DE OPERACIÓN					
Presión de Operación	atm	1	Temperatura de Operación	°C	30
Presión de Diseño	atm	3.4	Temperatura de Diseño	°C	40
DATOS DEL FLUIDO					
Caudal del Afluente a T,P	m ³ /h	3.5772	Conc. Aceite (Salida)	mg/L (14-23)	20
Conc. Aceite (Entrada)	mg/L (30-150)	100	Conc. SS (Salida)	mg/L (12.5-20)	20
Conc. SS (Entrada)	mg/L	150	Presión Manométrica (entre 1 a 4.08 atm)	atm	1.1
Densidad del agua	kg/m ³	994.1	Dosis de Coagulante	mg/L	50
Lodo Producido por Coagulante	kg/kg coag.	0.04	% Sólidos en el Lodo	%	80
CRITERIOS DE DISEÑO					
Factor de Eficiencia (FE)	0.5-0.8	0.52	Tiempo de Retención (Floc.)	min. (5-15)	10
Tiempo Retención (Presuriz.)	min.(1-3)	3	Tiempo de Retención (Flot.)	min. (20-40)	20
CÁLCULOS DE DIMENSIONAMIENTO					
Relación ma/mS	a 20 mg/L	0.03	Profundidad Requerida (Flotación)	m (0.91-2.44 m)	0.91
Tasa de Desbordamiento Superficial	m ³ /(m ² *h)-(2.445-9.779)	2.683	Volumen Requerido (Presuriz.)	m ³	0.06571709
Solubilidad del Aire/Agua (a 40°C)	mg/L	17.75	Volumen Requerido (Floc.)	m ³	0.81525695
Caudal de Reciclo	m ³ /h	1.3143417	Flujo másico Lodo (sólidos suspendidos)	kg/h	0.608124
% Reciclo	(30-40) %	36.7421923	Flujo másico Lodo (Coagulante)	kg/h	0.0071544
Área Requerida (Flotación)	m ²	1.82316128	Flujo másico Lodo Total	kg/h	0.6152784
Volumen Requerido (Flotación)	m ³	1.6305139	Caudal de Lodo	m ³ /h	0.769098

4.2.4 Cálculos y condiciones del sistema de aireación.

SIMBOLOGÍA					
Simb.	Descripción	Unidad		Simb.	Descripción
DBO_{in}	Demanda Biológica Oxígeno (Afluente)	mg/L		Q_a	Caudal de Aire
DBO_{out}	Demanda Biológica Oxígeno (Efluente)	mg/L		Q_{in}	Caudal del Afluente
D	Profundidad	m		R_{O_2}	Tasa de Transferencia de Oxígeno
D_w	Profundidad del Agua	m		T	Temperatura de Operación
H_F	Altura Borde Libre	m		T_a	Temperatura del aire
L	Longitud	m		T_d	Temperatura de Diseño
m_a	Flujo Másico de Aire	kg/h		t_r	Tiempo de Retención
m_{O_2}	Flujo Másico de Oxígeno	kg/h		V	Volumen
P	Presión de Operación	atm		V_w	Volumen de Agua
p	Consumo energético	hp		W	Ancho
P_{amb}	Presión a condición ambiental	atm		$\%0E$	% Eficiencia
P_d	Presión de Diseño	atm		$\%0_2$	% Oxígeno en exceso
p_{O_2}	Consumo energético (Inyección de O_2)	hp			

DATOS DE ENTRADA	
1. Los datos relacionados con las condiciones de operación, es decir, presión y temperatura.	
2. Datos sobre el afluente a ser tratado: caudal y demanda biológica de oxígeno (DBO).	
3. Demanda Biológica de Oxígeno (DBO) que se desea en el Efluente.	

TEMPERATURA Y PRESIÓN DE DISEÑO																					
La temperatura (T_d) y Presión (P_d) de diseño se determinan de acuerdo a las siguiente tablas:																					
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th>Temperatura de Operación, °C</th> <th>Temperatura de diseño, °C</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>$T < -17,78$</td> <td>$T - 1,11$</td> </tr> <tr> <td>$0 < T < 398,89$</td> <td>$T + 10$</td> </tr> <tr> <td>$T > 398,89$</td> <td>T</td> </tr> </tbody> </table>	Temperatura de Operación, °C	Temperatura de diseño, °C	$T < -17,78$	$T - 1,11$	$0 < T < 398,89$	$T + 10$	$T > 398,89$	T	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th>Presión de Operación, atm</th> <th>Presión de diseño, atm</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>$P < 2,382$</td> <td>3,402</td> </tr> <tr> <td>$2,382 < P < 17,011$</td> <td>$P_d + 1,701$</td> </tr> <tr> <td>$17,011 < P < 39,467$</td> <td>$P_d + 10\%$</td> </tr> <tr> <td>$39,467 < P < 78,933$</td> <td>$P_d + 3,947$</td> </tr> <tr> <td>$P > 78,933$</td> <td>$P_d + 5\%$</td> </tr> </tbody> </table>	Presión de Operación, atm	Presión de diseño, atm	$P < 2,382$	3,402	$2,382 < P < 17,011$	$P_d + 1,701$	$17,011 < P < 39,467$	$P_d + 10\%$	$39,467 < P < 78,933$	$P_d + 3,947$	$P > 78,933$	$P_d + 5\%$
Temperatura de Operación, °C	Temperatura de diseño, °C																				
$T < -17,78$	$T - 1,11$																				
$0 < T < 398,89$	$T + 10$																				
$T > 398,89$	T																				
Presión de Operación, atm	Presión de diseño, atm																				
$P < 2,382$	3,402																				
$2,382 < P < 17,011$	$P_d + 1,701$																				
$17,011 < P < 39,467$	$P_d + 10\%$																				
$39,467 < P < 78,933$	$P_d + 3,947$																				
$P > 78,933$	$P_d + 5\%$																				

Fuente: Norma PDVSA MDP-01-DP-10 "Temperatura y Presión de Diseño"

FÓRMULAS USADAS EN LOS CÁLCULOS															
<p>Volumen de agua, V_w</p> $V_w = Q_{in} \cdot t_r$ <p>Profundidad del tanque, D</p> $D = D_w + H_F$ <p>Volumen del tanque, V</p> $V = W \cdot L \cdot (D_w + H_F)$ <p>Flujo Másico Requerido de aire, m_a</p> $m_a = m_{O_2} \cdot 4,301 (k_{O_{air}} / k_{O_{O_2}})$ <p>Consumo energético, p</p> <p>Aerador mecánico de superficie</p> <p>Consumo Energético por suministro de O_2</p> $P_{in} = \frac{m_a}{2,4h/\alpha - K_{Lk_a}}$ <p>Aerador por difusión</p> <p>Caudal de aire necesario, Q_a</p> $Q_a = 96,62 \cdot \frac{m_a \cdot 100}{12 \cdot \%K}$	<p>Ancho del tanque, W</p> $W = D_w \cdot (W/D)$ <p>Largo del tanque, L</p> $L = \frac{V_w}{W \cdot D_w}$ <p>Flujo Másico Requerido oxígeno, m_{O_2}</p> $m_{O_2} = (DBO_{in} - DBO_{out}) \cdot Q_{in} \cdot (1 - \%0_2 / 100)$ <p>Consumo Energético para mantener Sólidos Suspensos</p> $\frac{p}{k_{gal}} = \frac{P_{O_2}}{V_w \left(\frac{k_{gal}}{1000g/ml} \right)}$ <p>Si $p/k_{gal} \geq 0,14$, entonces: $P = P_{O_2}$ Si $p/k_{gal} < 0,14$, entonces: $p = 1,4 \cdot 10^{-7} \cdot V_w$</p> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse; margin-top: 10px;"> <thead> <tr> <th>Tipo de aerador</th> <th>R_{O_2} [lbo₂/hp.h]</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Plato</td> <td>2,0-2,5</td> </tr> <tr> <td>Turbina</td> <td>3,0-3,5</td> </tr> <tr> <td>Hélice</td> <td>2,5-3,5</td> </tr> </tbody> </table> <p>Consumo Energético Requerido (p)</p> $p = 6,6099 \cdot 10^{-4} \cdot Q_a \cdot (T_a + 460) \cdot \left[\left(\frac{P_{amb} + 0,433 \cdot D + 1,5}{P_{amb} - 0,2} \right)^{0,002} - 1 \right]$ <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse; margin-top: 10px;"> <thead> <tr> <th>Tipo de aerador</th> <th>$\%K$</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Perfora</td> <td>12</td> </tr> <tr> <td>No perfora</td> <td>8</td> </tr> </tbody> </table>	Tipo de aerador	R_{O_2} [lbo ₂ /hp.h]	Plato	2,0-2,5	Turbina	3,0-3,5	Hélice	2,5-3,5	Tipo de aerador	$\%K$	Perfora	12	No perfora	8
Tipo de aerador	R_{O_2} [lbo ₂ /hp.h]														
Plato	2,0-2,5														
Turbina	3,0-3,5														
Hélice	2,5-3,5														
Tipo de aerador	$\%K$														
Perfora	12														
No perfora	8														

Fuente: Exxon, "Water Pollution Control, Biological Treatment of Wastewater", Exxon Research and Engineering Company, New Jersey, 1994.

CRITERIOS DE DISEÑO	
La altura del borde libre depende del tipo de aerador que se elija. Para aerador de superficie se recomienda un valor mínimo de 0.91 m, mientras que para los aeradores por difusión se usa un valor estándar de 0.46 m.	
La profundidad del agua debe estar comprendida entre 1.83 y 4.57 m.	
La capa de sólidos sedimentados dentro del clarificador debe tener una altura comprendida dentro 0.6 y 0.9 m.	
La relación Ancho/Profundidad (W/D) debe estar entre 1.5 y 2.	
El tiempo de retención varía entre 4 y 8 h para aeración convencional y 3-5 h para aeración de mezcla completa.	
Fuente: Exxon, "Water Pollution Control, Biological Treatment of Wastewater", Exxon Research and Engineering Company, New Jersey, 1994.	

Tesis: "Diseño de una unidad piloto para simulación de tratamientos de aguas residuales oleosas utilizando el software HYSYS v3.2 en la Facultad de Ingeniería Química-UNAP"

Nombre del Equipo		SISTEMA DE AERACIÓN			
CONDICIONES DE OPERACIÓN					
Presión de Operación	atm	1	Temperatura de Operación	°C	30
Presión de Diseño	atm	3.4	Temperatura de Diseño	°C	40
DATOS DEL FLUIDO					
Caudal del Afluente	m ³ /h	3.58	DBO en Efluente	mg/L	50
DBO en Afluente	mg/L (250-350)	250	Remoción de DBO y E (12 poroso y 8 no poroso)-%	80	12
CRITERIOS DE DISEÑO					
Tiempo de Retención	h (3-5/mezcla completa) se as	1	Exceso de Oxígeno	% (+20)	25.2
Profundidad del Agua	m (1.83-4.57) se asume 1	1	Temperatura de Aire	°C	40
Relación Ancho/Profundidad (W/D)	1.5-2	1.5	Caudal de aire necesario aereador difusión	m ³ /h	10.8748747
Altura de Borde Libre	m (0.46 difusión)	0.46	Presión ambiente	atm	1
CÁLCULOS DE DIMENSIONAMIENTO					
Volumen del Agua	m ³	3.5772	Volumen del Tanque	m ³	5.222712
Ancho del Tanque	m	1.5	Requerimiento de Oxígeno	kg/h	0.02229788
Largo del Tanque	m	2.3848	Requerimiento de Aire	kg/h	0.09590318
Profundidad del Tanque	m	1.46	Requerimiento de Energía	hp	1.69449109

4.2.5 Cálculos y condiciones del clarificador o sedimentador.

SISTEMA DE CLARIFICADOR					
SIMBOLOGÍA					
Simb.	Descripción	Unidad	Simb.	Descripción	Unidad
A_s'	Área Superficial (Total)	m^2	P_d	Presión de Diseño	atm
A_s	Área Superficial (por clarificador)	m^2	pe	Perímetro	m
C_s	Conc. Sólidos Suspendedos (Afluente)	mg/L	Q_{inav}	Caudal del Afluente (Promedio)	m^3/s
D	Profundidad del Tanque	m	$Q_{in p}$	Caudal del Afluente (Pico)	m^3/s
d	Diámetro	m	R_{sav}	Razón Alimentación Sólidos (Promedio)	
D_{lodo}	Profundidad Capa de Lodo	m	R_{sp}	Razón Alimentación Sólidos (Pico)	
HLR	Tasa Desbordamiento Superficial	m	T	Temperatura de Operación	$^{\circ}C$
L	Longitud	m	T_d	Temperatura de Diseño	$^{\circ}C$
m_a	Flujo másico de Sólidos	kg/h	t_r	Tiempo de Retención	min
N_{rec}	Número Clarificadores Rectangulares		W	Ancho del Tanque	m
N_{cir}	Número Clarificadores Circulares		WRL	Tasa de Desbordamiento Perimetral	m
P	Presión de Operación	atm	$\%R$	% de Reciclo	

DATOS DE ENTRADA

- Los datos relacionados con las condiciones de operación, es decir, presión y temperatura.
- Datos sobre el afluente a ser tratado: concentración de sólidos suspendidos, caudal pico y caudal promedio.
- Tiempo de Retención dentro de la unidad de acuerdo a los resultados de los análisis de laboratorio.

