



DEFINICIÓN DE ESTÁNDARES OPERATIVOS PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES

**GUSTAVO ANDRÉS PINZÓN LANDAZÁBAL
MARLON ROLANDO MORENO INFANTE**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISCOQUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA DE PETRÓLEOS
BUCARAMANGA
2007**



**DEFINICIÓN DE ESTÁNDARES OPERATIVOS PARA EL TRATAMIENTO DE
AGUAS RESIDUALES**

**MARLON ROLANDO MORENO INFANTE
GUSTAVO ANDRÉS PINZÓN LANDAZÁBAL**

**Proyecto de grado para optar al título
de Ingeniero de petróleos**

ING. FREDY ABELARDO NARIÑO REMOLINA
DIRECTOR

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICOQUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA DE PETRÓLEOS
BUCARAMANGA**

2007



DEDICATORIA

A Mis Padres, personas a quienes admiro y aprecio. En los momentos de alegrías y tristezas me han brindado su apoyo incondicional, su amor y su comprensión, y para mí, han sido y serán, el verdadero ejemplo a seguir.

A Mayra, Julián, Fernando, Edwin, Ernestina y demás familiares, quienes has creído en mí y de una u otra forma me han brindado su apoyo.

A Sergio, Erwin, Alejo, Wilson, Jhon Jairo, Roberto, Fabio, Frank, Elkin, Jackson y demás amigos, quienes han estado conmigo para afrontar los momentos más difíciles vividos en la universidad.

A Wilmer, un amigo con quien compartí experiencias inolvidables. Será recordado por su humildad y compañerismo.

Gustavo A. pinzón Landazábal.



DEDICATORIA

En la memoria de *Miguel Hernández* amigo
quién no me perdonaría haberle negado
su participación en mi formación personal.

A *Peter Cobos*, cuyos aportes desde la
distancia en el transcurso de mi vida no
tienen valor.

Marlon R. Moreno I.



AGRADECIMIENTOS

*Agradecimiento especial al **Ingeniero Fredy Abelardo Nariño Remolina** por la colaboración, la confianza y el apoyo que nos ha brindado para la realización de este proyecto.*



CONTENIDO

| | pág. |
|---|-------------|
| INTRODUCCIÓN | 1 |
| 1. GENERALIDADES | 3 |
| 2. MONITOREO DE LAS AGUAS RESIDUALES | 6 |
| 2.1 PARÁMETROS DE MONITOREO | 6 |
| 2.1.1 Características fisicoquímicas del agua | 6 |
| 2.2 NORMAS AMBIENTALES DE VERTIMIENTO | 13 |
| 2.3 FRECUENCIA DE MONITOREO | 17 |
| 2.4 SELECCIÓN DE PUNTOS DE MONITOREO | 19 |
| 3. SISTEMAS DE TRATAMIENTOS DE AGUAS RESIDUALES | 21 |
| 3.1 OIL SKIMMER | 26 |
| 3.1.1 Skimmer vertical presurizado | 28 |
| 3.1.2 Skimmer horizontal presurizado | 30 |
| 3.1.3 Caja API | 31 |
| 3.2 PLATINAS COALESCEDORAS | 33 |
| 3.2.1 Interceptor de platinas paralelas | 36 |
| 3.2.2 Interceptor de placas corrugadas | 37 |
| 3.2.3 Separadores de flujo transversal | 39 |
| 3.3 PAQUETES DE TUBERÍA EN SERPENTÍN (S.P. PACKS) | 41 |
| 3.4 UNIDADES DE FLOTACIÓN | 45 |
| 3.4.1 Unidades de flotación por gas disuelto | 46 |



| | pág. |
|--|-------------|
| 3.4.2 Unidades de flotación por gas disperso | 47 |
| 3.5 HIDROCICLONES | 50 |
| 3.6 PISCINAS PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS | 53 |
| 3.7 TRATAMIENTO DE AGUAS DE INYECCIÓN | 56 |
| 3.7.1 Unidades de filtración | 56 |
| 4. DIMENSIONAMIENTO DE EQUIPOS UTILIZADOS EN EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES | 63 |
| 4.1 OIL SKIMMER | 63 |
| 4.1.1 Skimmer cilíndrico horizontal presurizado (al 50% de su capacidad) | 64 |
| 4.1.2 Skimmer cilíndrico vertical presurizado ó a presión atmosférica | 65 |
| 4.1.3 Tanque desnatador rectangular horizontal (CAJA API) | 66 |
| 4.2 PLATINAS COALESCEDORAS | 73 |
| 4.2.1 Interceptor de placas corrugadas | 75 |
| 4.2.2 Separadores de flujo transversal | 76 |
| 4.3 PAQUETES DE TUBERÍA EN SERPENTÍN (S.P.PACKS) | 77 |
| 4.4 UNIDADES DE FLOTACIÓN | 78 |
| 4.4.1 Unidades de flotación tipo gas disuelto | 78 |
| 4.4.2 Unidades de flotación tipo gas disperso | 79 |
| 4.5 PISCINAS PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS | 81 |
| 5. OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO | 83 |
| 5.1 OIL SKIMMER | 83 |
| 5.1.1 Procedimientos de rutina | 83 |



| | pág. |
|---|-------------|
| 5.1.2 Mantenimiento | 86 |
| 5.2 OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO DEL SISTEMA DE PLATINAS COALESCEDORAS | 87 |
| 5.3 OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO DE UNIDADES DE FLOTACIÓN | 89 |
| 5.3.1 Operación de unidades de flotación | 89 |
| 5.3.2 Mantenimiento de unidades de flotación | 90 |
| 5.4 OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO DE PISCINAS PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES | 91 |
| 6 GUÍA ESTÁNDAR PARA EL DISEÑO DE UN SISTEMA DE TRATAMIENTO | 92 |
| 6.1 PARÁMETROS REQUERIDOS PARA EL DISEÑO | 92 |
| 6.2 PROCEDIMIENTO PARA LA SELECCIÓN DE SISTEMAS DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES | 94 |
| CONCLUSIONES | 102 |
| REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 104 |



LISTA DE TABLAS

| | pág. |
|--|-------------|
| Tabla 1. Aplicabilidad de los métodos de EPA 413.1 y 413.2..... | 10 |
| Tabla 2. Condiciones mínimas de vertimiento..... | 14 |
| Tabla 3. Concentraciones de control para las sustancias de interés sanitario..... | 14 |
| Tabla 4. Métodos para toma y análisis de muestras..... | 16 |
| Tabla 5. Frecuencia mínima de muestreo y análisis para aguas residuales en la industria..... | 18 |
| Tabla 6. Frecuencia mínima de presentación de reportes operacionales.... | 19 |
| Tabla 7. Características de los equipos utilizados en el tratamiento de agua..... | 25 |
| Tabla 8. Paquetes estándar de tubería en serpentín..... | 42 |
| Tabla 9. Propiedades físicas y químicas de la cáscara de nuez..... | 62 |
| Tabla 10. Rangos típicos para las variables básicas del diseño en la separación de platos paralelos..... | 74 |
| Tabla 11. Parámetros para el diseño de unidades de flotación tipo gas disuelto..... | 78 |



LISTA DE FIGURAS

| | pág. |
|--|-------------|
| Figura 1. Recipientes desnatadores presurizados..... | 26 |
| Figura 2. Skimmer vertical presurizado..... | 29 |
| Figura 3. Skimmer horizontal presurizado..... | 31 |
| Figura 4. Caja API..... | 32 |
| Figura 5. Secciones del separador API..... | 33 |
| Figura 6. Paquete de platos corrugados | 34 |
| Figura 7. Plato Coalescedor..... | 36 |
| Figura 8. Corte transversal de un desnatador..... | 36 |
| Figura 9. Vista longitudinal del paquete PPI en una Caja API..... | 37 |
| Figura 10. Paquete de placas corrugadas instalado en una caja API..... | 38 |
| Figura 11. Paquete de platos CPI..... | 39 |
| Figura 12. Esquema de un separador de flujo transversal..... | 40 |
| Figura 13. Separador de flujo transversal..... | 41 |
| Figura 14. Paquete de tubería en serpentín instalado en un skimmer..... | 43 |
| Figura 15. Zonas generadas en el tanque desnatador optimizado mediante S.P.Packs..... | 43 |
| Figura 16. Distribución del tamaño de gota de aceite con o sin S.P Packs... .. | 44 |
| Figura 17. Paquetes de tubería en serpentín instalados en recipientes verticales..... | 44 |
| Figura 18. Unidad de flotación tipo gas disuelto..... | 45 |
| Figura 19. Esquema de unidad de flotación tipo gas disuelto..... | 47 |
| Figura 20. Unidad de flotación tipo gas disperso con eductor hidráulico..... | 48 |
| Figura 21. Celda de una unidad de flotación tipo gas disperso con eductor hidráulico..... | 49 |
| Figura 22. Sección transversal de una celda de una unidad de flotación tipo gas disperso con rotor mecánico..... | 50 |
| Figura 23. Hidrociclón..... | 51 |
| Figura 24. Ubicación de un hidrociclón en la facilidad..... | 52 |
| Figura 25. Piscina para el tratamiento de agua residual..... | 54 |
| Figura 26. Esquema de unidad de filtración..... | 57 |
| Figura 27. Baffle deflector en un filtro..... | 58 |
| Figura 28. Ubicación de tubos ranurados en forma de espina de pescado en unidades de filtración..... | 59 |
| Figura 29. Ubicación de una bomba de retrolavado en unidad de filtración.. | 60 |
| Figura 30. Cascarilla de nuez de la palma africana..... | 61 |
| Figura 31. Piloto de reinyección de agua en la estación Suria..... | 62 |
| Figura 32. Variables de diseño del separador agua/aceite..... | 67 |
| Figura 33. Piscinas para el tratamiento de aguas residuales..... | 82 |



pág.