TEMPERATURA Y PRESIÓN DE DISEÑO

La temperatura (T_d) y Presión (P_d) de diseño se determinan de acuerdo a las siguiente tablas:

Temperatura de Operación, $^{\circ}C$	Temperatura de diseño, $^{\circ}C$
$T < -17,78$	$T - 1,11$
$0 < T < 398,89$	$T + 10$
$T > 398,89$	T

Presión de Operación, atm	Presión de diseño, atm
$P < 2,382$	3,402
$2,382 < P < 17,011$	$P_d + 1,701$
$17,011 < P < 39,467$	$P_d + 10\%$
$39,467 < P < 78,933$	$P_d + 3,947$
$P > 78,933$	$P_d + 5\%$

Fuente: Norma PDVSA MDP-01-DP-10 "Temperatura y Presión de Diseño"

FÓRMULAS USADAS EN LOS CÁLCULOS

Flujo másico de sólidos, m_s

$$m_s = Q_{in} \cdot \left(1 + \frac{\%R}{100}\right) \cdot C_s$$

(Se calcula tanto para el caudal promedio como para el caudal pico)

Área superficial total requerida, A_s

$$A_s = m_s / R_s$$

i=Rec o Circ

Área superficial por clarificador, A_s'

$$A_s' = A_s / N$$

i=Rec o Circ

Tasa de desbordamiento superficial, HLR

$$HLR = \frac{Q_{in}}{A_s}$$

Tasa de desbordamiento perimetral, WLR

$$WLR = \frac{Q_{in}}{pe \cdot N}$$

Perímetro para el clarificador circular

$$pe = d \cdot \pi$$

Perímetro para el clarificador rectangular

$$pe = 2 \cdot W + 2 \cdot L$$

Dimensiones del clarificador

Clarificador rectangular

Ancho $W = L / j$ Profundidad (D) $D = (L/K) + D_{lodo}$

Clarificador Circular

Diámetro (d) $d = \sqrt{\frac{4 \cdot A_s'}{\pi}}$ Profundidad (D) $D = \frac{Q_{in} \cdot t_r}{A_s}$

Largo

$$L = \sqrt{A_s' \cdot j}$$

Fuente: Lee, C. C. y Lin, S.D. (2007), Handbook of Environmental Engineering Calculations, 2ª edición, McGraw-Hill Inc, Estados Unidos.
Stephenson, R. L. Blackburn, J. W. y Blackburn, J.B. (1997), The Industrial Wastewater Systems Handbook, CRC Press LLC, Estados Unidos.

CRITERIOS DE DISEÑO

La Razón de Alimentación de Sólidos debe variar entre 4 y 6 kg/h.m2 para el caso de flujo promedio y 10 kg/h.m2 para el caso de flujo pico.
El % Reciclo debe ser fijado entre 0 y 30%.
La capa de sólidos sedimentados dentro del clarificador debe tener una altura comprendida entre 0.6 y 0.9 m.
La relación Largo/Ancho (L/W) debe estar entre 2 y 5.
La relación Largo/Profundidad (L/D) debe estar entre 5 y 20.
El área superficial total requerida será el valor que resulte mayor al comparar los resultados de área obtenidos para el caso de flujo promedio y para el caso de flujo pico.
El área superficial de cada clarificador circular no debe ser mayor a 1140.106 m2, ya que este es el área obtenida para un diámetro de 38.1 m, el cual se considera como el valor máximo aceptable para que el clarificador no tenga problemas en eficiencia.
El área superficial de cada clarificador rectangular no debe ser mayor a 1741.932 m2, ya que este es el área obtenida para un largo y ancho máximo de 22.86 y 76.2 m respectivamente. Valores superiores disminuyen la eficiencia del clarificador.
La Tasa de Desbordamiento Superficial Calculada debe estar comprendida en el rango 5.17 y 15.52 m3/(m2*h)
La Tasa de Desbordamiento Perimetral Calculada debe estar comprendida en el rango 0.34 y 2.21 m3/(m*h).
Fuente: Norma PDVSA MDP-09-EF-05 "Diseño Conceptual de Tecnologías de Control de Efluentes".
Lee, C. C. y Lin, S.D. (2007), Handbook of Environmental Engineering Calculations, 2ª edición, McGraw-Hill Inc, Estados Unidos
Stephenson, R. L. Blackburn, J. W. y Blackburn, J.B. (1997), The Industrial Wastewater Systems Handbook, CRC Press LLC, Estados Unidos.

Tesis: "Diseño de una unidad piloto para simulación de tratamientos de aguas residuales oleosas utilizando el software HYSYS v3.2 en la Facultad de Ingeniería Química-UNAP"

Nombre del Equipo	SISTEMA DE CLARIFICADOR				
CONDICIONES DE OPERACIÓN					
Presión de Operación	atm	1	Temperatura de Operación	°C	30
Presión de Diseño	atm	3.4	Temperatura de Diseño	°C	40
DATOS DEL FLUIDO					
Caudal del Afluente (Promedio)	m ³ /h	3.58	Concentración de Sólidos Suspendedos	mg/L	250
Caudal del Afluente (Pico)	m ³ /h	3.93492			
CRITERIOS DE DISEÑO					
Porcentaje de Reciclo	% (0-30)	30	Relación Longitud/Ancho (L/W)	2 a 5	5
Tiempo de Retención	min	10	Relación Largo/Profundidad (L/D)	5 a 20	20
Razón Alimentación Sólidos (Promedio)	kg/(h.m ²)-(4-6)	4	N° Clarificadores Rectangulares		1
Razón Alimentación Sólidos (Pico)	kg/(h.m ²)-(10)	10	N° Clarificadores Circulares		1
Profundidad Capa Sólidos	m (0.6-0.9)	0.6			
CÁLCULOS GENERALES					
Flujo másico de Sólidos (Promedio)	kg/h	1.16259	Área Superficial (Pico)	m ²	0.1278849
Flujo másico de Sólidos (Pico)	kg/h	1.278849	Área Superficial (Diseño)	m ²	0.2906475
Área Superficial (Promedio)	m ²	0.2906475	J (L/W) y K (L/D)	5	20
DIMENSIONAMIENTO DE CLARIFICADOR DE SECCIÓN RECTANGULAR					
Área Superficial (por clarificador)	m ² (no mayor 1741.932)	0.2906475	Profundidad	m	0.85
Longitud	m (hasta 76.2)	1.20550301	Área superficial	m ²	0.2906475
Ancho	m (hasta 22.86)	0.2411006	Perímetro rectangular (pe)	m	2.89320722
DIMENSIONAMIENTO DE CLARIFICADOR DE SECCIÓN CIRCULAR					
Área Superficial (por clarificador)	m ² (no mayor 1140.106)	0.2906475	Tasa de Desbordamiento Superficial	m ³ /(m ² *h)-(5.17-15.52)	12.3076923
Diámetro	m (hasta 38.1)	0.60833774	Tasa de Desbordamiento Perimetral	m ³ /(m*h)-(0.34-2.21)	1.87180843
Profundidad	m	2.05128205	Perímetro circular (pe)	m	1.91109301

4.2.6 Cálculos y condiciones del sistema de cloración.

SISTEMA DE CLORACIÓN					
SIMBOLOGÍA					
Simb.	Descripción	Unidad	Simb.	Descripción	Unidad
A_t	Área Superficial (Tanque Flotación)	m^2	P	Presión de Operación	atm
C_c	Dosis de Cloro	mg/L	P_d	Presión de Diseño	atm
C_{Cl}	Concentración de Cloro en la Solución	mg/L	$Q_{in\ av}$	Caudal del Afluente (Promedio)	m^3/s
D	Profundidad del Canal	m	$Q_{in\ p}$	Caudal del Afluente (Pico)	m^3/s
D_w	Profundidad del Agua	m	Q_{Cl}	Caudal de Solución de Cloro	m^3/s
H_F	Altura del Borde Libre	m	T	Temperatura de Operación	$^{\circ}C$
L	Longitud del Equipo	m	T_d	Temperatura de Diseño	$^{\circ}C$
L_c	Longitud del Canal	m	t_r	Tiempo de Contacto	min
L_n	Longitud del Paso	m	V	Volumen del Tanque	m^3
m_{Cl}	Flujo másico de Cloro	kg/h	W	Ancho del Tanque	m
N_B	Número de Pantallas (Baffles)		W_c	Ancho del Canal	m

DATOS DE ENTRADA

- Los datos relacionados con las condiciones de operación, es decir, presión y temperatura.
- Datos sobre el afluente a ser tratado: caudal pico y caudal promedio.
- Dosis de cloro que se va a agregar y cantidad de cloro contenido en la misma.

TEMPERATURA Y PRESIÓN DE DISEÑO

La temperatura (T_d) y Presión (P_d) de diseño se determinan de acuerdo a las siguiente tablas:

Temperatura de Operación, $^{\circ}C$	Temperatura de diseño, $^{\circ}C$
$T < -17,78$	$T - 1,11$
$0 < T < 398,89$	$T + 10$
$T > 398,89$	T

Presión de Operación, atm	Presión de diseño, atm
$P < 2,382$	3,402
$2,382 < P < 17,011$	$P_d + 1,701$
$17,011 < P < 39,467$	$P_d + 10\%$
$39,467 < P < 78,933$	$P_d + 3,947$
$P > 78,933$	$P_d + 5\%$

Fuente: Norma PDVSA MDP-01-DP-10 "Temperatura y Presión de Diseño"

FÓRMULAS USADAS EN LOS CÁLCULOS

<p>Volumen del tanque, V</p> $V = Q_{in} \cdot t_r$ <p>Longitud total del canal, L_c</p> $L_c = V/A_t$ <p>Ancho de Tanque, W</p> $W = W_c \cdot N_B$ <p>Consumo de cloro, m_{Cl}</p> $m_{Cl} = Q_{in} \cdot C_c$	<p>Área transversal del canal, A_t</p> $A_t = W_c \cdot D_w$ <p>Longitud de cada paso, L_n</p> $L_n = L_c/N_B$ <p>Profundidad del Tanque, D</p> $D = D_w + H_F$ <p>Caudal de cloro necesario, Q_{Cl}</p> $Q_{Cl} = m_{Cl}/C_{Cl}$
--	---

Fuente: Lee, C. C. y Lin, S.D. (2007), Handbook of Environmental Engineering Calculations, 2° edición, McGraw-Hill Inc, Estados Unidos.

CRITERIOS DE DISEÑO

El volumen del tanque debe ser determinado tanto para el caudal pico como el caudal promedio. El volumen de diseño del tanque será, el valor que resulte mayor al comparar los resultados para cada caso.

El número de pantallas (baffles) dentro de la unidad deberá escogerse dentro del rango 3-11.

La relación Profundidad/Ancho (D/W) debe ser menor que 1.

La relación Largo/Ancho (L/W) debe estar entre 40 y 70.