| | |
|---|----|
| Figura 34. Unidades de flotación tipo gas disuelto..... | 90 |
|---|----|



RESUMEN

**TÍTULO:
DEFINICIÓN DE ESTÁNDARES OPERATIVOS PARA EL
TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES. ***

**AUTORES:
GUSTAVO ANDRÉS PINZÓN LANDAZÁBAL
MARLON ROLANDO MORENO INFANTE ****

**PALABRAS CLAVES:
Aguas residuales, separadores, medio ambiente, operación,
tratamiento, mantenimiento.**

DESCRIPCIÓN:

Para la industria petrolera es indispensable implementar programas para la disposición del agua residual, los cuales incluyen el tratamiento y el monitoreo tanto de las aguas de descarga como de las receptoras, con el fin de reducir el impacto generado en el medio ambiente y además, cumplir con los valores permisibles contemplados en la legislación colombiana sobre protección ambiental en el caso de actividades con hidrocarburos.

El agua residual generada en la producción de un campo petrolero, con frecuencia, es tratada mediante procesos físicos, aunque en algunas ocasiones se hace necesaria la implementación de métodos químicos y biológicos. El dispositivo más utilizado es el separador API, el cual es un tratamiento físico que involucra técnicas de separación gravitacional de aceite y sólidos principalmente.

Para evitar el vertimiento en aguas superficiales es comúnmente usada la inyección del agua a formaciones receptoras, aunque también puede ser implementada como método de recobro secundario de aceite, la cual implica en su tratamiento una mayor remoción de carga contaminante.

Implementar una metodología estándar para reducir tiempo, costos y evitar el sobredimensionamiento de equipos ó el diseño de elementos innecesarios es indispensable, así como una adecuada operación y mantenimiento periódico para asegurar la eficiencia del sistema. Al presentarse concentraciones anormales a la entrada del sistema de tratamiento de agua, se deben realizar inspecciones a los equipos de separación de crudo incluidos en la facilidad para detectar posibles fallas.

*** TRABAJO DE GRADO**

**** Facultad de ingenierías fisicoquímicas, Escuela de Ingeniería de Petróleos, Ing. Fredy Abelardo Nariño Remolina.**

Definición de estándares operativos para el tratamiento de aguas residuales



SUMMARY

TITLE:
DEFINITION OF OPERATIVE STANDARDS FOR WASTEWATER TREATMENT. *

AUTHORS:
GUSTAVO ANDRÉS PINZÓN LANDAZÁBAL
MARLON ROLANDO MORENO INFANTE **

KEY WORDS:
Wastewater, separators, environment, operation, treatment, maintenance.

DESCRIPTION:

It is indispensable for the petroleum industry to implement programmes for the disposition of wastewater, which include both the treatment and monitoring of unloading and receiving water to reduce the generated impact in the environment and besides, to accomplish with the permissible values hold in Colombian law on environmental protection in the case of hydrocarbon activities.

Frequently, the wastewater generated en the production of a petroleum field is treated by physical processes although, it is often necessary to implement chemical and biological methods. The most used method is the API separator, which is a physical treatment that involves gravitational separating techniques mainly of oil and solids.

To avoid the superficial water pouring, is commonly used the injection to receiving formations, although could be used like enhanced oil recovery too, which is major removal of the contaminating content.

It is indispensable to implement a standard methodology to reduce time, costs, and to avoid the equipment oversize or the design of unnecessary devices, as a proper handling and usual maintenance to ensure the proficiency of the treatment system. When there are abnormal concentrations at the entrance of the wastewater handling system, oil treatment equipment revisions must be done included in the facility to detect possible failures.

* Degree Project.

** Physical-Chemical Engineerings Faculty, Petroleum Engineering, Eng. Fredy Abelardo Nariño Remolina.



INTRODUCCIÓN

Hoy en día, las compañías petroleras producen un promedio de tres barriles de agua por cada barril de petróleo que extraen de los campos maduros. El costo para hacer frente a los problemas generados por el agua contaminada supera los 40 mil millones de dólares por año ^[1]. El uso de tecnologías innovadoras para el control del agua puede significar un aumento en la producción de hidrocarburos y una reducción de los gastos por barril de crudo.

Actualmente, en Colombia rigen normas que promulgan la conservación de la flora y la fauna, además de promover una cultura en la cual se cree un ambiente salubre para sus habitantes, por lo tanto se ha hecho necesario desarrollar un manual para el monitoreo de todas las sustancias de interés sanitario encontradas tanto en las aguas de descarga como en las receptoras, y proponer medidas que solucionen los problemas que éstas representan para las diferentes compañías. Sin embargo, en este texto se hará énfasis en la carga de hidrocarburos y sólidos presentes en las aguas residuales, sin dejar de lado los demás contaminantes.

Por tal motivo se hace indispensable suministrar las especificaciones para el tratamiento adecuado de las aguas de descarga y su posterior disposición, basados en la legislación colombiana y normas técnicas nacionales, complementadas con información de organizaciones reconocidas a nivel mundial en materia de conservación del medio ambiente para el monitoreo de las aguas residuales.

Dando a conocer los conceptos básicos para el diseño de equipos requeridos en el tratamiento físico de las aguas de producción, la posterior operación y mantenimiento, para el óptimo funcionamiento de dichos equipos, teniendo en cuenta las normas de seguridad y basados en normas API, con el fin de establecer



una guía para el procedimiento en la selección del sistema de tratamiento aguas residuales.

El presente manual establece ciertos criterios técnicos para el Manejo de Aguas de Descarga establecidos en la norma API 421, e información adicional proporcionada por fuentes reconocidas a nivel internacional, entre las cuales podemos encontrar la Agencia para la Protección del Medio Ambiente (EPA) y la Asociación Americana para la Salud Pública (APHA).



1. GENERALIDADES

A nivel mundial la producción de agua es aproximadamente 270 millones de barriles por día que son separados de los 83 millones de barriles por día de petróleo, de ahí que se fundamente la importancia de diseñar un óptimo sistema de tratamiento del agua para contrarrestar el aumento en los costos por barril de crudo, y una posible reducción en la producción de hidrocarburos. Debido a que los sistemas de manejo del agua resultan costosos (se estima un costo de entre 5 a más de 50 centavos de dólar por barril de agua) en un pozo que produce petróleo con un 80% de corte de agua, el costo del manejo del agua puede ascender a 4 dólares por barril de petróleo producido^[1].

El agua afecta todas las etapas de la vida del campo petrolero, desde la exploración hasta el abandono del campo, pasando por el desarrollo y la producción del mismo. Cuando se extrae petróleo de un yacimiento, ya sea al inicio de la explotación o en la declinación de la producción del campo, se producirá agua junto con el petróleo.

El aspecto económico de la producción de agua a lo largo del ciclo del agua (proceso que se lleva a cabo desde el flujo de agua en el yacimiento hasta la disposición final) depende de una variedad de factores, como la tasa de flujo total, las tasas de producción, las propiedades del fluido, la densidad del petróleo y la salinidad del agua y, por último el método final para la descarga del agua producida. Los costos operativos, que comprenden las tasas de levantamiento, separación, filtrado, bombeo y reinyección, se suman a los costos totales. Por otra parte, los costos de eliminación del agua producida pueden variar enormemente desde 10 centavos de dólar por barril, cuando el agua se descarga en áreas marinas, hasta más de 1,50 dólares por barril cuando se transporta con camiones en tierra firme^[1].



Si bien el ahorro potencial derivado del control del agua es importante en sí mismo, tiene más valor la reducción del impacto generado por la descarga de agua, viéndose desde una perspectiva ambiental.

Por ello, la industria petrolera ha visto la necesidad de regular los procedimientos en las operaciones que involucran el tratamiento de aguas de producción y refinación, por la creciente presión que ha generado a nivel mundial el impacto ambiental que éstas producen, reflejándose en la adopción progresiva de métodos estándar para el examen de aguas residuales.

Contaminantes tales como hidrocarburos, sólidos suspendidos y disueltos, cloruros, metales pesados, y otras sustancias de interés sanitario deben ser tratados adecuadamente, dado que han generado perturbaciones en el ecosistema, llevando a proponer medidas para la regulación de estas sustancias para su posterior disposición, en medio terrestre (ya sea en superficie o en la formación), marino o fluvial.

Para esto se requiere de diseños eficientes, en lo concerniente a normas de seguridad y estándares de calidad, además de una adecuada operación y mantenimiento periódico para el óptimo funcionamiento de todos los elementos involucrados en una facilidad de producción. En el caso de que la carga de contaminantes en el agua sea tan alta que no permitan ser dispuestas en superficie, deberá considerarse la alternativa de reinyectarse a una formación o yacimiento previamente seleccionado.

La legislación colombiana en este aspecto no ha desarrollado una reglamentación para la protección ambiental en las actividades específicas en el sector de los hidrocarburos. Correspondiéndole directamente al Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial propender un ambiente sano en cumplimiento de los artículos 1º y 5º de la ley 99 de 1993 en concordancia con los artículos 79 y 80



de la Constitución Política Nacional. Es decir, aunque en la normatividad vigente no se contemple el máximo permisible para todos los parámetros de monitoreo tal como el contenido de los hidrocarburos presentes en las aguas de vertimiento, el Ministerio desarrolla esa labor para cada caso en específico.



2. MONITOREO DE LAS AGUAS RESIDUALES

2.1 PARÁMETROS DE MONITOREO

Los parámetros que se muestran en la siguiente sección deben estar incluidos, como mínimo, en cualquier programa de monitoreo de calidad de aguas producidas por la extracción de petróleo y/o para las aguas residuales de las refinerías de petróleo.

Sugiriendo para aquellos contaminantes y propiedades más sobresalientes como el contenido de aceite (libre, emulsionado y disuelto), la fracción de los sólidos totales (disueltos, filtrables, y sedimentables), la gravedad específica y la viscosidad absoluta, métodos de prueba, que de acuerdo al objetivo específico para el cual fue diseñada, podrá ser aplicable el estudio para la medición del parámetro de monitoreo.

A continuación se presenta una descripción detallada de cada uno de estos parámetros de monitoreo ^[2].

2.1.1 CARACTERÍSTICAS FISICOQUÍMICAS DE LAS AGUAS RESIDUALES

CONTENIDO DE SÓLIDOS DISUELTOS, SUSPENDIDOS Y SEDIMENTABLES

La función principal de un separador es la de remover partículas de aceite presente en las aguas residuales, sin embargo el contenido de sólidos es también un parámetro importante al momento de seleccionar las características del separador. Los sólidos totales están definidos como la materia resultante de la



evaporación a una temperatura entre 103 y 105 °C, los cuales se clasifican en partículas disueltas, suspendidas y sedimentables. Los sólidos suspendidos o filtrables se caracterizan por presentar un diámetro de partícula generalmente entre 10 y 100 micras (responsables de causar la turbidez en el agua), pueden ser medidos usando el método estándar 209C [2], el método 160.2 [1] de EPA, o ASTM D 1888. El contenido de sólidos suspendidos de las aguas residuales no se puede medir exactamente por estos métodos si los compuestos presentes se volatilizan a temperaturas por debajo de 103°C.

Los sólidos sedimentables son aquellos separados por gravedad en un período de tiempo dado, medidos generalmente sobre una base volumétrica (véase el método estándar 209E.3.a [3] o el método 160.5 de EPA [2]).

Los resultados de este procedimiento indican el volumen aproximado de los materiales colocados que necesitarán ser removidos del fondo de un separador de aceite/agua.

Las características de los sólidos sedimentables se deben observar para determinar cuánto arena está presente. De acuerdo a la cantidad de arena presente en las aguas residuales, podría recomendarse o no un colector de arena.

La arena y los materiales similares pueden ser removidos diseñando, para velocidades bajas, el canal que precede el lavado principal del separador. Este canal puede servir como recolector de arena, y puede ser beneficioso en la reducción de los problemas dentro del separador causados por los sólidos.

Los sólidos disueltos o residuos en solución que no se pueden remover por filtración, son los sedimentos que pasan a través de una membrana de 0.45 micras y quedan luego de evaporar y secar una muestra de agua a temperatura de 180 °C. Las aguas residuales con alto contenido de sólidos disueltos que son



vertidas en superficies de agua pueden, con el tiempo, impedir el uso de las mismas para consumo humano y recreación.

TEMPERATURA

La descarga de aguas residuales a altas temperaturas puede causar daños a la flora y fauna en los cuerpos de agua al interferir en la reproducción de las especies, incrementar el crecimiento de bacterias y otros organismos, acelerando las reacciones químicas y reduciendo los niveles de oxígeno.

CLORUROS

Son los principales aniones inorgánicos en el agua. La concentración de cloruros es una medida específica de la salinidad del agua en la industria petrolera. El incremento de cloruro en el agua ocasiona el aumento de la corrosividad. El alto contenido de cloruros impide que el agua sea utilizada para el consumo humano o el ganado. Altos porcentajes de cloruros en los cuerpos de agua también pueden matar a la vegetación circundante.

MATERIAL FLOTANTE

En el agua de desecho lo constituye principalmente la nata de petróleo crudo libre en el agua. Su presencia causa la visualización de una gama de colores en la superficie del agua cuya intensidad es una función del espesor de la película de aceite, la cual no es aceptada por la legislación colombiana. La eliminación del petróleo crudo libre en flotación, implica el control de dos aspectos:

- ✓ El derrame de nata del petróleo crudo en la descarga de la caja API de las baterías. En general, la correcta operación de la caja API separa como petróleo crudo los glóbulos con un diámetro superior a 150 μm . La nata que se produce



debe ser removida continuamente en la caja API para evitar su derrame en el afluente, y eliminar la posibilidad de que por turbulencia viaje hacia la salida de las aguas de vertimiento y de ahí hacia los cuerpos acuosos.

- ✓ Grasas y aceites. Esta denominación comprende aquellas sustancias que se encuentran en suspensión en el agua y que son solubles en hexano.

GRASAS Y ACEITE LIBRE, EMULSIONADO Y DISUELTO

La Asociación Americana para la Salud Pública en el documento, Métodos Estándar para el Examen de Agua y Aguas Residuales, la define como: “Cualquier material recuperado en la forma de una sustancia soluble en un solvente”, donde el triclorofluoroetano es el solvente recomendado.

Como es de conocimiento general, la descarga de aceites o grasas en un cuerpo de agua, ocasionan perturbaciones en la vida acuática al formar películas sobre la superficie, obstaculizando la fotosíntesis al disminuir la aeración y paso de la luz, además de interrumpir en la reproducción de las especies, es por esto que surge la necesidad de establecer en la legislación colombiana mediante el Decreto 1594 de 1984, una remoción superior al 80% de grasas y aceites, así mismo, prohibir cualquier película visible de este material en el cuerpo de agua, haciendo necesario medir la carga de este contaminante.

La Agencia para la Protección del Medio Ambiente de los Estados Unidos (EPA) [1] sugiere que se determine el contenido total de grasas y aceites en aguas residuales por los métodos, 413.1 “separación gravitacional”, y 413.2, el “infrarrojo espectrofotométrico”. La tabla 1 presenta una síntesis de la posibilidad de aplicar estas pruebas. Pruebas similares son los métodos estándares 503A y 503B [2], publicados en común por la Asociación Americana de Salud Pública (APHA), la



Asociación Americana de Trabajos del Agua (AWWA), y la Federación del Control de la Contaminación del Agua (WPCF).

Tabla 1. Aplicabilidad de los métodos de EPA 413.1 y 413.2

| Método | ^{a)} Rango de concentración de aceite para la cual el método es válido mg/ L | Representatividad del resultado analítico |
|---------------|--|--|
| EPA 413.1 | 5 – 1000 | Medidas solo de hidrocarburos No volátiles (volatilizan a más de 70 °C), excepto materiales Residuales insolubles en fluorocarbono 113 |
| EPA 413.2 | 0.2 – 1000 | Medidas de la mayoría de los hidrocarburos volátiles además de compuestos más pesados, Excepto los materiales residuales insolubles en Fluorocarbono 113 |

Tomado de "Monographs on Refinery Environmental Control, Management of water Discharges. API Publication 421".

a) Las concentraciones mayores de aceite que el máximo en el agua residual, se pueden analizar por dilución en la muestra.

Un método análogo al ASTM para determinar aceites, grasas e hidrocarburos presentes en el agua es D 3921. Este método es similar al método 413.2 de EPA, salvo que el rango válido de la concentración es de 0.5 a 100 miligramos por litro.



En ninguno de estos métodos se puede distinguir entre el contenido de aceite libre, emulsionado, o disuelto.

En años anteriores, API desarrolló un método operacional para determinar la fracción emulsionada y disuelta del aceite. Este método, titulado “determinación de la susceptibilidad a la separación del aceite,” se presenta en el apéndice B de la norma API 421. En el método se simulan las condiciones de un separador agua/aceite mediante un embudo separador en el cual se deja reposar durante 30 minutos una determinada cantidad de agua para permitir su separación. Los sólidos suspendidos son retirados de la fase acuosa, y el agua es luego analizada para determinar el contenido de aceites y grasas no susceptible a la separación gravitacional.

El aceite libre es resultado de, restar la cantidad de aceite y grasa disuelta y suspendida (que se puede hallar utilizando el procedimiento presentado en el apéndice B de la norma API 421), del aceite total presente (determinado por los métodos establecidos por EPA o los métodos estándar APHA/AWWA/WPCF inicialmente descritos).