Fuente: Lee, C. C. y Lin, S.D. (2007), Handbook of Environmental Engineering Calculations, 2° edición, McGraw-Hill Inc, Estados Unidos

Tesis: "Diseño de una unidad piloto para simulación de tratamientos de aguas residuales oleosas utilizando el software HYSYS v3.2 en la Facultad de Ingeniería Química-UNAP"

Nombre del Equipo	SISTEMA DE CLORACIÓN				
CONDICIONES DE OPERACIÓN					
Presión de Operación	atm	1	Temperatura de Operación	°C	30
Presión de Diseño	atm	3.402	Temperatura de Diseño	°C	40
DATOS DEL FLUIDO					
Caudal del Afluyente (Promedio)	m3/h	3.58	Caudal del Afluyente (Pico)	m3/h	3.93492
CRITERIOS DE DISEÑO					
Tiempo de Contacto (Promedio)	min	30	Ancho del Canal	m	1
Tiempo de Contacto (Pico)	min	40	Altura del Borde Libre	m	0.5
Nº Pantallas por Tanque (baffles)	3 a 11	5	Profundidad del Agua	m	0.9
DATOS SOBRE LA DOSIS DE CLORO					
Dosis de Cloro	mg/L	1.35	Concentración de Cloro (Solución)	%	60
CÁLCULOS DE DIMENSIONAMIENTO					
Volumen del Tanque (Promedio)	m3	1.7886	Relación Largo/Ancho (L/W)	entre 40 y 70	40
Volumen del Tanque (Pico)	m3	2.62328	Profundidad del Tanque	m	1.4
Volumen del Tanque (Diseño)	m3	2.62328	Ancho del Tanque	m	5
Relación Profundidad/Ancho (D/W)	menor que 1	0.95	Longitud Total canal	m	2.914755556
Área Transversal del Canal	m2	0.9	Longitud de cada Paso	m	0.582951111
CÁLCULO DEL REQUERIMIENTO DE CLORO					
Consumo de Cloro	kg/h	0.00482922	Caudal de la Solución de Cloro	m3/h	0.000080487

4.3 Aspectos de seguridad, salud y medio ambiente

4.3.1 Identificación de etapas y actividades

Consiste en la descripción de todas las etapas de proceso de operación de la unidad piloto de aguas residuales oleosas.

Tabla 4.1 Etapas del proceso

ETAPAS DEL PROCESO	ACTIVIDAD
1. Operación de rutina	1.1. Encendido de la unidad piloto. 1.2. Recuperación de hidrocarburo de los separadores. 1.3. Transferencia de hidrocarburo recuperado. 1.4. Toma de nivel y temperatura.
2. Emergencias Operativas	2.1. Falla de bombas. 2.2. Incremento repentino de caudal.
3. Actividades complementarias en la operación	3.1 Acondicionamiento e Inspección de la unidad.

4.3.2 Aspectos ambientales identificados

- Generación y disposición de residuos sólidos peligrosos.
- Generación y disposición de residuos sólidos no peligrosos.
- Emisión de vapores de hidrocarburos y/o químicos.
- Consumo de recursos (energía y agua).
- Emisión de ruido.
- Potencial incendio/explosión.

4.3.3 Listado de peligros y riesgos en las operaciones

Tabla 4.2 Listado de peligros y riesgos.

PELIGROS	RIESGOS
Trabajos en separador	Respiración agitada, Irritación a la piel, Ahogamiento, Traumatismos, Contusiones.
Exposición a vapores de hidrocarburo	Dolores de cabeza (Cefalea), Mareos, Irritación de vías respiratorias.
Contacto con Hidrocarburo	Irritación a la piel (dermatitis), Quemaduras, Artritis.
Exposición al calor	Deshidratación, Mareos (cefalea), Fatiga por calor.
Esfuerzos físicos excesivos o falsos movimientos	Lesiones osteomusculares (fatiga muscular).
Exposición a olores desagradables (soda cáustica gastada)	Irritación del aparato respiratorio, Dolor de cabeza.
Exposición a ruido continuo	Irritabilidad, Estrés
Golpe con objetos	Contusiones, Heridas, Fracturas
Iluminación inadecuada en el área de trabajo	Disminución de la visión, Contusiones
Levantamiento de cargas y objetos	Lesiones osteomusculares (tendinitis, fatiga muscular)
Pisos resbaladizos	Contusiones, Fracturas y Traumatismos
Posturas de trabajo inadecuadas	Lesiones osteomusculares (fatiga muscular)
Potencial Explosión	Trauma acústico, Quemaduras, Muerte
Potencial Incendio	Quemaduras
Superficies inestables	Contusiones, Heridas cortantes, Fracturas, Ahogamiento

4.3.4 Disposiciones mínimas de seguridad y salud en el trabajo

La ley 29783: Ley de Seguridad y Salud en el Trabajo, determina el cuerpo básico de garantías y responsabilidades para establecer un adecuado nivel de protección de la salud de los trabajadores frente a los riesgos derivados de las condiciones de trabajo. Así son las normas de desarrollo reglamentario las que fijan las medidas mínimas que deben adoptarse para la adecuada protección de los trabajadores. Entre ellas se encuentran las destinadas a garantizar la utilización por los trabajadores en el trabajo de equipos de protección individual que los protejan adecuadamente de aquellos riesgos para su salud o su seguridad que no puedan evitarse o limitarse suficientemente mediante la utilización de medios de protección colectiva o la adopción de medidas de organización en el trabajo.

4.3.5 Obligaciones generales

Hará obligatorio el uso de los equipos de protección individual como:

- Protectores de la cabeza: casco de seguridad, protectores auditivos, lentes de seguridad, mascarilla antipolvo.
- Protectores de manos y brazos: guantes de seguridad.
- Protectores del cuerpo: crema de protección, chalecos, mandiles, fajas, uniforme, entre otros.

CAPÍTULO V: ANÁLISIS DE COSTO

5.1 Costo de diseño

Para los costos de diseño se tomó los equipos planteados y servicios industriales y los respectivos costos de cada uno.

Tabla 5.1 Costo de diseño de la unidad piloto de tratamiento de aguas residuales oleosas

PARTIDAS	ESPECIFICA DEL GASTO	Cantidad	P. Unitario	Total S/.
1	<u>EQUIPOS</u>			32 000,00
	Tanque de almacenamiento	1	2 000,00	
	Separador API	1	4 000,00	
	Separador CPI	1	4 000,00	
	Tanque desemulsificante	1	1 500,00	
	Tanque de floculantes	1	1 500,00	
	Tanque de soda cáustica	1	1 500,00	
	Tanque de polielectrolito	1	1 500,00	
	Tanque de hipoclorito	1	1 500,00	
	Tanque DAF	1	4 000,00	
	Tanque de presurización	1	3 000,00	
	Tanque de aceites recuperados	1	1 500,00	
	Sedimentador o clarificador	1	3 000,00	
	Tanque de desinfección	1	1 500,00	
	Tanque de trietanolamina	1	1 500,00	
2	<u>SERVICIOS INDUSTRIALES</u>		-	14 615,00
	Tuberías	13,5	250,00	3 375,00
	Bombas	6	900,00	5 400,00
	Válvulas	6	100,00	600,00
	Consumo de químicos	1	2 500,00	2 500,00

Tesis: "Diseño de una unidad piloto para simulación de tratamientos de aguas residuales oleosas utilizando el software HYSYS v3.2 en la Facultad de Ingeniería Química-UNAP"

	Energía eléctrica (motor, agitador y otros)	1	2500,00	2500,00
	Codos	3	80,00	240,00
TOTAL S/.				46 615,00
RESUMEN				
PARTIDAS	ESPECIFICAS DEL GASTO			SOLES S/.
1	Equipos			32 000,00
2	Servicios Industrial			14 615,00
	TOTAL 1			46 615,00

5.2 Otros costos

Se tomó en cuenta asignaciones, bienes de consumo, servicio de consultoría y otros servicios.

Tabla 5.2 Otros costos

PARTIDAS	ESPECIFICA DEL GASTO	Cantidad	P. Unitario	Total S/.
1	ASIGNACIONES			600,00
	(Gastos por movilidad en meses)	30	20,00	600,00
2	BIENES DE CONSUMO	-	-	840,00
	Computadora (LAPTOP)	1	500,00	500,00
	Papel Bond A4 80 Gr. (Millar)	1	25,00	25,00
	Papel Bulki (Millar)	1	15,00	15,00
	Tintas de Impresión (unidades)	2	100,00	200,00
	Folder de Manila (unidades)	20	0,50	10,00
	Lapiceros (unidades)	10	0,50	5,00
	Corrector (unidades)	2	2,50	5,00
	USB (unidades)	2	40,00	80,00
3	SERVICIOS DE CONSULTORÍA			800,00
	Asesoría Técnica-Científica	1	800,00	800,00
4	OTROS SERVICIOS DE TERCEROS			625,00
	Internet (consumo/mes)	100	2,00	200,00

Tesis: "Diseño de una unidad piloto para simulación de tratamientos de aguas residuales oleosas utilizando el software HYSYS v3.2 en la Facultad de Ingeniería Química-UNAP"

	Fotocopias (unidades)	1000	0,10	100,00
	Anillados (unidades)	15	15,00	225,00
	Alquiler de Data Show y Auditorio FIQ-UNAP	1	100,00	100,00
			TOTAL S/.	2865,00
RESUMEN				
PARTIDAS	ESPECÍFICAS DEL GASTO			SOLES S/.
1	Asignaciones			600,00
2	Bienes de Consumo			840,00
3	Servicio de Consultoría			800,00
4	Otros Servicios de Terceros			625,00
	TOTAL 2			2 865,00

5.3 Costo total

Es la suma del costo total 1 y costo total 2.

Tabla 5.3 Costo Total

COSTO TOTAL		
PARTIDAS	ESPECÍFICAS DEL GASTO	SOLES S/.
1	Total 1	46 615,00
2	Total 2	2 865,00
	COSTO TOTAL	49 480,00

CAPÍTULO VI: RESULTADOS Y DISCUSIONES

6.1 Resultados

En el presente capítulo se presentarán los resultados obtenidos en las etapas:
Se determinaron las condiciones y cálculos de diseño, de acuerdo a lo siguiente:

Condiciones iniciales para el diseño de acuerdo a la tabla 2.1

Tabla 2.1 PARÁMETROS FÍSICOS DEL FLUIDO

PARÁMETRO	UNIDAD	VALOR
Caudal	m ³ /h	0.1-6.0
Presión	Atm	1.0-10
Temperatura	°C	1.0-100
pH	Adim.	7.5-10.5
AGMH	mg/L	1.0-400
SST	mg/L	10-300
Densidad agua (40°C)	kg/m ³	994.1
Densidad aceite (40°C)	kg/m ³	936.44
Viscosidad absoluta agua (40°C)	kg/(m*s)	0.000653
Viscosidad absoluta aceite (40°C)	kg/(m*s)	0.00053
Viscosidad cinemática agua (40°C)	m ² /s	6.571*10 ⁻⁷
Gravedad específica agua (40°C)	Adim.	0.9922
Gravedad específica aceite (40°C)	Adim.	0.942

Fuente: Norma PDVSA MDP – 09 – EF – 05 "Diseño Conceptual de Tecnologías de Control de Efluentes"-Tablas termodinámicas del agua y aceite (29 DEG API).

Condiciones y caracterización del material a tratar

Se establecieron las condiciones del material a tratar de acuerdo a la tabla 2.2 y 2.3.

Tabla 2.2 Promedio, desviación y rango de los parámetros fisicoquímicos del Efluente

PARÁMETRO	UNIDAD	PROMEDIO	DESVIACIÓN	RANGO
T	°C	31.29	3.8	28-39
pH	Adm.	8.47	1.14	7.08-11.98
COLOR	Unid. Pt-Co	43.24	67.8	5-300
SST	mg/L	250.0	85.5	10-300
DBO	mg/L	120.59	80.5	12-307
DQO	mg/L	366.82	221.33	66-854
AGMH	mg/L	150.0	82.42	1.00-400
NT	mg/L	12.65	13.62	2.00-48

Tesis: "Diseño de una unidad piloto para simulación de tratamientos de aguas residuales oleosas utilizando el software HYSYS v3.2 en la Facultad de Ingeniería Química-UNAP"

FT	mg/L	0.53	0.98	0.01-3.73
SULFUROS	mg/L	1.73	2.05	0.01-6
FLUORUROS	mg/L	1.32	1.48	0.01-5.33
FENOLES	mg/L	0.07	0.05	0.01-0.21
CT	NMP/100mL	1343.53	1734.91	200-4750

Fuente: Petroperú 2016

Tabla 2.3 Promedio, desviación y rango de los parámetros fisicoquímicos del Efluente

PARÁMETRO	UNIDAD	PROMEDIO	DESVIACIÓN	RANGO
T	°C	29.8	2.68	25-35
pH	Adm.	8.47	1	7.62-11.7
COLOR	Unid. Pt-Co	115	190.23	5-750
SST	mg/L	221.0	81.3	10-300
DBO	mg/L	199.87	139.5	51-390
DQO	mg/L	818.4	687.43	184-2111
AGMH	mg/L	140	80.48	1-400
NT	mg/L	13.34	16.69	0.1-52
FT	mg/L	1.42	2.29	0.01-7.55
SULFUROS	mg/L	1.69	1.7	0.01-5.05
FLUORUROS	mg/L	2.22	2.9	0.01-7.65
FENOLES	mg/L	0.12	0.15	0.01-0.63
CT	NMP/100mL	840	1281.07	200-4800

Fuente: Electro Oriente 2016

Cálculos efectuados para el diseño

Se utilizaron los criterios establecidos en la Norma PDVSA *MDP-01-DP-10 "Temperatura y Presión de diseño"*. Los mismos se presentan en las Tabla 1.3 y Tabla 1.4.