PH

Es el potencial hidrógeno o nivel de ácidos o bases en una sustancia. Aquellas que no se encuentran entre el rango de 5 – 9 pueden afectar el medio acuático, al causar perturbaciones celulares y la eventual destrucción de la flora y la fauna.

DEMANDA BIOQUÍMICA DE OXÍGENO (DBO)

Mide la capacidad de las bacterias comunes para digerir la materia orgánica, para obtener CO₂ y H₂O, generalmente en un periodo de incubación de 5 días a 20 °C,



analizando la disminución de oxígeno. Esta mide la materia orgánica biodegradable.

DEMANDA QUÍMICA DE OXÍGENO (DQO)

Es el equivalente en oxígeno de la fracción de material orgánico presente en una muestra, que es susceptible de oxidación, en medio ácido, por medio del dicromato de potasio. Esta analiza tanto la materia orgánica biodegradable como la que no lo es (refractaria).

CONDUCTIVIDAD

Es una medida de la presencia, movilidad, valencia, y concentración de iones, así como la temperatura del agua. Este es un indicador de la salinidad del agua.

OXÍGENO DISUELTO

Mantener una concentración adecuada de oxígeno disuelto en el agua es importante para la supervivencia de los peces y otros organismos de vida acuática. La baja concentración de oxígeno disuelto puede ser un indicador de que el agua tiene una alta carga orgánica provocada por aguas residuales. Actualmente, se está implementando el uso de una nueva tecnología desarrollada, que consiste en la utilización de aireadores en las piscinas para aumentar la concentración de oxígeno en el agua.

FENOLES

Esta es una medida de la concentración de la mayoría de los compuestos fenólicos, frecuentemente encontrados en las aguas residuales de la industria petrolera. En niveles altos pueden manchar la piel de peces y afectar



negativamente la flora, fauna y seres humanos. En niveles relativamente bajos estimula la producción de olores fuertes y desagradables cuando se presenta en combinación con altas concentraciones de cloruros.

METALES (Ba, Ca, Cr, Pb, Hg)

Estos metales algunas veces están presentes en pequeñas cantidades en las aguas residuales de la industria petrolera.

- El bario tiene efectos irreversibles para la salud y es tóxico para los animales.
- El Cromo es cancerígeno para el sistema respiratorio y venenoso para los peces.
- El cadmio se acumula en tejidos blandos y pueden interferir en el metabolismo.
- El plomo se acumula en ostras y mariscos. Llega al ser humano a través de la cadena alimenticia y se acumula en los huesos. El plomo es un inhibidor de las enzimas e influye en el metabolismo celular.
- El mercurio es altamente tóxico a niveles relativamente bajos y se acumula en los peces.

2.2 NORMAS AMBIENTALES DE VERTIMIENTO

En la legislación colombiana se establecen algunas condiciones mínimas de vertimiento^[3] para la descarga de aguas residuales generadas en la producción de campos petroleros, incluidas en el Decreto 1594 de 1984 Art. 72, las cuales son presentadas a continuación:



Tabla 2. Condiciones mínimas de vertimiento

| Parámetro | Rango aceptable |
|--|---------------------------------------|
| ➤ PH | 5 – 9 |
| ➤ Temperatura | <40°C |
| ➤ Material flotante | Ausente |
| ➤ Grasas y aceites | Remoción > 80% (sólidos secos: 0.01%) |
| ➤ Sólidos suspendidos | Remoción > 80% en carga |
| ➤ Demanda bioquímica de O ₂ | Remoción > 80% en carga |
| ➤ Demanda química de O ₂ | Remoción > 80% en carga |
| ➤ Cloruros | 250 ppm, máximo consumo humano |

Tomado del Decreto 1594 de 1984, Art. 72.

En el Art. 74 de dicho decreto se establecen las concentraciones para el control (CDC) de la carga de las sustancias de interés sanitario.

Tabla 3. Concentraciones de control para las sustancias de interés sanitario

| Sustancia | Expresada como | Concentración mg/l |
|-------------------------|-----------------------|-------------------------------|
| Arsénico | As | 0.5 |
| Bario | Ba | 5.0 |
| Cadmio | Cd | 0.1 |
| Cobre | Cu | 3.0 |
| Cromo | Cr+6 | 0.5 |
| Compuestos Fenólicos | Fenol | 0.2 |
| Mercurio | Hg | 0.02 |
| Níquel | Ni | 2.0 |



| | | |
|-------------------|------------------|---------------|
| Plata | Ag | 0.5 |
| Plomo | Pb | 0.5 |
| Selenio | Se | 0.5 |
| Cianuro | CN- | 1.0 |
| Difenil | concentración | No detectable |
| Policlorados | de agente activo | |
| Mercurio orgánico | Hg | No detectable |
| Tricloroetileno | Tricloroetileno | 1.0 |
| Cloroformo | Extracto Carbón | 1.0 |
| | Cloroformo (ECC) | |
| Tetracloruro | Tetracloruro | 1.0 |
| De carbono | de Carbono | |
| Dicloroetileno | Dicloroetileno | 1.0 |
| Sulfuro | Sulfuro | |
| De carbono | de carbono | 1.0 |
| Otros compuestos | concentración de | 0.05 |
| Organoclorados, | agente activo | |
| Cada variedad | | |
| Compuestos | Concentración de | 0.1 |
| Organofosforados, | agente activo | |
| Cada variedad | | |
| Carbamatos | | 0.1 |

Tomado del Decreto 1594 de 1984, Art. 74

Cuando la carga real en el vertimiento sea mayor que la carga máxima permisible (CMP), aquella se deberá reducir en condiciones que no sobrepase la carga máxima permisible.



Para efectos de la disposición final del recurso, el decreto 1594/84 establece para:

- a) Consumo humano y doméstico
- b) Preservación de flora y fauna
- c) Agrícola
- d) Pecuario
- e) Recreativo
- f) Industrial
- g) Transporte

Con sus respectivos criterios de calidad admisibles, en los Artículos 37 – 50.

En el Decreto mencionado anteriormente, el Ministerio de Salud establece los procedimientos para una adecuada toma y posterior análisis de las muestras, algunos de éstos son:

Tabla 4. Métodos para toma y análisis de muestras

| PARÁMETRO | MÉTODOS |
|-----------------------|-------------------------|
| Grasas y aceites | Extracción Soshlet |
| Sólidos sedimentables | Cono Imhoff |
| Sólidos suspendidos | Filtración Crisol Gooch |
| DBO | Incubación |
| DQO | Reflujo con dicromato |
| PH | Potenciométrico |
| Cloruros | Argentométrico |

Tomado del Decreto 1594 de 1984, Art. 155



Las licencias ambientales son reglamentadas en el Decreto 1753 de agosto de 1994, como medio de control para todo tipo de proyecto que pueda generar un impacto ambiental negativo.

Valores contemplados en el decreto 1594 de 1984 para la remoción de aceite presente en el agua residual muestran grandes falencias, dado que, las características de salida del agua no son óptimas, y por el contrario, la carga de contaminantes en el vertimiento es bastante alta. En el contexto actual, en donde las empresas deben implementar sistemas de gestión de la calidad y sobretodo sistemas de gestión ambiental, las normas concernientes a la protección del medio ambiente deben ser consecuentes con el desarrollo y la tecnificación de la industria.

Para el caso específico del contenido de aceite presente en el agua de descarga, es necesario estipular valores estándar, dado que el impacto no sólo se ve reflejado de forma inmediata, pues las consecuencias más graves son detectadas con el paso del tiempo. Por lo tanto, un valor máximo recomendado para el caudal de vertimiento debería estar estipulado entre 30 y 50 ppm de aceite y así reducir los problemas ambientales que implica el vertimiento en sistemas de agua dulce, tomando como referencia estándares internacionales.

2.3 FRECUENCIA DE MONITOREO

La legislación Colombiana no posee una reglamentación para determinar la frecuencia con que se debe monitorear cada sustancia de interés sanitario en el cuerpo de agua. Por tanto, se presentan a continuación recomendaciones técnicas para dicho propósito, aunque el Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial en conjunto con las Entidades Encargadas para el Manejo y Adecuación del Recurso (EMAR), realizan para cada caso específico la evaluación del impacto ambiental producido por la descarga de aguas residuales.



Agua residual de tipo ordinario: Agua residual generada por las actividades domésticas del hombre (uso de inodoros, duchas, lavatorios, fregaderos, lavado de ropa, etc.)

Agua residual de tipo especial: Agua residual de tipo diferente al ordinario.

Tabla 5. Frecuencia mínima de muestreo y análisis para aguas residuales en la industria

| PARÁMETRO | CAUDAL (m ³ /día) | | |
|--|------------------------------|-----------|------------|
| | <10 | 10 a 100 | > 100 |
| Temperatura, PH, Sólidos Sedimentables y Caudal ^{a)} | Mensual | Semanal | Diaria |
| a. Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO) b. Demanda Química de Oxígeno (DQO) c. Grasas y aceites d. Sólidos suspendidos Totales e. Temperatura | Anual | Semestral | Trimestral |

Reglamento de reuso y vertido de aguas residuales
Decreto ejecutivo 26042-s-minae. Costa Rica

^{a)} No requieren ser practicados por un laboratorio acreditado. Sin embargo, deberán estar incluidos en el reporte operacional. La forma de medir y reportar el caudal se especificará en las guías mencionadas en el Artículo 5 del presente Reglamento.