Tabla 1.3 Temperatura de Diseño

Temperatura de Operación, °C	Temperatura de diseño, °C
$T < -17,78$	$T - 1,11$
$0 < T < 398,89$	$T + 10$
$T > 398,89$	T

Tabla 1.4 Presión de Diseño

Presión de Operación, atm	Presión de diseño, atm
$P < 2,382$	3,402
$2,382 < P < 17,011$	$P_d + 1,701$
$17,011 < P < 39,467$	$P_d + 10\%$
$39,467 < P < 78,933$	$P_d + 3,947$
$P > 78,933$	$P_d + 5\%$

Tesis: "Diseño de una unidad piloto para simulación de tratamientos de aguas residuales oleosas utilizando el software HYSYS v3.2 en la Facultad de Ingeniería Química-UNAP"

Condiciones iniciales para la simulación

Presión : 1 atm

Temperatura : 25°C

Flujo : 5.96 m³/h

Modelo Termodinámico : NRTL-Ideal

Unidad de Ingeniería : Sistema Intenacional

Composición : Aguas oleosas (H₂O, metano, etano, propano, otros).

Se determinaron los parámetros de operación de la unidad de acuerdo a lo siguiente:

Tabla 6.1 Separador API

Nombre del Equipo		SEPARADOR API			
CONDICIONES DE OPERACIÓN					
Presión de Operación	atm	1	Temperatura de Operación	°C	30
Presión de Diseño	atm	3.4	Temperatura de Diseño	°C	40
DATOS DEL FLUIDO					
Caudal del Agua a T.P	m ³ /h	3.58	Densidad del Aceite Seco (a 40°C)	kg/m ³	936.44
Caudal del Aceite a T.P	m ³ /h	2.38	Densidad de la Mezcla	kg/m ³	936.4422
Caudal Total de Líquido a T.P	m ³ /h	5.96	Flujo Másico de la Mezcla	kg/h	5583.0684
Porcentaje Total de Aceite	%	40	Viscosidad Absoluta del Agua	kg/(m*s)	0.0006532
Densidad del Agua (a 40°C)	kg/m ³	994.1	Radio Equiv. Partícula (Aceite)	m	0.00015
CRITERIOS DE DISEÑO					
Profundidad del Separador	m (0.91-2.44)	0.182	Relación Profundidad/Ancho (D/Wc)	0.3-0.5	0.49726776
Ancho del Separador	m (1.83-6.10)	0.366	Gravedad	m/s ²	9.81
Tiempo de retención	h	0.045853874	Gravedad espec. agua e hidrocarburo (40°C)	0.9922	0.942
Factor de Corto Circuito		1.2	Relación Largo/Ancho	≥5	5

Tabla 6.2 Separador CPI

Nombre del Equipo		SEPARADOR CPI			
CONDICIONES DE OPERACIÓN					
Presión de Operación	atm	1	Temperatura de Operación	°C	30
Presión de Diseño	atm	3.4	Temperatura de Diseño	°C	40
DATOS DEL FLUIDO					
Caudal del Afluente a T.P	m ³ /h	3.58	Densidad del Agua	kg/m ³	994.1
Densidad de la mezcla de hidrocarburo	kg/m ³	936.4422	Viscosidad Absoluta del Agua (40°C)	kg/(m*s)	0.0006532
Radio Eq. Partícula (Aceite)	m (mayor a 30*10 ⁻⁶)	0.00015	Viscosidad Cinemática del Agua (40°C)	m ² /s	6.571E-07
DATOS DE LAS PLACAS CORRUGADAS					
Ancho (no debe ser mayor a 2m)	m	0.5	Inclinación de los Platos	° (45° y 60°)	45
Largo (no debe ser mayor a 2m)	m	1.1	Separación entre Platos	m (0.02 a 0.05 m)	0.05
Espesor	m	0.01	Gravedad específica del agua	0.9922	0.942
					9.81

Tabla 6.3 Sistema DAF

Nombre del Equipo		SISTEMA DAF			
CONDICIONES DE OPERACIÓN					
Presión de Operación	atm	1	Temperatura de Operación	°C	30
Presión de Diseño	atm	3.4	Temperatura de Diseño	°C	40
DATOS DEL FLUIDO					
Caudal del Afluente a T.P	m ³ /h	3.5772	Conc. Aceite (Salida)	mg/L (14-23)	20
Conc. Aceite (Entrada)	mg/L (30-150)	100	Conc. SS (Salida)	mg/L (12.5-20)	20
Conc. SS (Entrada)	mg/L	150	Presión Manométrica (entre 1 a 4.08 atm)	atm	1.1
Densidad del agua	kg/m ³	994.1	Dosis de Coagulante	mg/L	50
Lodo Producido por Coagulante	kg/kg coag.	0.04	% Sólidos en el Lodo	%	80
CRITERIOS DE DISEÑO					
Factor de Eficiencia (FE)	0.5-0.8	0.52	Tiempo de Retención (Floc.)	min. (5-15)	10
Tiempo Retención (Presuriz.)	min.(1-3)	3	Tiempo de Retención (Flot.)	min. (20-40)	20

Tesis: "Diseño de una unidad piloto para simulación de tratamientos de aguas residuales oleosas utilizando el software HYSYS v3.2 en la Facultad de Ingeniería Química-UNAP"

Tabla 6.4 Sistema de Aeración

Nombre del Equipo	SISTEMA DE AERACIÓN				
CONDICIONES DE OPERACIÓN					
Presión de Operación	atm	1	Temperatura de Operación	°C	30
Presión de Diseño	atm	3.4	Temperatura de Diseño	°C	40
DATOS DEL FLUIDO					
Caudal del Afluente	m ³ /h	3.58	DBO en Efluente	mg/L	50
DBO en Afluente	mg/L (250-350)	250	Remoción de DBO y E (12 poroso y 8 no poroso)-%	80	12
CRITERIOS DE DISEÑO					
Tiempo de Retención	h (3-5/mezcla completa) se as	1	Exceso de Oxígeno	% (+20)	25.2
Profundidad del Agua	m (1.83-4.57) se asume 1	1	Temperatura de Aire	°C	40
Relación Ancho/Profundidad (W/D)	1.5-2	1.5	Caudal de aire necesario aereador difusión	m ³ /h	10.8748747
Altura de Borde Libre	m (0.46 difusión)	0.46	Presión ambiente	atm	1

Tabla 6.5 Sistema de clarificador o sedimentador

Nombre del Equipo	SISTEMA DE CLARIFICADOR				
CONDICIONES DE OPERACIÓN					
Presión de Operación	atm	1	Temperatura de Operación	°C	30
Presión de Diseño	atm	3.4	Temperatura de Diseño	°C	40
DATOS DEL FLUIDO					
Caudal del Afluente (Promedio)	m ³ /h	3.58	Concentración de Sólidos Suspendidos	mg/L	250
Caudal del Afluente (Pico)	m ³ /h	3.93492			
CRITERIOS DE DISEÑO					
Porcentaje de Reciclo	% (0-30)	30	Relación Longitud/Ancho (L/W)	2 a 5	5
Tiempo de Retención	min	10	Relación Largo/Profundidad (L/D)	5 a 20	20
Razón Alimentación Sólidos (Promedio)	kg/(h.m ²)-(4-6)	4	N° Clarificadores Rectangulares		1
Razón Alimentación Sólidos (Pico)	kg/(h.m ²)-(10)	10	N° Clarificadores Circulares		1
Profundidad Capa Sólidos	m (0.6-0.9)	0.6			

Tabla 6.6 Sistema de cloración

Nombre del Equipo	SISTEMA DE CLORACIÓN				
CONDICIONES DE OPERACIÓN					
Presión de Operación	atm	1	Temperatura de Operación	°C	30
Presión de Diseño	atm	3.402	Temperatura de Diseño	°C	40
DATOS DEL FLUIDO					
Caudal del Afluente (Promedio)	m ³ /h	3.58	Caudal del Afluente (Pico)	m ³ /h	3.93492
CRITERIOS DE DISEÑO					
Tiempo de Contacto (Promedio)	min	30	Ancho del Canal	m	1
Tiempo de Contacto (Pico)	min	40	Altura del Borde Libre	m	0.5
N° Pantallas por Tanque (baffles)	3 a 11	5	Profundidad del Agua	m	0.9
DATOS SOBRE LA DOSIS DE CLORO					
Dosis de Cloro	mg/L	1.35	Concentración de Cloro (Solución)	%	60

Tabla 2.7 Consumo de químicos.

N°	Nombre del químico	Servicio	Dosis (l/h)	Cosumo estimado (L)
1	Propilenglicol (100%)	Desemulsificante	0.17	62
2	Cloruro de aluminio (50%)	Floculante	0.60	214
3	Soda cáustica (Sol. 45%)	Control de pH	2.70	961
4	Polielectrolito (100%)	Floculante	0.33	119
5	Hipoclorito de sodio (10%)	Desinfección	0.30	107
6	Trietanolamina	Anti incrustante	0.03	10.4

Tesis: "Diseño de una unidad piloto para simulación de tratamientos de aguas residuales oleosas utilizando el software HYSYS v3.2 en la Facultad de Ingeniería Química-UNAP"

Tabla 2.8 Consumo de energía eléctrica.

Descripción	N° de unidades	Filosofía		Consumo de electricidad (Hp/Kw)	Tensión (V)
		Operativa	Respado		
Bomba 1	2	1	1	1.5/1.6	480
Bomba 2	2	1	1	1.5/1.6	480
Bomba 3	2	1	1	1.5/1.6	480
Agitador de tanque floculador	1	N/A	N/A	0.5/0.53	480
Motor	1	N/A	N/A	2/2.13	480

Se elaboraron hojas de cálculos, diagramas de flujo de proceso, diagramas de bloques, diagramas de tuberías para facilitar el diseño de la unidad piloto de tratamiento de aguas residuales oleosas.

CUADRO DE RESULTADOS FINALES OBTENIDOS POR MUESTRAS DE EFLUENTES

Se debe tener en cuenta que los datos reales de los parámetros fisicoquímicos de los efluentes se obtienen directamente de un ensayo y análisis de laboratorio.

El software HYSYS V3.2 realiza un cálculo referencial de los parámetros fisicoquímicos de los efluentes vertidos los cuales se muestran en los siguientes cuadros.

Resultados finales de los parámetros fisicoquímicos de las muestras de Efluentes (Petroperú – Electro Oriente).

PARÁMETRO	UNIDAD	RESULTADO
T	°C	26.29
pH	Adm.	7.47
COLOR	Unid. Pt-Co	13.24
SST	mg/L	12.30
DBO	mg/L	109.59
DQO	mg/L	236.02
AGMH	mg/L	27.0
NT	mg/L	09.55
FT	mg/L	0.06
SULFUROS	mg/L	1.00
FLUORUROS	mg/L	0.32
FENOLES	mg/L	0.05
CT	NMP/100mL	266.33

Muestra Petroperú 2016

PARÁMETRO	UNIDAD	RESULTADO
T	°C	25.00
pH	Adm.	7.17
COLOR	Unid. Pt-Co	11.04
SST	mg/L	13.25
DBO	mg/L	100.19
DQO	mg/L	218.00
AGMH	mg/L	23.01
NT	mg/L	09.18
FT	mg/L	0.06
SULFUROS	mg/L	1.19
FLUORUROS	mg/L	0.45
FENOLES	mg/L	0.09
CT	NMP/100mL	217.08

Fuente: Electro Oriente 2016

6.2 Discusiones

El conocimiento de los parámetros fisicoquímicos del material a tratar permite la determinación de condiciones, el comportamiento de los valores, la verificación del cumplimiento de los límites y rangos establecidos normativas legales vigentes. Además de la representación gráfica de todos los parámetros, se calcularon al conjunto de datos, valores promedios, rangos y las desviaciones existentes a partir de dos tablas (Tabla 2.2 y 2.3) que se utilizaron como datos iniciales para dichos cálculos. En la evaluación del diseño de las principales unidades se utilizaron los estándares recomendados por la bibliografía especializada.