Tabla 6. Frecuencia mínima de presentación de reportes operacionales

| TIPO DE AGUA RESIDUAL | FRECUENCIA (según caudal en m ³ /día) | | |
|-----------------------|---|-----------|-------|
| | Trimestral | Semestral | Anual |
| Ordinario | > 100 | 50 a 100 | < 50 |
| Especial | > 100 | 10 a 100 | < 10 |

Reglamento de reuso y vertido de aguas residuales
Decreto ejecutivo 26042-s-minae. Costa rica

2.4 SELECCIÓN DE PUNTOS DE MONITOREO

El monitoreo se realiza para diferentes puntos en la salida de cada uno de los elementos y en el cuerpo de agua receptor, con el fin no solo de evaluar la calidad del agua al ser vertida y el impacto generado en las aguas de descarga, sino además, determinar la eficiencia de cada equipo y por medio de ésta, detectar posibles daños o anomalías en los mismos.

1. Puntos de monitoreo para el agua residual

Se debe tomar muestra en el punto más cercano a la salida del tratamiento para que la medida sea realmente significativa, pero generalmente no es posible llevar a cabo la recolección en este sitio por no ser de fácil acceso.

2. Puntos de monitoreo para el cuerpo de agua receptor

Debe realizarse a toda corriente superficial o agua subterránea, que pueda verse afectada por el vertimiento del agua de descarga, instalando como mínimo una estación de muestreo aguas arriba y otra aguas abajo, las cuales permitirán especificar:



- ✓ La calidad de agua antes del vertimiento.
- ✓ Grado en el que afectan las sustancias de interés sanitario al recurso hídrico.

El punto de muestreo aguas arriba debe ubicarse lejos de cualquier influencia de las descargas provenientes de la producción y de operaciones de refinación, además, aguas abajo de cualquier curso de agua que incida en la calidad del agua en el sitio de vertimiento. La estación aguas abajo debe situarse en base a la toma de varias muestras en puntos después de la descarga, así mismo, de un análisis en la zona de mezcla y agua receptora, que permiten la ubicación de la estación donde el agua residual se ha mezclado totalmente con el agua receptora ^[2].

Para ríos grandes, es importante recolectar más de una muestra aguas abajo por el impacto ecológico que pueda causar e igualmente en la corriente que desemboca en arroyos pequeños.

En base a lo anterior, se hace necesario delimitar la región en donde se toma la muestra, además de anexar en el informe mapas con la ubicación de los puntos de muestreo, fotografías y características geográficas que se mantengan relativamente constantes con el tiempo.

Para un estudio más detallado podría ser tenido en cuenta como marco de referencia el Decreto Supremo No. 046-93 EM, que establece un reglamento único para la protección ambiental en las actividades de los hidrocarburos en Perú, el cual ordena que el sitio de monitoreo sea medio kilómetro corriente arriba y corriente abajo del punto de vertimiento para corrientes superficiales.

Para verificar el óptimo funcionamiento de los equipos incluidos en el sistema de tratamiento, se debe realizar monitoreo de la calidad del agua por lo menos una vez al día a la salida de cada uno de ellos.



3. SISTEMAS DE TRATAMIENTOS DE AGUAS RESIDUALES

En el capítulo anterior se mostró la importancia de realizar un óptimo tratamiento a las aguas residuales generadas en la producción de un campo petrolero, conscientes del impacto que genera este tipo de descargas en los cuerpos receptores y, además, la necesidad de cumplir con los requerimientos exigidos por normas ambientales plasmadas en la legislación colombiana.

A continuación se presenta una detallada descripción de los mecanismos de separación involucrados en cada uno de los equipos utilizados para el tratamiento de aguas residuales, entre los cuales podemos encontrar la coalescencia, dispersión, separación gravitacional y flotación, en donde estos dos últimos son la base principal del funcionamiento de los equipos .

Separación gravitacional

En los equipos de tratamiento de agua se utiliza esencialmente la fuerza de gravedad para separar las gotas de aceite de la fase continua agua. Las gotas de aceite empiezan a ser más livianas que el volumen de agua que los está desplazando y está ejerciendo sobre ellas una fuerza de boyanza. A este movimiento ascendente se opone la fuerza de fricción debida a la fase continua agua. Cuando las dos fuerzas son iguales, se logra una velocidad constante de modo que se puede calcular por la ley de Stokes ^[4]:

$$V_t = \frac{1.78 * 10^{-6} * (\Delta SG)_{w/o} * (d_m)_o^2}{\mu_w}$$



V_t = velocidad final de ascenso, ft/seg

$(d_m)_o$ = diametro de la gota de aceite, micrones

μ_w = viscosidad de la fase continua de agua, cp

$(\Delta SG)_{w/o}$ = diferencia en gravedad especifica del aceite

A partir de la ecuación anterior se puede deducir:

- ❖ A mayor diámetro de partícula del aceite mayor velocidad de ascenso a superficie, por lo tanto se hace más fácil su remoción.
- ❖ Entre mayor API del crudo, es decir un aceite más liviano, la diferencia de gravedades específicas se hace más grande, por lo tanto el agua es más fácil de tratar.
- ❖ A mayor temperatura, disminuye la viscosidad del agua, y aumenta la velocidad ascendente. Por lo tanto a altas temperaturas es más sencillo el tratamiento del agua.

Si el diámetro de partícula no se encuentra disponible, se puede asumir un diámetro de partícula de 150 μm .

Dispersión

Cuando hay suficiente energía cinética no sólo para levantar las gotas de aceite sino para hacerlas oscilar, éstas se volverán inestables (se dispersarán) debido a la diferencia de tensión superficial entre una sola gota y dos gotas que se han agrupado. En el mismo instante en que ocurre este proceso, el movimiento de pequeñas partículas de aceite está causando coalescencia. Debido a lo anterior se tendría que definir estáticamente una medida máxima de gota de aceite para una energía dada por una unidad de masa y tiempo, en la cual la tasa de fusión es igual a la tasa de dispersión ^[5].



Se puede establecer una relación para el tamaño máximo de partícula que pueda estar en equilibrio usando la ecuación dada por Hinze:

$$d_{\max} = 432 \left(\frac{t_r}{\Delta P} \right)^{2/5} \left(\frac{\sigma}{\rho_w} \right)^{3/5}$$

d_{\max} = Diámetro máximo gota de aceite para el cual el agua puede contener un 5% en volumen de aceite, micrones

σ = Tensión superficial (dinas/cm²),

ρ_w = Densidad del agua g/cm³

ΔP = Caída de presión (psia)

t_r = Tiempo de retención, minutos

Por la anterior ecuación podemos decir que entre mayor sea la caída de presión, menor será el diámetro máximo de la gota de aceite. Esto quiere decir que a mayor caída de presión ocurrida en una pequeña distancia a través del estrangulador, válvulas de control, desarenadores, etc., da como resultado gotas más pequeñas. De la experiencia se puede tomar, para propósitos de diseño, que aún cuando ocurran grandes pérdidas de presión todas las gotas de diámetro mayor que el máximo pueden dispersarse instantáneamente.

A mayor tiempo de residencia mayor diámetro máximo de la gota de aceite, por lo tanto las gotas tienen mayor tendencia a coalescer.

Coalescencia

Es la unión de pequeñas gotas para formar gotas de mayor tamaño. El proceso de coalescencia en sistemas tratadores de agua depende más del tiempo que de la dispersión. En la dispersión de dos líquidos inmiscibles, una coalescencia



inmediata ocurre raramente cuando las gotas colisionan. Si el par de gotas son expuestas a fluctuaciones de presión turbulenta y la energía cinética de oscilación inducida en el par de gotas fusionadas es mayor que la energía de adhesión entre éstas, el contacto se rompería antes que se complete la coalescencia.

Después de un periodo inicial de coalescencia, un tiempo de retención adicional disminuye la capacidad de causar coalescencia de gólicas de aceite.

El tiempo necesario para que ocurra la coalescencia está dada como:

$$t = \frac{(d_m)_o^4}{2\phi Ks}$$

$(d_m)_o$ = Diámetro de la gota de aceite, micrones

ϕ = Fracción en volumen de la fase dispersa aceite

Ks = Constante del sistema

Coagulación

Neutralización de las cargas de la materia coloidal, de modo que se reduzcan las fuerzas de separación entre ellas.

Floculación

Proceso de aglomeración de las partículas coaguladas para formar flóculos sedimentables, por lo general de naturaleza gelatinosa.

Tanto la coagulación como la floculación son dos procesos dentro de la etapa de clarificación del agua, en la cual las partículas sólidas se aglutinan en pequeñas



masas llamadas flóculos tal que su peso específico supere a la del agua y puedan precipitar.