La entrada en la unidad separadores API y CPI es intermitente, dependiendo de la necesidad y del abastecimiento de las diferentes aguas oleosas, ocasionando que los caudales de entrada no sean constantes.

Con respecto al análisis comparativo entre las variables de operación con las de diseño, los parámetros y condiciones se determinan de acuerdo a la Norma PDVSA MDP-01-DP-10 "Temperatura y Presión de diseño". Los mismos se presentan en las Tabla 1.3 y Tabla 1.4.

Para que los equipos mecánicos no originen muchas perturbaciones sobre el proceso, la profundidad del tanque debe estar comprendida entre 0.91 y 2.44 m.

El ancho del canal queda limitado entre 1.83 y 6.10 m.

Para el buen desempeño del equipo, el radio equivalente de las gotas de aceite debe ser superior a $150 \cdot (10^{-6})$ m. Norma PDVSA MDP – 09 – EF – 05 "Diseño Conceptual de Tecnologías de Control de Efluentes"

El tiempo de retención para el tanque de presurización se establecerá entre 1 y 3 min.

El tiempo de retención para el tanque de floculación se establecerá entre 5 y 15 min.

El tiempo de retención para el tanque de flotación se establecerá entre 20 y 40 min.

Los vertidos líquidos generados, la tecnología más favorable será aquella que requiera del uso de equipos sencillos, disponibles en el país, de bajo costo y mantenimiento para su tratamiento.

Se elaboraron diagramas de flujos de proceso, de bloques, de líneas, para facilitar la selección de tecnologías de acuerdo a la composición del efluente que se desea tratar, el cual permite un fácil entendimiento de la secuencia de actividades a realizar y proporciona acceso rápido a la información.

CAPÍTULO VII. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

7.1 Conclusiones

Después de finalizar el proyecto y cumplir con los objetivos planteados se puede concluir que:

- Se logró diseñar una unidad piloto para el tratamiento de aguas residuales oleosas, con pasos y actividades involucradas en el proyecto, los cuales permitieron normalizar y garantizar la ejecución del proyecto.
- Se determinaron las condiciones y cálculos de diseño, los cuales sirvieron para dimensionar los equipos más comunes para la unidad piloto, se crearon hojas de cálculo que facilitaron dicho proceso y proporcionaron la flexibilidad de arrojar los resultados de distintas unidades.
- Se determinaron y optimizaron los parámetros de operación de la unidad, con el cual se logró identificar los pasos y actividades involucradas en el diseño de la unidad piloto, sirvieron como base para la estructuración del manual de operación.
- Se evaluaron los equipos de la unidad piloto estableciendo y determinando las condiciones óptimas de funcionamiento y las dimensiones necesarias que conforman cada tecnología, permitiendo que la información esté clara, completa y concisa. La incorporación del diagrama de flujo de proceso de diseño permitirá la ubicación y disposición de forma inmediata de los equipos, lo cual se traduce en un aumento de la eficiencia.

7.2 Recomendaciones

Una vez concluido este proyecto surgen las siguientes recomendaciones:

- Se recomienda hacer una investigación de mercado sobre los precios de adquisición y operación de las tecnologías de tratamiento de aguas oleosas descritas en el proyecto, para poder contar con la información al ponderar las tecnologías en el criterio económico.
- Realizar una ampliación del manual de operación para incluir las tecnologías disponibles para el tratamiento de aguas oleosas de manera de completar la información ya existente y poder diseñar completamente una planta destinada para ese fin.
- Elaborar un manual de procedimiento para el manejo de desechos sólidos ya que los mínimos generados durante el tratamiento deben ser dispuestos de manera adecuada de acuerdo a las legislaciones ambientales vigentes.
- Realizar simulaciones y condiciones iniciales de datos en otros programas de simulación como: Super Pro, Chemcad y otros, con el fin de optimizar parámetros y eficiencia en los diseños de unidades pilotos.

Tesis: "Diseño de una unidad piloto para simulación de tratamientos de aguas residuales oleosas utilizando el software HYSYS v3.2 en la Facultad de Ingeniería Química-UNAP"

VIII. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

1. Chávez L. Tesis: Evaluación del sistema de tratamiento de aguas oleosas residuales. Instituto Superior José Antonio Echevarría. Barcelona, 2010.
2. Álvarez A. Tesis: Procedimiento para el diseño de una planta de tratamiento de efluentes industriales, Universidad Simón Bolívar. Sartenejas, 2009.
3. Rodríguez A. y Letón P. Tratamientos avanzados de aguas residuales industriales. Madrid, 2006.
4. Valdez C. Tesis: Tratamiento físico-químico de residuos oleosos. Universidad Nacional de Ingeniería. Perú, 2011.
5. Espinoza J. Tratamiento y disposición final de residuos industriales generados en una Refinería. Lima. 2009.
6. Carrasco M. y Oré J. Tratamiento de las borras ácidas producidas en la manufactura de las bases lubricantes del tipo L.C.T. en la Refinería Talara. Lima. 2008.
7. Espinosa I. Construcción de un prototipo de para el tratamiento de lodos de aceite de una central termoeléctrica (Elecaastro). Ecuador. 2006.
8. Thanh, P. (2002). Oily wastewater treatment by membrane bioreactor process coupled with biological activated carbon process. A thesis for the degree of master of engineering. Asian institute of technology school of environment, resource and development. Thailand.
9. Beychok, 1967
10. Koytsoykos, A. (2009). Oil refineries waste waters treatment. Chemical and biochemical technology applications for wastes treatment and water – gases production machineries construction – complete plants installation.
11. Metcalf, M., Eddy, E. "Ingeniería de las aguas residuales, tratamiento, vertido y reutilización". Tercera edición. Editorial McGraw-Hill. México (2003).
12. Eckenfelder, J., Wesley, W. "Industrial water pollution". Third edition McGraw-Hill. USA (2005).
13. Kinman, 1975 Criterios para el Diseño Conceptual de Procesos de Deshidratación/desalación Electrostática. Revista Visión Tecnológica Vol. Nº 3,35 - 43.
14. Fuente: ibid. P. 18,22,23,27,29,30,31
15. La Constitución Política del Perú de 1993 (art. 2º, inc. 22º; art. 66º y 67º).
16. Decreto Legislativo Nº 28611, 13-10-2005: La Ley General del Ambiente (art. 1º, 91º y 113º).
17. Decreto Legislativo Nº 757, 13-11-91: Ley Marco para el Crecimiento de la Inversión Privada en el Perú (art. 49º).
18. Ley Nº 29338: Ley de recursos hídricos, numeral 15.3 del art. 15º.
19. Resolución Jefatural Nº224-2013-ANA: Reglamento para el otorgamiento de autorizaciones de vertimiento y reuso de aguas residuales tratadas (art. 5º, 6º y 7º).
20. Decreto Legislativo Nº 613, 08-09-90: Código del Medio Ambiente y los Recursos Naturales (art. 14º, 73º, 76º y 77º)
21. Ley Nº 26221, 26-08-93: Ley Orgánica de los hidrocarburos.

Tesis: "Diseño de una unidad piloto para simulación de tratamientos de aguas residuales oleosas utilizando el software HYSYS v3.2 en la Facultad de Ingeniería Química-UNAP"

22. Decreto Supremo N° 032-2004-EM: Reglamento de las Actividades de Exploración y Explotación de Hidrocarburos (art. 122°, 132° y 165°).
23. Decreto Supremo N° 043-2007-EM: Reglamento de Seguridad para las Actividades de Hidrocarburos (art. 70° y 145°).
24. Decreto Supremo N° 039-2014-EM: Reglamento para la Protección Ambiental en las Actividades de Hidrocarburos (art. 3°, 52°, 57°, 58°, 82°, 84°, 93° y 95°)
25. Ley N° 29134: Ley que regula los Pasivos Ambientales del Subsector Hidrocarburos, 20-11-2007 (art. 4° y 6°).
26. Decreto Legislativo N° 613 (08-09-90); Código del Medio Ambiente y los Recursos Naturales (art. 14° y 73°).
27. Decreto Supremo N° 039-2014-EM Reglamento para la Protección Ambiental en las Actividades de Hidrocarburos (art. 3°, 57°, 58°, 82°, 84° y 93°).
28. Estándares del Banco Mundial (*World Bank Standards*), *Water Resources and Environment. Water Quality: Assesment and Protection*,
29. Decreto Supremo N° 002-2008-MINAM (Artículo 1°.- Aprobación de los Estándares Nacionales de Calidad Ambiental para Agua).
30. Decreto Supremo N° 003-2010-MINAM, Límites máximos permisibles para los efluentes de plantas de tratamiento de aguas residuales domésticas o municipales (PTAR).
31. Decreto Supremo N° 037-2008-PCM, Límites máximos permisibles de efluentes líquidos para el subsector hidrocarburos.
32. R.D. N° 008-97-EM/DGAA.-Aprueban niveles máximos permisibles para efluentes líquidos producto de las actividades de generación, transmisión y distribución de energía eléctrica.
33. Decreto Supremo N° 057-2004-PCM, Reglamento de la Ley N° 27314, Ley General de Residuos Sólidos, (art. 17° y 47°).
34. Norma PDVSA MDP-09-EF-05 "Diseño Conceptual de Tecnologías de Control de Efluentes". Venezuela, 2006.
35. Fuente: petroperu 2016
36. Fuente : electro oriente 2016
37. Norma PDVSA MDP-01-DP-10 "Temperatura y Presión de diseño". Venezuela, 2006.

Tesis: "Diseño de una unidad piloto para simulación de tratamientos de aguas residuales oleosas utilizando el software HYSYS v3.2 en la Facultad de Ingeniería Química-UNAP"

IX Bibliografía

1. Castañeda J. Tesis: Diseño de una fosa para la separación de las aguas aceitosas drenadas de los tanques de almacenamiento de crudo en la Refinería de Puerto La Cruz. Universidad de Oriente. Venezuela, 2010.
2. Martínez G., Silva E. y Pérez R. Perspectivas para el aprovechamiento de lodos de desecho Industrial. Lima. 1994.
3. McCabe & Smith. Operaciones Básicas de Ingeniería Química. México: Editorial Reverté; 2000.
4. Lee, C. C. y Lin, S.D. (2007), Handbook of Environmental Engineering Calculations, 2° edición, McGraw-Hill Inc, Estados Unidos
5. Pacific S.A. – Consultores y Proyectos. Estudio de Impacto Ambiental – Proyecto de rellenos de desechos industriales de la Refinería Talara, Petróleos del Perú S.A. Lima. 1998.
6. Ramalho R. Tratamiento de aguas residuales. Madrid: Editorial Reverté S.A; 1993.
7. Stephenson, R. L. Blackburn, J. W. y Blackburn, J.B. (1997), The Industrial Wastewater Systems Handbook, CRC Press LLC, Estados Unidos.
8. Tamara C. R. Oil Refinery Scheduling Optimisation. EEUU: Cranfield University Process & System Engineering; 2003.
9. Treybal R. E. Operaciones con transferencia de masa. México: Editorial McGraw Hill; 1973.
10. Ulrich G. Diseño y economía de procesos de ingeniería química. México: Editorial McGraw Hill; 1984.

IX. ANEXOS

9.1 Tablas de Límites máximos permisibles

Tabla 9.1. Límites de descarga de acuerdo a los estándares del Banco Mundial.

Parámetro Físico - Químico	Límite Máximo o Rangos
Aceites minerales e hidrocarburos	10 mg/L
Aceites y grasas animales y vegetales	10 mg/L
Arsénico total	0,1 mg/L
Cadmio total	0,1 mg/L
Cianuro total	0,1 mg/L
Cloro (Residual)	0,2 mg/L
Cobre total	0,5 mg/L
Cromo total	0,1 mg/L
Demanda Bioquímica de Oxígeno	50 mg/L
Demanda Química de Oxígeno	250 mg/L
Fenoles	0,5 mg/L
Fluoruros	20 mg/L
Fósforo total	2,0 mg/L
Hierro total	3,5 mg/L
Mercurio total	0,01 mg/L
Amoníaco	10 mg/L
pH	6 – 9
Plata total	0,5 mg/L
Plomo total	0,2 mg/L
Selenio	0,1 mg/L
Sólidos suspendidos	50 mg/L
Sulfuros	1,0 mg/L
Zinc	2,0 mg/L

Tabla 9.2 Estándares Nacionales de calidad ambiental para agua

Categoría 4: Conservación del Ambiente Acuático						
Parámetro	Unidades	Lagunas y Lagos	Ríos		Ecosistema Marino Costeros	
			Costa y Sierra	Selva	Estuarios	Marinos
Físicos y Químicos						
Aceites y grasas	mg/L	Ausencia de película visible	Ausencia de película visible	Ausencia de película visible	1	1
Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO ₅)	mg/L	< 5	<10	<10	15	10
Nitrógeno Amoniacal	mg/L	< 0.02	0.02	0.05	0.05	0.08
Temperatura	°C					delta 3°C
Oxígeno Disuelto	mg/L	≥ 5	≥ 5	≥ 5	≥ 4	≥ 4
pH	-	6.5-8.5	6.5-8.5		6.5-8.5	6.5-8.5
Sólidos Disueltos Totales	mg/L	500	500	500	500	
Sólidos Suspendedos Totales (Como se interpreta esta escala ≤ 25 – 100, ≤ 25 – 400)	mg/L	≤ 25	≤ 25 - 100	≤ 25 - 400	≤ 25 - 100	30.00
Inorgánicos						
Arsénico	mg/L	0.01	0.05	0.05	0.05	0.05
Bario	mg/L	0.7	0.7	1	1	---
Cadmio	mg/L	0.004	0.004	0.004	0.005	0.005
Cianuro Libre	mg/L	0.022	0.022	0.022	0.022	---
Clorofila A	mg/L	10	---	---	---	---
Cobre	mg/L	0.02	0.02	0.02	0.05	0.05
Cromo VI	mg/L	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
Fenoles	mg/L	0.001	0.001	0.001	0.001	
Fosfatos Total	mg/L	0.4	0.5	0.5	0.5	0.031-0.093
Hidrocarburo de Petróleo Aromáticos Totales	Ausente				Ausente	Ausente

Categoría 4: Conservación del Ambiente Acuático						
Parámetro	Unidades	Lagunas y Lagos	Ríos		Ecosistema Marino Costeros	
			Costa y Sierra	Selva	Estuarios	Marinos
Mercurio	mg/L	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001
Nitratos (N-NO ₃)	mg/L	5	10	10	10	0.07-0.28
Inorgánicos						
Nitrógeno Total	mg/L	1,6	1,6		---	---
Níquel	mg/L	0.025	0.025	0.025	0.002	0.052
Plomo	mg/L	0.001	0.001	0.001	0.0061	0.0061
Silicatos	mg/L	---	---	---	---	0.14-0.7
Sulfuro de Hidrógeno (H ₂ S indispensable)	mg/L	0.002	0.002	0.002	0.002	0.06
Zinc	mg/L	0.03	0,03	0.3	0.03	0.081
Microbiológicos						
Coliformes Termotolerantes	(NMP/100mL)	1,000		2,000	1,000	≤ 30
Coliformes Totales	(NMP/100mL)	2,000		3,000	2,000	

NOTA: Aquellos parámetros que no tienen valor asignado se debe reportar cuando se dispone de análisis.
 Dureza: Medir "dureza" del agua muestreada para contribuir en la interpretación de los datos (método-técnica recomendada: APHA-AIWWA-WPCF 2340C)
 Nitrógeno total: Equivalente a la suma de nitrógeno Kjeldahl Total (Nitrógeno orgánico y amoniacal), nitrógeno en forma de nitrato y nitrógeno en forma de nitrato (NO_x)
 Amoniacal: Como NH₃ no ionizado.
 NMP/100 mL: Número más probables de 100 mL.
 Ausente: No deben estar presentes a concentraciones que sean detectables por olor, que afecten a los organismos comestibles, que puedan formar depósitos de sedimentos en las orillas o en el fondo, que puedan ser detectadas como películas visibles en la superficie o que sean nocivos a los organismos acuáticos presentes.

Tesis: "Diseño de una unidad piloto para simulación de tratamientos de aguas residuales oleosas utilizando el software HYSYS v3.2 en la Facultad de Ingeniería Química-UNAP"

Tabla 9.3 Límites máximos permisibles para los efluentes de PTAR

PARÁMETRO	UNIDAD	LMP DE EFLUENTES PARA VERTIDOS A CUERPOS DE AGUAS
Aceites y grasas	mg/L	20
Coliformes Termotolerantes	NMP/100 mL	10,000
Demanda Bioquímica de Oxígeno	mg/L	100
Demanda Química de Oxígeno	mg/L	200
pH	unidad	6.5-8.5
Sólidos Totales en Suspensión	mL/L	150
Temperatura	°C	<35

Tabla 9.4 Límites máximos permisibles de efluentes líquidos para el subsector hidrocarburos

Parámetro Regulado	LÍMITES MÁXIMOS PERMISIBLES (mg/l) (Concentraciones en Cualquier momento)
Hidrocarburos Totales de Petróleo (TPH)	20
Cloruro	500 (a ríos, lagos y embalses) 2000 (estuarios)
Cromo Hexavalente	0,1
Cromo Total	0,5
Mercurio	0,02
Cadmio	0,1

Tesis: "Diseño de una unidad piloto para simulación de tratamientos de aguas residuales oleosas utilizando el software HYSYS v3.2 en la Facultad de Ingeniería Química-UNAP"

Parámetro Regulado	LÍMITES MÁXIMOS PERMISIBLES (mg/l) (Concentraciones en Cualquier momento)
Arsénico	0,2
Fenoles para efluentes de refinerías FCC	0,5
Sulfuros para efluentes de refinerías FCC	1,0
Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO)	50
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	250
Cloro residual	0,2
Nitrógeno amoniacal	40
Coliformes totales (NMP/100 mL)	< 1000
Coliformes Fecales NMP/100 mL)	< 400
Fósforo	2,0
Bario	5,0
pH	6,0 - 9,0
Aceites y grasas	20
Plomo	0,1
Incremento de Temperatura ^a	<3°C

^a. Es el incremento respecto a la temperatura ambiental del cuerpo receptor medida a 100 m de diámetro del punto de vertido.

Tabla 9.5 Niveles máximos permisibles de emisión de efluentes líquidos para las actividades de electricidad

PARÁMETRO	VALOR EN CUALQUIER MOMENTO	VALOR PROMEDIO ANUAL
pH	Mayor que 6 y menor que 9	Mayor que 6 y menor que 9
Aceites y Grasas (mg/l)	20	10
Sólidos suspendidos (mg/l)	50	25

9.2 Tablas de densidad, gravedad específica de diferentes compuestos

Tabla 9.6 Densidades de Hidrocarburos a 15°C

Densidad de Hidrocarburos a 60°F (15°C)		
	Densidad	
	lb _m /ft ³	(kg/m ³)
Hidrocarburos		
Hidrocarburo Pesado	58	916
Hidrocarburo Mediano	57	909
Hidrocarburo Liviano	53	836
Diesel	52	835
Gasolina	45	724
Gasolina Premium	43	689

Tabla 9.7 Gravedad específica de algunos Hidrocarburos a 15°C

Tesis: "Diseño de una unidad piloto para simulación de tratamientos de aguas residuales oleosas utilizando el software HYSYS v3.2 en la Facultad de Ingeniería Química-UNAP"

Gravedad Especifica de Hidrocarburos	
Hidrocarburo Pesado	0.917
Hidrocarburo Mediano	0.910
Hidrocarburo Liviano	0.837
Diesel	0.836
Gasolina	0.725
Gasolina Premium	0.690

Tabla 9.8 Densidad del agua a diferentes temperaturas

Temperatura (°C)	Densidad		Temperatura (°C)	Densidad	
	(gr/cm ³)	(kg/m ³)		(gr/cm ³)	(kg/m ³)
0 (hielo)	0.91700	917.00	19	0.99843	998.43
0 (agua)	0.99987	999.87	20	0.99823	998.23
1	0.99993	999.93	21	0.99802	992.02
2	0.99997	999.97	22	0.99780	997.80
3	0.99999	999.99	23	0.99757	997.57
4	1.00000	1000.00	24	0.99753	997.53
5	0.99999	999.99	25	0.99707	997.07
6	0.99997	999.97	26	0.99681	996.81
7	0.99993	999.93	27	0.99654	996.54
8	0.99988	999.88	28	0.99626	996.26
9	0.99981	999.81	29	0.99597	995.97
10	0.99973	999.73	30	0.99568	995.68
11	0.99963	999.63	40	0.99224	992.24
12	0.99952	999.52	50	0.98807	988.07
13	0.99940	999.40	60	0.98324	983.24
14	0.99927	999.27	70	0.97781	977.81
15	0.99913	999.13	80	0.97183	971.83
16	0.99897	998.97	90	0.96534	965.34
17	0.99880	998.80	100	0.95838	958.38
18	0.99862	998.62			

Tabla 9.9 Viscosidad del agua a diferentes temperaturas

Temperatura (°C)	Viscosidad dinámica o absoluta (poises)	Viscosidad cinemática (stokes)	Temperatura (°C)	Viscosidad dinámica o absoluta (poises)	Viscosidad cinemática (stokes)
0	0.01792	0.01792	19	0.01034	0.01036
1	0.01732	0.01732	20	0.01009	0.01010
2	0.01674	0.01674	21	0.00984	0.00986
3	0.01619	0.01619	22	0.00961	0.00963
4	0.01568	0.01568	23	0.00938	0.00940
5	0.01519	0.01519	24	0.00916	0.00919
6	0.01473	0.01473	25	0.00895	0.00897
7	0.01429	0.01429	26	0.00875	0.00877
8	0.01387	0.01387	27	0.00855	0.00858
9	0.01348	0.01348	28	0.00836	0.00839
10	0.01310	0.01310	29	0.00818	0.00821
11	0.01274	0.01274	30	0.00800	0.00804
12	0.01239	0.01240	40	0.00653	0.00658
13	0.01206	0.01206	50	0.00549	0.00556
14	0.01175	0.01176	60	0.00466	0.00474
15	0.01145	0.01146	70	0.00406	0.00415
16	0.01116	0.01117	80	0.00354	0.00364
17	0.01088	0.01089	90	0.00315	0.00326
18	0.01060	0.01061	100	0.00284	0.00296

Tabla 9.10 Propiedades del agua en función de su temperatura

Temperatura T [°C]	Densidad ρ_{agua} [Kg/m ³]	Calor específico C_p [J/kg.K]	Viscosidad μ [Pa.s]	Tensión superficial. σ_{agua} [N/m]
0	999.8	421.76	1793x10 ⁻⁶	0.07564
5	1000.0			
10	999.7	419.21	1307x10 ⁻⁶	0.07423
15	999.1			
20	998.2	418.18	1002x10 ⁻⁶	0.07275
25	997.0			
30	995.6	417.84	797.7x10 ⁻⁶	0.07120
35	994.1			
40	992.2	417.85	653.2x10 ⁻⁶	0.06960
45	990.2			
50	988.1	418.06	547.0x10 ⁻⁶	0.06794
55	985.7			
60	983.2	418.43	466.5x10 ⁻⁶	0.06624
65	980.6			
70	977.8	418.95	404.0x10 ⁻⁶	0.06447
75	974.9			
80	971.8	419.63	354.4x10 ⁻⁶	0.06267
85				
90	965.3	420.5	314.5x10 ⁻⁶	0.06080
95				
100	958.4	421.59	281.8x10 ⁻⁶	0.05891

9.3 Tablas mecánicos

Tabla 9.11 Accesorios y su relación K correspondiente.