Flotación

Este proceso mejora la separación de las gotas de aceite de la fase continua agua. Este objetivo es alcanzado por el incremento de la diferencia entre la densidad de los dos fluidos, al saturar el fluido con gas o dispersando en el sistema burbujas de gas, que arrastran a superficie las gotas de aceite. Este proceso disminuye el tiempo de retención en los recipientes.

Dada la importancia que tiene en la selección de equipos el diámetro de partícula de aceite a tratar, se presenta a continuación una tabla donde se relaciona dicho parámetro con el mecanismo de separación y su respectivo equipo de tratamiento.

Tabla 7. CARACTERÍSTICAS DE LOS EQUIPOS UTILIZADOS EN EL TRATAMIENTO DE AGUA

| Mecanismo de separación | Equipo de tratamiento | Mínimo diámetro de partícula de aceite a tratar (µm) |
|--------------------------------|--|---|
| Separación Gravitacional | Tanques y recipientes desnatadores | 100 - 150 |
| | Pilotes acumuladores de agua Pilotes desnatadores | |
| Coalescencia en platos | Interceptor de platinas paralelas planas | 30 - 50 |
| | Interceptor de platinas corrugadas | |
| | Separador de flujo transversal Mezcla de separadores de flujo | |



| | | |
|--|---|---------|
| | Precipitadores | |
| Coalescencia optimizada | Filtros / coalescedores Paquetes de tubería en serpentín | 10 - 15 |
| Flotación por gas | Gas disuelto Gas disperso | 15 - 20 |
| Separación gravitacional Optimizada | Hidrociclones Centrífugas | 5 - 15 |
| Filtración | Multimedia Membranas | > 1 |

Tomado de Kenn Arnold, Surface Production Operations, Volumen 1

3.1 OIL SKIMMER

Recipiente o tanque desnatador, cuyo principio de operación se basa en la separación gravitacional y la coalescencia, diseñados para proporcionar un alto tiempo de residencia para optimizar la separación y permitir la máxima remoción de aceite ^[6].

Figura 1. Recipientes desnatadores presurizados



Tomado de Ecopetrol S.A



Se clasifican de acuerdo a su forma como cilíndricos o rectangulares, por su ubicación en el campo en horizontales o verticales, por presión de operación en tanques atmosféricos o recipientes a presión, trabajando entre 13 y 15 psi. Conduciendo posteriormente el agua tratada hacia otro equipo para que continúe su proceso de purificación en caso tal que se necesite. Utilizando como elementos de optimización platinas coalescedoras, baffles o tabiques divisorios y paquetes de tubería en serpentín.

La elección de un Skimmer presurizado contra un tanque desnatador no se determina solamente porque se requiera el tratamiento de agua, sino también en el caso en que el sistema lo necesite. Los recipientes presurizados son más costosos, sin embargo se recomiendan cuando:

- Existen problemas de arrastre de gas en el líquido debido a la sobrepresión en el sistema.
- El agua debe ser descargada a un nivel superior para otro tratamiento (se requiere una bomba si se instala una cámara atmosférica)
- El propósito es la reinyección.

Características similares en los tanques y recipientes desnatadores

- ❖ Construcción en Acero al Carbono, Inoxidable o PRFV.
- ❖ Elementos de optimización como Platinas coalescedoras en PVC y baffles, para la disminución de turbulencia y corto circuito.
- ❖ No se presenta una disminución en la carga de forma significativa.
- ❖ Los elementos del equipo son fijos.
- ❖ Permite que el efluente de entrada posea una alta concentración de crudo.
- ❖ El cambio en el flujo no altera la eficiencia del equipo.
- ❖ Cámara de lodos para drenar sólidos que se precipitan al fondo.
- ❖ Colector temporal de aceite.



- ❖ Distribuidor o propagador de flujo.

Parámetros de diseño utilizados en los desnatadores

- ❖ Tamaño de la gota de aceite

Diámetro que depende de la caída de presión antes de la entrada al sistema y la concentración de aceite del agua residual. Para propósitos de diseño, el diámetro máximo de la partícula de aceite se asume entre 250 y 500 micrones.

El diámetro de partícula^[4] a tratar se puede calcular mediante:

$$d_m = \frac{\text{concentración de aceite a la salida}}{\text{concentración de aceite a la entrada}} * d_{\max}$$

- ❖ Tiempo de residencia

Para que la separación gravitacional, coalescencia, flotación y posterior remoción del aceite sea llevado a cabo, se debe dar al agua un tiempo de residencia aproximado entre 10 y 30 minutos y así evitar el efecto de la turbulencia y corto circuito.

3.1.1 SKIMMER VERTICAL PRESURIZADO

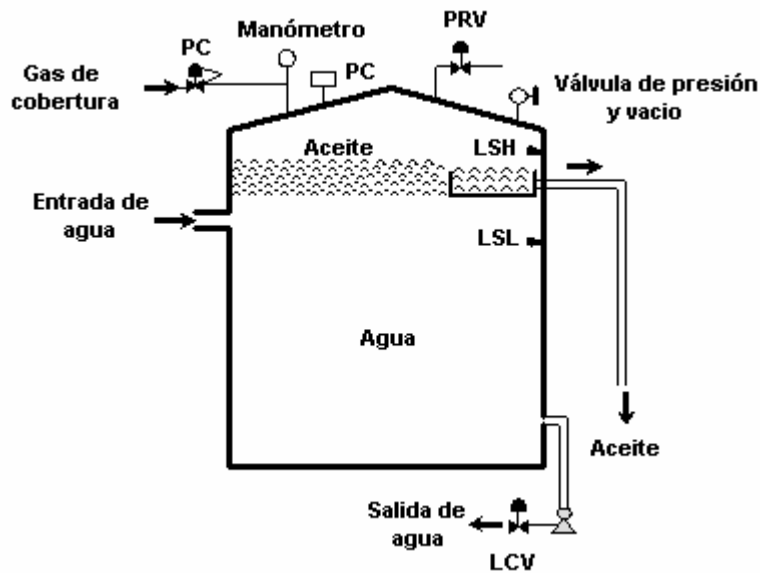
El flujo de caudal de agua a la entrada se dirige hacia la parte inferior de la interfase agua/aceite, entrando por un costado del Oil Skimmer, donde ocasionalmente se conduce el fluido hasta llegar al centro del tanque bajando verticalmente hasta una distancia próxima al fondo en donde está un propagador



(tubos de 4" ranurados y perpendiculares al tubo central) que ayuda a la distribución de flujo uniforme.

En el recipiente las gotas de aceite se mueven en contracorriente al flujo de agua ayudadas por mínimas cantidades de gas que pueden estar atrapadas en el agua por arrastre, favoreciendo la flotación de las gotas de aceite que aumentan la velocidad de ascenso de éstas, favoreciendo un rápido vertimiento en el colector de aceite para su posterior recolección.

Figura 2. Skimmer vertical presurizado



Tomado de PERENCO

- *Buen control de nivel*
- *Manejo de sólidos*
- *El aceite asciende en contra flujo*
- *Menor eficiencia de remoción de aceite*

Donde:

- *PC: Control de presión*
- *PRV: Válvula de alivio de presión*
- *LCV: Válvula de control de nivel*
- *LSH: Válvula de alto nivel*
- *LSL: Válvula de bajo nivel*



En el espacio entre el propagador y el colector de agua, se presenta la coalescencia y la fuerza de Boyanza de las gotas de aceite causará que éstas asciendan contra el flujo de agua.

El espesor de la capa de aceite o la nata depende del nivel relativo entre la compuerta de aceite y la pierna de agua, y ante todo de la diferencia en gravedad específica de los dos fluidos. Con frecuencia usamos un control de nivel tipo interfase en lugar de una pierna de agua.

Se utilizan cuando:

- ✓ Se necesita manejar arena y sólidos. Esto puede hacerse en recipientes verticales con desagües o drenajes de arena en el fondo del recipiente. Estos drenajes en recipientes horizontales no han sido satisfactorios.
- ✓ Se experimenta movimientos turbulentos del fluido. Son menos susceptibles a que se produzcan cierres en los niveles altos debido al movimiento del líquido.

3.1.2 SKIMMER HORIZONTAL PRESURIZADO

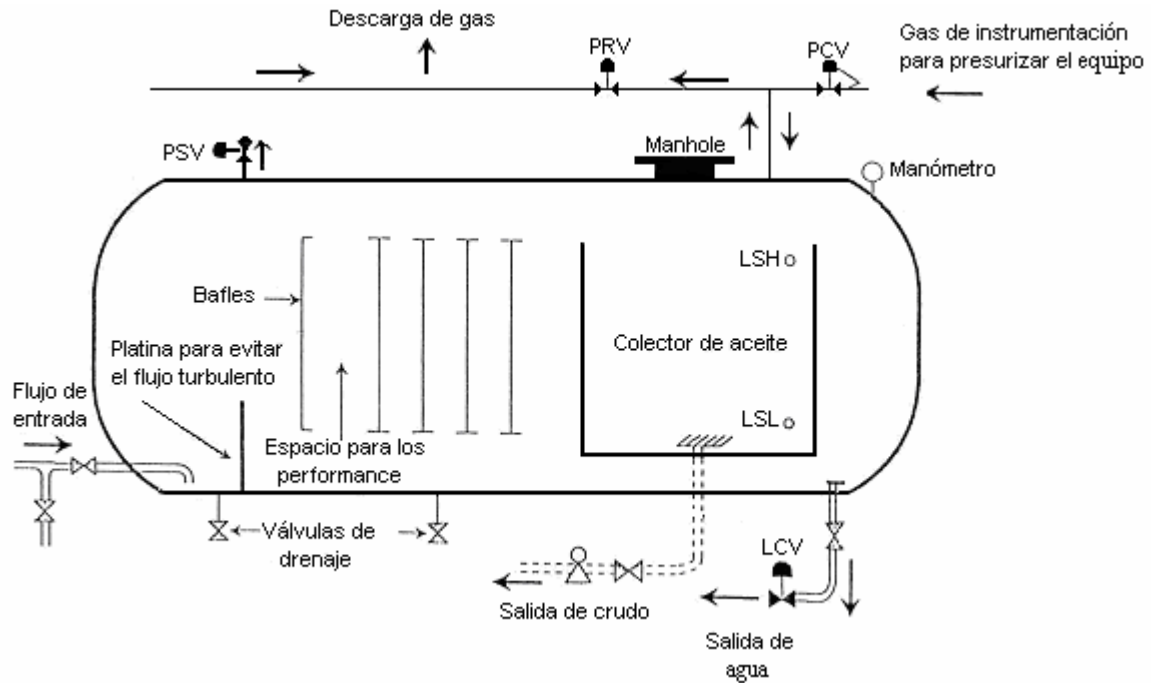
El flujo de caudal de agua entra a través de un “down comer”, para permitir la separación del crudo y el gas del agua, y dirigirlo hacia la parte inferior de la interfase agua/aceite para combinarse y distribuirse de forma uniforme a lo largo del recipiente, en este caso las gotas de aceite ascienden perpendiculares a las gotas de agua.

En este recipiente tipo horizontal a presión se puede optimizar el tratamiento mediante la instalación de platinas coalescedoras, baffles o tabiques divisorios para homogeneizar el flujo horizontal y reducir el fenómeno de “corto circuito”. En



este tipo de tratadores el espesor de la capa de aceite es controlado a través de una compuerta o pierna de agua como en el Skimmer vertical.

Figura 3. Skimmer horizontal



Tomado de PERENCO

Son más eficientes que los desnatadores verticales porque las gotas de aceite no tienen que fluir contra la corriente de flujo del agua.

3.1.3 CAJA API

Es una piscina o alberca expuesta a la atmósfera la cual presenta internamente una serie de compartimientos, optimizada mediante tabiques divisorios y/o bafles, (ver fig. 4). Su función es la de recuperar al máximo el aceite presente en el agua de descarga proveniente de algunos de los equipos presentes en la facilidad de producción. Su principio de operación se basa en el tiempo de asentamiento y la diferencia de gravedades específicas entre el agua y el aceite.



Figura 4. Caja API



Tomado de ECOPEPETROL S.A.

En este tipo de dispositivos el fluido entra al sistema descargado por un tubo con codo descendente, pasando luego a la sección de separación en donde se le da un tiempo de residencia que le permite a las gotas de aceite coalescer y flotar para su posterior remoción. El aceite, una vez acumulado en forma de nata o pequeña capa, es recolectado mediante una canaleta tubular y luego es conducido a un tanque recolector de aceite. En este tanque se tiene instalada una bomba electrosumergible que automáticamente transfiere periódicamente el aceite acumulado a los tratadores y/o Gun Barrel. El agua que se asienta en el fondo del separador API es transferida por medio de unos tubos ubicados en la parte inferior del recipiente hacia piscinas aledañas o cualquier otro elemento de recuperación secundaria.

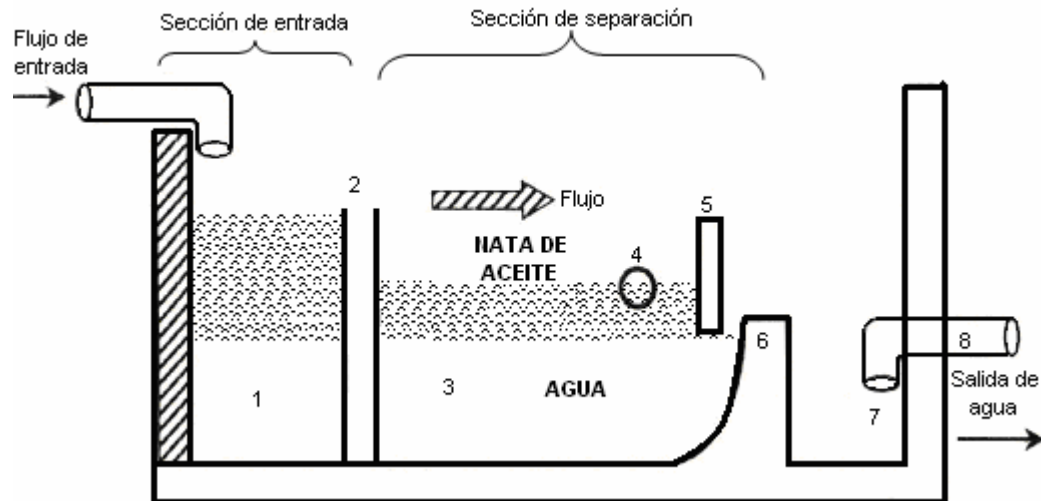
A continuación se muestran las partes de la Caja API, la cual consta de dos secciones principalmente:

- Sección de entrada: Compartimiento en donde disminuye el caudal, se remueven sólidos y se disminuye la carga a la sección de separación.



- Sección de separación: Cámara conformada por una serie de conductos de entrada, dispositivos de distribución de flujo, canal desnatador, baffles de retención y colectores de aceite.

Figura 5. Secciones del separador API



- | | |
|----------------------------------|--|
| 1. Cámara de entrada | 5. Baffle de retención de aceite |
| 2. Distribuidor de flujo dentado | 6. Vertedero de salida |
| 3. Canal separador | 7. Conducción del efluente |
| 4. Tubo desnatador | 8. Tubos de paso de agua entre secciones |

Adaptado de Ruth Páez, Operaciones de recolección y tratamiento

Entre algunas de las características que presenta la caja API podemos encontrar la modificación del nivel de los vertederos o la extensión del compartimiento de la cámara de separación. Generalmente fabricado en acero al carbón A-36 con fondo plano.

3.2 PLATINAS COALESCEDORAS

Las placas paralelas son disponibles en módulos que se pueden adaptar generalmente a un separador convencional sin modificaciones estructurales importantes. Sin el equipo mecánico de remoción de los sedimentos, adaptar



platos paralelos puede no ser práctico, dado que la remoción manual de sedimentos puede requerir el retiro del paquete de placas del separador en intervalos regulares. En teoría, los módulos de placas paralelas pueden mejorar el funcionamiento de dos maneras:

Figura 6. Paquete de platos corrugados



- Proporcionan un aumento en el área superficial horizontal del separador.
- Crean una distribución más uniforme, características de flujo menos turbulento, proporcionando condiciones más favorables para la separación del aceite libre.

La adaptación de módulos de placas paralelas en un separador existente puede acomodarse para flujos más altos, o disminuir la salida de aceite bajo las mismas condiciones de flujo. El espaciamiento entre platos y el ángulo de la placa son críticos para el apropiado funcionamiento del paquete de placas.

La información requerida de los separadores existentes para ser adaptados incluye la geometría existente del separador, niveles de agua de lavado, calidad del influente, gravedad específica de las fases agua/aceite dadas a la temperatura de diseño y la calidad del efluente deseada.

El Oil Skimmer cuenta con unas características de diseño específicas y con un espacio que puede ser aprovechado para permitir el empleo de baffles o placas



que aumentan el área de contacto con el fluido en un espacio relativamente pequeño, que al colocarlas en serie, paralelas, separadas a una corta distancia entre sí, e inclinadas respecto a la horizontal en forma de un paquete, permiten aumentar la frecuencia de colisión entre partículas, aglutinándose en partículas de mayor tamaño, fáciles de capturar, coalescer y posteriormente remover de la superficie.

La presencia de las placas ayuda a disminuir el diámetro de partícula a tratar, de un rango dado entre 100 y 150 μm a remover partículas de diámetros entre 30 y 50 μm , esto indica que, aunque la ley de Stokes puede aplicarse para gotas de aceite con diámetros entre 1 y 10 μm , la experiencia de campo indica que 30 μm es el límite menor y el más razonable tamaño de gotas de aceite que puede ser removida. Por debajo de este tamaño, pequeños cambios de presión, vibraciones en plataformas, etc, tienden a impedir que las gotas de aceite suban y coalescan en superficie. Además, la presencia de este elemento de optimización reduce la turbulencia y el corto circuito (disminuyendo el factor F), al homogenizar el flujo y dar mayor tiempo de retención al fluido en el desnatador.

Entre las más comunes se encuentran:

PPI: Interceptor de platinas paralelas.