Accesorio	K
Codo estándar 90°	30 x f
Codo estándar 45°	16 x f
Conexión estándar "T" flujo directo	20 x f
Conexión estándar "T" flujo desviado a 90°	60 x f
Válvula de compuerta	8 x f
Válvula check	50 x f
Válvula pie	75 x f
Válvula de globo	340 x f

9.4 Figuras

Fig. 9.1 Principio de la floculación

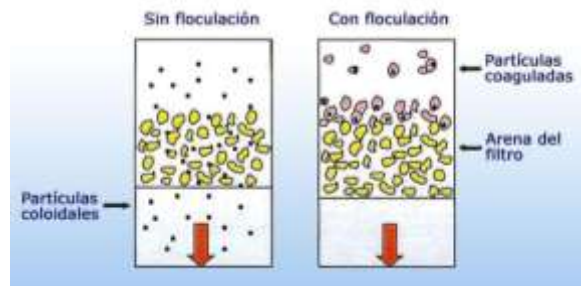
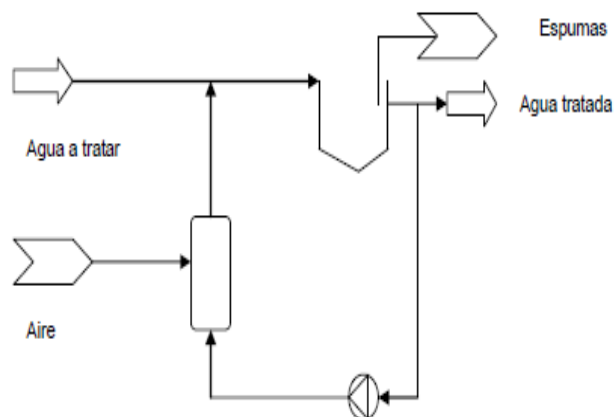


Fig. 9.2 Esquema sistema Flotación con presurización de la recirculación



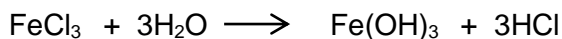
9.5 Balance y cálculos del consumo e inyección de químicos.

9.5.1 Coagulación

FeCl₃

Reactivo utilizado: FeCl₃

La reacción que tiene lugar entre el cloruro férrico y el agua es la siguiente:



En primer lugar, se ajusta la cantidad de reactivo necesaria:

Dosificación: 50 ppm

$$50 \text{ mg/L} = 0.05 \text{ Kg/m}^3$$

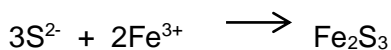
Siendo el Q_{máx} = 3 m³/h:

$$0.05 \text{ Kg/m}^3 * 3 \text{ m}^3/\text{h} = 0.15 \text{ Kg/h}$$

Puesto que este reactivo se encuentra en el mercado al 36%, la dosis necesaria sería de:

$$0.15 \text{ Kg/h} * 100/36 = 0.42 \text{ Kg/h}$$

Por otra parte, se tiene la siguiente reacción:



Se realiza el cálculo partiendo de una concentración de 22 ppm de S²⁻ en el agua residual:

$$22 \text{ ppm} = 22 \text{ g/m}^3$$

Puesto que el Peso Molecular del Azufre (S) es 32,06 g/mol,

$$22 \text{ g/m}^3 * \frac{1 \text{ mol}}{32,06 \text{ g}} = 0,69 \text{ mol/m}^3$$

$$0,69 \text{ mol/m}^3 * 3 \text{ m}^3/\text{h} = 2.07 \text{ mol/h}$$

Por la estequiometría de la reacción: Moles Fe³⁺ = 2/3 moles S²⁻

$$\text{Moles Fe}^{3+} = 2/3 * 2.07 \text{ mol/h}$$

$$\text{Moles Fe}^{3+} = 1.38 \text{ mol/h}$$

De esta forma, siendo el PM FeCl₃ = 162.2:

$$1.38 \text{ mol/h} * 162.2 \text{ g/mol} = 223,84 \text{ g/h}$$

La dosificación de FeCl₃ tomando su concentración de 36 %, será de 0.62 Kg/h

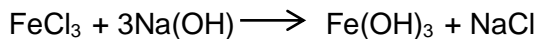
Teniendo en cuenta los cálculos anteriores, la dosificación total de FeCl₃ será de 1,04 Kg/h

Ajuste del pH

El pH inicial está cambiando, por ello se hace el cálculo para el caso más desfavorable: cuando el pH tenga un valor 7 y haya que neutralizar el HCl generado por el FeCl_3

NaOH

Para ajustar el valor idóneo de pH, se lleva a cabo la dosificación de un producto alcalino como puede ser la sosa. Una de las ventajas de utilizar este producto es que en refinería tienen la llamada "sosa gastada", que se puede utilizar ahorrando costes en el proceso.



$$\text{Moles } \text{FeCl}_3 = 1/3 \text{ Moles}$$

NaOH

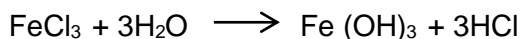
$$0.92 = 1/3 \text{ Moles NaOH}$$

$$\text{Moles NaOH} = 2.76 \text{ moles/h}$$

$$\text{PM NaOH} = 40 \text{ g/mol}$$

La dosificación total de **NaOH** será de **0.11 Kg/h**

Por otra parte, calculo los Kg/h de HCl generados al añadir el **FeCl₃**:



$$\text{Moles HCl} = 3 \text{ moles}$$

FeCl₃

$$\text{Moles HCl} = 3 * 0.92$$

$$\text{Moles HCl} = 2.76$$

Siendo el PM del HCl = 36,5 g/mol, la cantidad de **HCl** generado será de **0.10 Kg/h**

De esta forma, en caso de que el pH del agua de entrada tuviera un valor 7, se neutralizaría el HCl con la cantidad de NaOH anteriormente indicada. Si por el contrario el valor de pH del agua de entrada tuviera un valor de 10, es decir, un pH alcalino, en lugar de añadir NaOH habría que adicionar ácido para disminuir ese valor de pH.

9.5.2 Floculación

El reactivo utilizado será un polielectrolito, es decir, un polímero orgánico de alto peso molecular y largas cadenas.

La cantidad a utilizar será de 3 ppm.

Se puede determinar la dosificación teniendo en cuenta el Caudal Máximo:

$$0,003 \text{ Kg/m}^3 \cdot 360 \text{ m}^3/\text{h} = 1,08 \text{ Kg/h}$$

9.5.3 Flotación

El sistema utilizado será el de Presurización de la recirculación. Los equipos empleados son:

- Tanque de flotación, donde tiene lugar la separación de los contaminantes.
- Sistema de adicción de aire.
- Calderín de presurización.
- Equipo de bombeo para llevar a cabo la presurización.

Dimensionamiento de los equipos

La variación de la solubilidad con la presión va a seguir la ley de Raoult:

$$X_S^P = P \cdot X_S^1$$

Siendo

X_S^P : Solubilidad del aire en agua (Kg/m³) a la presión determinada

P: Presión absoluta en atmósferas

X_S^1 : Solubilidad del aire en agua (Kg/m³) a una atmósfera

En la bibliografía se encuentra la solubilidad del aire a presión atmosférica en el agua en función de la temperatura. En este caso, para una Temperatura de entre 30 y 40°C, se toma la solubilidad aire/agua en ppm a 40°C, ya que es el valor más desfavorable, y encontramos un valor de 14.

Hay que tener en cuenta que esta solubilidad aire-agua corresponde a un agua pura. En un agua residual la solubilidad se encuentra entre el 60 y 80% del valor teórico. Si se toma el 70%, la solubilidad será de 9,8 ppm.

Determinación de la carga horaria de contaminantes a eliminar

La carga horaria de contaminantes a eliminar es la suma del caudal a tratar por la concentración de los diferentes contaminantes, en las unidades adecuadas para obtener el resultado en Kg/h.

$$A(kg/h) = p(Kg/Kg) \cdot k(Kg/h)$$

Siendo:

A: kilos de aire por hora precisos para La flotación, Kg/h

p: necesidades de aire por kilo de contaminante a eliminar, Kg/Kg

k: kilogramos de contaminantes a eliminar, Kg/h

Se fijan las necesidades de aire por kilo de contaminante que va a precisar el proceso:
0,004

$$A(Kg/h) = 0,004 \cdot 123 = 0,492 \text{ Kg/h}$$

Los kilogramos de contaminantes a eliminar será la suma de los sólidos en suspensión (SS) en Kg/h, de las grasas y aceites, y el $\text{Fe}(\text{OH})_3$ generado en la coagulación y el Fe_2S_3 de la precipitación.

Es decir:

Grasas y aceites: 100 ppm a la salida API; es decir, 26 Kg/h

SS: 125 ppm a la salida API; es decir, 32,5 Kg/h

$\text{Fe}(\text{OH})_3$: 47,3 Kg/h

Moles $\text{Fe}(\text{OH})_3 = \text{Moles HCl}/3 = 1332/3 = 444$; $\text{Fe}(\text{OH})_3 = 444 \cdot 106,5$

Fe_2S_3 : 17,14 Kg/h

Moles $\text{Fe}^{3+}/2 = \text{Moles Fe}_2\text{S}_3 = 82,8$; $\text{Fe}_2\text{S}_3 = 82,8 \cdot 207$

Total Carga Contaminante: 123 Kg/h

Esta cantidad de aire, debe ser disuelta en el caudal de recirculación, por lo tanto si se divide el valor de A entre la solubilidad del aire en agua (en Kg/m^3) en las condiciones de trabajo de presión y temperatura, se obtiene:

$$Q_R(m^3/h) = \frac{A(kg/h)}{X_S^P(Kg/m^3)}$$

Siendo:

Q_R caudal de recirculación, m^3/h

A: Kilos de aire por hora precisos para flotación, Kg/Kg

X_S^P : Solubilidad del aire en agua a la presión y temperatura de trabajo (Kg/m^3)

Tesis: "Diseño de una unidad piloto para simulación de tratamientos de aguas residuales oleosas utilizando el software HYSYS v3.2 en la Facultad de Ingeniería Química-UNAP"

$$X_S^P = 5 * 0,0098 \text{ Kg/m}^3$$

$$X_S^P = 0,049 \text{ Kg/m}^3$$

$$Q_R = 0,492/0,049$$

$$Q_R = 10,04 \text{ m}^3/\text{h}$$

De esta manera, el caudal a emplear en los cálculos de dimensionamiento del tanque de flotación será:

$$Q(\text{m}^3/\text{h}) = Q_D(\text{m}^3/\text{h}) + Q_R(\text{m}^3/\text{h})$$

Donde :

Q: caudal de alimentación al tanque flotador, m^3/h

Q_D : caudal de entrada a la planta, m^3/h

Q_R : caudal de recirculación, m^3/h

Tomando como el caudal de entrada a la planta el caudal máximo:

$$Q (\text{m}^3/\text{h}) = 3,60 + 10,04 = 13,64 \text{ m}^3/\text{h}$$

Tomando como el caudal de entrada a la planta el caudal medio:

$$Q (\text{m}^3/\text{h}) = 3,60 \text{ m}^3/\text{h}$$

$$S(\text{m}^2) = \frac{Q \left(\frac{\text{m}^3}{\text{h}} \right)}{CH \left(\frac{\text{m}^3}{\text{m}^2 \cdot \text{h}} \right)}$$

Donde:

CH: carga hidráulica, $\frac{\text{m}^3}{\text{m}^2} \cdot \text{h}$

La superficie se calcula tanto para el caudal máximo como para el medio, adoptándose el valor máximo obtenido:

Para $Q_{\text{máx}}$ y $CH = 3 \frac{\text{m}^3}{\text{m}^2} \cdot \text{h}$:

$$\mathbf{S (\text{m}^2) = 4.55 \text{ m}^2}$$

Para Q_{medio} y $CH = 2,5 \frac{\text{m}^3}{\text{m}^2} \cdot \text{h}$:

$$S \text{ (m}^2\text{)} = 1.44 \text{ m}^2$$

Siendo el diámetro:

$$\varphi = \sqrt{\frac{4xS}{\pi}}$$

$$\varphi = \sqrt{\frac{4x4.55}{\pi}} = 2.41 \text{ m}$$

$$\varphi = \sqrt{\frac{4x1.44}{\pi}} = 1.35 \text{ m}$$

El volumen del tanque se determina a partir del tiempo de retención preciso en este equipo:

$$\text{Vol(m}^3\text{)} = (Q_D(\text{m}^3/\text{h}) + Q_R(\text{m}^3/\text{h})) * \text{Tr(h)} = Q(\text{m}^3/\text{h}) * \text{Tr(h)}$$

Para Q máx:

$$\text{Vol (m}^3\text{)} = 13,64 * 0,67 = 9,14 \text{ m}^3$$

$$40 \text{ min} = 0,67 \text{ h}$$

Para Qmedio:

$$\text{Vol (m}^3\text{)} = 3,60 * 1 = 3,60 \text{ m}^3$$

$$60 \text{ min} = 1 \text{ h}$$

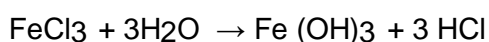
Se seleccionan los 3,60 m³ de volumen, puesto que es el resultado más desfavorable

$$\mathbf{h \text{ (m)} = \text{vol (m}^3\text{)} / S \text{ (m}^2\text{)} = 3,60 / 1,44 = \mathbf{2,5 \text{ m}}$$

9.6 Compuestos comerciales

Cloruro Férrico FeCl₃

- Comercialmente se suministra en forma sólida (cristalina o anhidra) o líquida con concentraciones del orden del 33 al 40%.
- Debido a su carácter corrosivo e higroscópico es preciso mantenerlo en envases seguros y bien cerrados.
- La reacción que tiene lugar entre el cloruro férrico y el agua es la siguiente:



Tesis: "Diseño de una unidad piloto para simulación de tratamientos de aguas residuales oleosas utilizando el software HYSYS v3.2 en la Facultad de Ingeniería Química-UNAP"

- Esto supone que el pH del agua disminuye, pudiendo llegar a que la mencionada reacción no se produzca o bien no tenga lugar de forma correcta al trabajar a un pH inadecuado.
- En este proceso con el fin de ajustar el valor idóneo de pH se lleva a cabo la dosificación de un producto alcalino como puede ser sosa o cal.
- En este proyecto se empleará cloruro férrico, ya que además de coagular se precipitará el sulfuro de hierro, con lo que en la misma operación se consiguen dos efectos: la coagulación y la precipitación.
- La reacción en este último caso sería la siguiente:
$$\text{FeCl}_3 + 3\text{Na}(\text{OH}) \rightarrow \text{Fe}(\text{OH})_3 + \text{NaCl}$$
- El hidróxido férrico forma un flóculos de color pardo, gelatinoso.
- El cloruro férrico tiene tendencia a dejar en el agua una tenue coloración de color amarillo-pajizo, por lo que no es recomendable su utilización en aguas potables, de aportación o recuperación.
- En este proyecto se utilizará sosa, ya que en petroquímica se dispone de sosa gastada empleada en otros procesos y que en caso de no gastarse en esta aplicación habría que neutralizarla o enviarla a vertedero de seguridad.

Sulfato de Aluminio $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$

- En su forma comercial se le conoce igualmente con el nombre de sulfato de alúmina, alumbre, o alumbre de filtro.
- Igual que el FeCl_3 se puede encontrar comercialmente en forma líquida con una concentración del 50% o bien en estado sólido.
- Al precipitar el hidróxido de aluminio, al igual que ocurría con el cloruro férrico el agua se acidula, siendo necesario ajustar el pH mediante la dosificación de un reactivo alcalino.
- Debido al carácter anfótero del hidróxido de aluminio, un exceso de alcalinidad puede producir su redisolución, por la formación del aluminato correspondiente que es soluble.
- El sulfato de alúmina no transmite color al agua, al contrario de lo que ocurría con el cloruro férrico, por lo que es un producto idóneo en aguas potables o de aportación.

Sulfato férrico $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$

- Es un sólido fácilmente soluble en agua y su eficacia es similar a la del FeCl_3 . La utilización de uno u otro viene dada en gran medida por los aniones que acompañan al Fe^{3+} es decir, por la preferencia en cuanto al aumento de la concentración de sulfatos o cloruros en el agua a tratar.
- La reacción que tiene lugar es similar a la del cloruro férrico y al igual que ocurría con dicho compuesto es preciso dosificar un reactivo alcalino para neutralizar la acidez que se origina.
- Los coagulantes férricos, tanto del sulfato como del cloruro, tienen un amplio margen de pH para su utilización que va de 5 a 11, con un valor óptimo generalmente entre 7 y 8.

Sulfato Ferroso FeSO_4

- Este compuesto es un subproducto obtenido en la fabricación de dióxido de titanio. Es un sólido verdoso en forma granular o cristalizada, fácilmente soluble en agua.
- Con el fin de obtener la máxima eficiencia de este compuesto es preciso su oxidación a férrico por aireación. Esta oxidación a pH neutro es muy rápida.
- Como en su forma de utilización es oxidado previamente a sulfato férrico, las reacciones que tienen lugar son las mismas que se han indicado con anterioridad.

Policloruro de Aluminio

Se presenta comercialmente en varias composiciones y tiene la ventaja respecto al sulfato de alumina de tener más porcentaje en peso de aluminio por producto dosificado. Las reacciones son similares a las vistas anteriormente.

En floculación se emplearán:

Polielectrolitos

- Los polielectrolitos son polímeros orgánicos de alto peso molecular y largas cadenas, existiendo en el mercado una gran variedad de marcas que comercializan estos productos.
- Las cantidades a utilizar en el proceso de floculación son generalmente bajas, variando entre 1 y 4 ppm, dependiendo de la concentración, tamaño y tipo de sólidos presentes en el agua residual.







Tesis: "Diseño de una unidad piloto para simulación de tratamientos de aguas residuales oleosas utilizando el software HYSYS v3.2 en la Facultad de Ingeniería Química-UNAP"

- La eliminación de sólidos en suspensión a través de un proceso de coagulación floculación se lleva a cabo en tres etapas que son las siguientes:
- Dosificación al agua residual de determinados productos químicos en un reactor de mezcla vigorosamente agitado donde tiene lugar la neutralización de los coloides y emulsiones a través de una reacción de tipo químico, así como el ajuste del pH al valor óptimo del proceso. En este caso, además precipitarán los aniones sulfuros presentes en el agua
- Formación de partículas o agregados de gran tamaño a partir de las partículas submicroscópicas procedentes de la coagulación, con el fin de obtener unas velocidades de decantación o flotación elevadas, Este proceso tiene lugar en un segundo reactor o floculador con tiempos de retención elevados y agitación suave que permita el contacto entre las partículas y el reactivo a la vez que evite la rotura de los flóculos ya formados.

9.7 Diagramas de flujo

Es un diagrama que expresa gráficamente las distintas operaciones que componen un procedimiento o parte de éste, estableciendo una secuencia lógica. Según su formato o propósito, pueden contener información adicional sobre el método de ejecución de las operaciones. Los símbolos comúnmente usados se presentan en la Tabla 9.12, los mismos tienen significados específicos, y se encuentran conectados entre sí por flechas que indican el flujo del proceso.

Tabla 9.12 Símbolos comunes usados en la elaboración de un Diagrama de Flujo.

Símbolo	Significado
	Inicio o final del proceso: Señala el principio o terminación de un procedimiento. Cuando se utilice para indicar el principio del proceso se debe identificar con la palabra INICIO, y cuando se use para el final se debe identificar con la palabra FIN.
	Operación: Representa la realización de una operación o actividad relativa a un procedimiento.
	Decisión o alternativa: Indica un punto dentro del flujo en que son posibles varios caminos alternativos.
	Documento: Representa cualquier tipo de documento que entre, se utilice, se genere o salga del procedimiento.
	Conector: Representa la conexión o enlace de una parte del diagrama de flujo con otra parte lejana del mismo.
	Proceso definido: Indica que hay otro procedimiento definido y documentado que se encuentra asociado al flujograma.

X. ÍNDICES

10.1 ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Tratamiento primario para aguas aceitosas producidas en plantas petroquímicas, petroleras y químicas (Thanh, 2002).

Figura 1.2 Tratamiento secundario para aguas aceitosas producidas en plantas petroquímicas, petroleras y químicas (Thanh, 2002).

Figura 1.3 Tratamiento terciario para aguas aceitosas producidas en plantas petroquímicas, petroleras y químicas (Thanh, 2002).

Figura 1.4 Diagrama esquemático de un sistema de separación API (API, 1997)

Figura 1.5 Diagrama esquemático de un sistema de separación de Platos Corrugados (CPI). (API, 1997)

Figura. 1.6 Diagrama de paquetes de platos corrugados (Koytsoykos, 2009).

Figura 1.7 Remoción de aceite libre contenido en agua.

Figura 1.8 Diagrama de un sistema DAF con reciclo presurizado.

Figura 1.9 Sedimentador de sección cilíndrica

Figura 1.10 Sedimentador de sección rectangular.

Figura 1.11 Punto de quiebre de la cloración

Figura 1.12 Usos del cloro

Figura 1.13 Factor de turbulencia (F_T) en función de la relación v_h/v_{as} .

Figura 1.14 Relación ms/mS v C_s out

Figura 1.15 T_s en función de $C_{o\ out}$

Figura 1.16 Solubilidad del aire, C_s , en función de la temperatura, T a presión atmosférica (1atm).

Figura 3.1 Diseño de equipos para la unidad piloto de tratamiento de aguas residuales oleosas.

Figura 3.2 Simulación del proceso

Figura 9.1 Principio de la floculación

Figura 9.2 Esquema sistema Flotación con presurización de la recirculación

10.2 ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1 Procesos de tratamiento usados para remover los contaminantes principales encontrados en efluentes industriales.

Tabla 1.2 Equipos utilizados para la separación de grasa y aceite.

Tabla 1.3 Temperatura de Diseño

Tabla 1.4 Presión de Diseño

Tabla 1.5 Valores para el factor de turbulencia de acuerdo a la relación v_h/v_{as}

Tabla 1.6 Relación m_a/m_s en función de la concentración de sólidos suspendidos en el Efluente.

Tabla 1.7 Tasa de desbordamiento superficial en función de la concentración de hidrocarburos en el efluente

Tabla 1.8 Solubilidad del aire en agua a diferentes temperaturas (P = Patm)

Tabla 1.9 Tasa de transferencia de oxígeno según el tipo de aerador mecánico de superficie

Tabla 1.10 %E porcentaje de eficiencia del aerador

Tabla 2.1 Parámetros Físicos del Fluido

Tabla 2.2 Promedio, Desviación y Rango de los Parámetros Fisicoquímicos del Efluente

Tabla 2.3 Promedio, Desviación y Rango de los Parámetros Fisicoquímicos del Efluente

Tabla 2.4 Propiedades físicas del fluido.

Tabla 2.5 Características de las tuberías

Tabla 2.6 Accesorios mecánicos presentes en la tubería

Tabla 2.7 Consumo de químicos.

Tabla 2.8 Consumo de energía eléctrica.

Tabla 3.1 Diseño de las dimensiones de los equipos utilizado en la unidad piloto.

Tabla 3.2 Lista de equipos

Tabla 3.3 Lista de Líneas y accesorios.

Tabla 3.4 Materiales mecánicos.

Tabla 3.5 Consumo de aire de servicio de tanque de presurización

Tabla 4.1 Etapas del proceso

Tabla 4.2 Listado de peligros y riesgos.

Tabla 5.1 Costo de diseño de la unidad piloto de tratamiento de aguas residuales oleosas.

Tesis: "Diseño de una unidad piloto para simulación de tratamientos de aguas residuales oleosas utilizando el software HYSYS v3.2 en la Facultad de Ingeniería Química-UNAP"

Tabla 5.2 Otros costos

Tabla 5.3 Costo Total

Tabla 6.1 Separador API

Tabla 6.2 Separador CPI

Tabla 6.3 Sistema DAF

Tabla 6.4 Sistema de Aeración

Tabla 6.5 Sistema de clarificador o sedimentador

Tabla 6.6 Sistema de cloración

Tabla 9.1. Límites de descarga de acuerdo a los estándares del Banco Mundial.

Tabla 9.2 Estándares Nacionales de calidad ambiental para agua

Tabla 9.3 Límites máximos permisibles para los efluentes de PTAR

Tabla 9.4 Límites máximos permisibles de efluentes líquidos para el subsector hidrocarburos

Tabla 9.5 Niveles máximos permisibles de emisión de efluentes líquidos para las actividades de electricidad

Tabla 9.6 Densidades de Hidrocarburos a 15°C

Tabla 9.7 Gravedad específica de algunos Hidrocarburos a 15°C

Tabla 9.8 Densidad del agua a diferentes temperaturas

Tabla 9.9 Viscosidad del agua a diferentes temperaturas

Tabla 9.10 Propiedades del agua en función de su temperatura

Tabla 9.11 Accesorios y su relación K correspondiente.

Tabla 9.12 Símbolos comunes usados en la elaboración de un Diagrama de Flujo.

10.3 LISTA DE ABREVIATURAS

API Instituto Americano de Petróleo (*American Petroleum Institute*)

CPI Interceptor de Placas Corrugadas (*Corrugated Plate Interceptor*)

DAF Flotación por Aire Disuelto (*Dissolved Air Flotation*)

DBO Demanda Biológica de Oxígeno

DBP Diagrama de Bloques de Procesos

DFP Diagrama de Flujo de Proceso

DQO Demanda Química de Oxígeno