CPI: Interceptor de placas corrugadas.

CFD: Separador de flujo transversal.

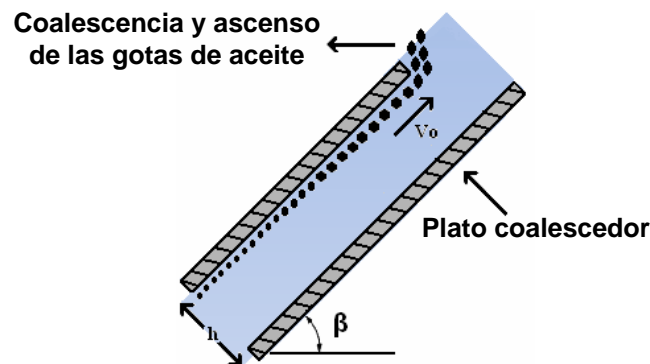
Donde estas placas se pueden implementar, tanto como elementos de optimización primarios en Oil Skimmer, como elementos independientes en procesos de recuperación primaria y secundaria.



3.2.1 Interceptor de platinas paralelas

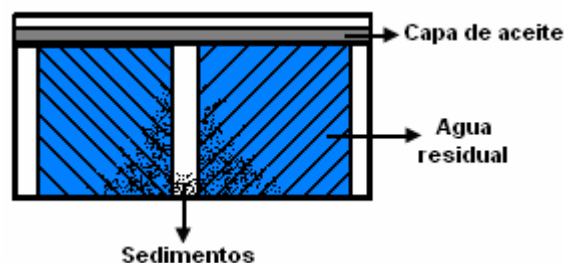
Los separadores de placas paralelas son teóricamente capaces de remover partículas más pequeñas de aceite libre que los separadores de aceite convencionales, pero ellos todavía no pueden remover los aceites emulsionados o disueltos.

Figura 7. Plato Coalescedor



Básicamente consta de una serie de paquetes de platinas planas paralelas que son colocadas a lo largo del eje longitudinal del oil skimmer o caja API, soportados por baffles o láminas perforadas, que genera un camino laberíntico forzando a las gotas de aceite a unirse y ascender fácilmente para posteriormente vertir la nata formada en el colector.

Figura 8. Corte transversal de un desnatador

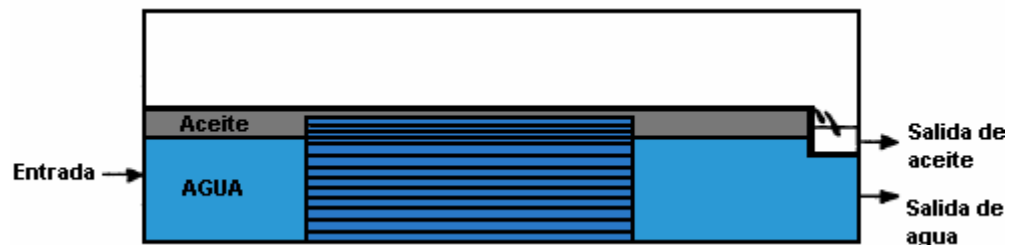




Si el flujo es perpendicular al eje de las placas, un corte transversal al tanque ó recipiente desnatador, fig. 8 permite observar como este performance forma una especie de “V” a lo largo del equipo.

Dado que los módulos de las placas paralelas los provee generalmente un vendedor, es recomendable hacer que éste optimice el diseño de acuerdo con las configuraciones particulares de placas estándar, principalmente si es una garantía de funcionamiento requerido para la unidad.

Figura 9. Vista longitudinal del paquete PPI en una Caja API



3.2.2 Interceptor de placas corrugadas

Es la unidad más comúnmente usada en “off shore” para el tratamiento de aguas residuales, y por lo general la más eficiente cuando no se requiere trabajar a presión por posibles problemas de arrastre de gas, además que representa un refinamiento del interceptor de platinas pero que ocupa menos espacio para remover el mismo tamaño de partícula y además tiene el beneficio de hacer mas fácil el manejo de sedimentos.

El eje de las corrugaciones, similares a un tejado, 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



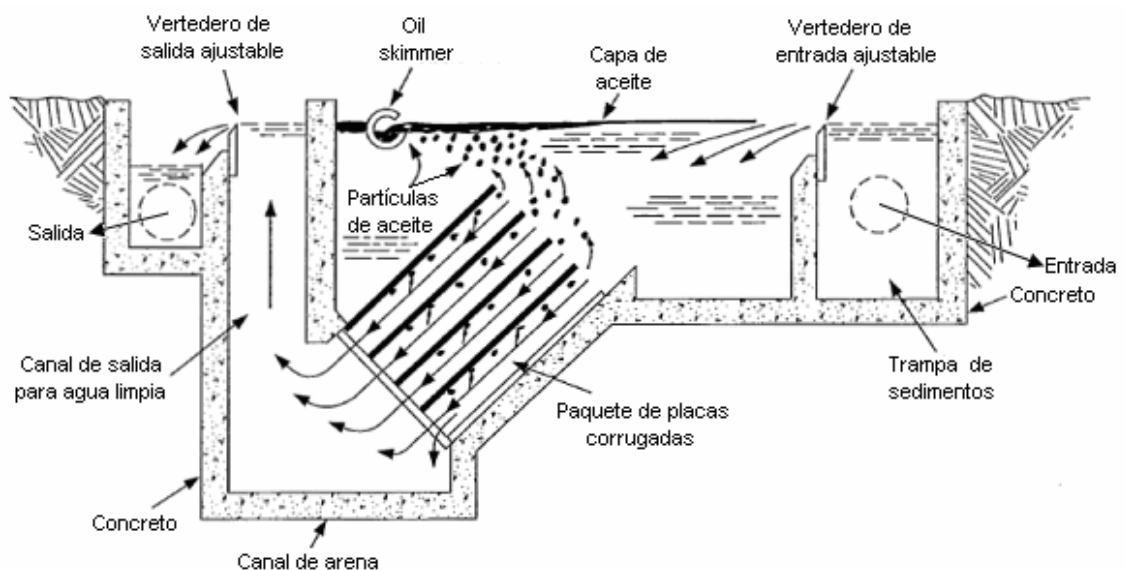
alcanza el último paquete de platos se recoge en un canal y se lleva a la interface agua – aceite, como se muestra en la figura 10.

Experimentalmente se ha observado que la arena humedecida con aceite se adhiere a la platina cuando tiene una inclinación de 45° , por lo tanto tiende a taponarse. Para esta situación en particular, es recomendado aumentar el ángulo de inclinación desde 45° hasta 60° , según las especificaciones [7].

Si se prevee una producción de arena o sedimentos significativa, ésta puede ser removida antes de que el agua residual entre al paquete de platinas, evitando así una posible obstrucción. Se debe mantener el flujo laminar en el plato coalescente para un óptimo asentamiento de arena.

Además, los platos colectores de arena instalados en el fondo del recipiente causan turbulencia, disminuyendo la eficiencia del tratamiento y ellos mismos están sujetos a taponamiento.

Figura 10. Paquete de placas corrugadas instalado en una caja API

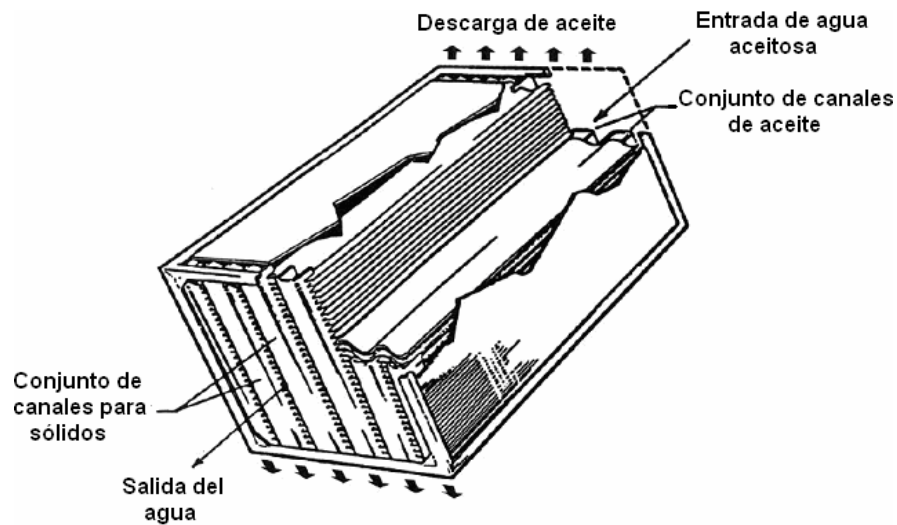


Adaptado "Monographs on Refinery Environmental Control, Management of water Discharges. API Publication 421"



- Eficientes si las gotas son $>$ de 30 μm .
- Compactos, buenos como primera etapa de tratamiento.
- Se taponan cuando hay gran cantidad de sólidos.
- Mantenimiento frecuente con crudo parafínico.
- Placas corrugadas mejores que separadores de flujo cruzado e interceptores de platos paralelos.

Figura 11. Paquete de platos CPI



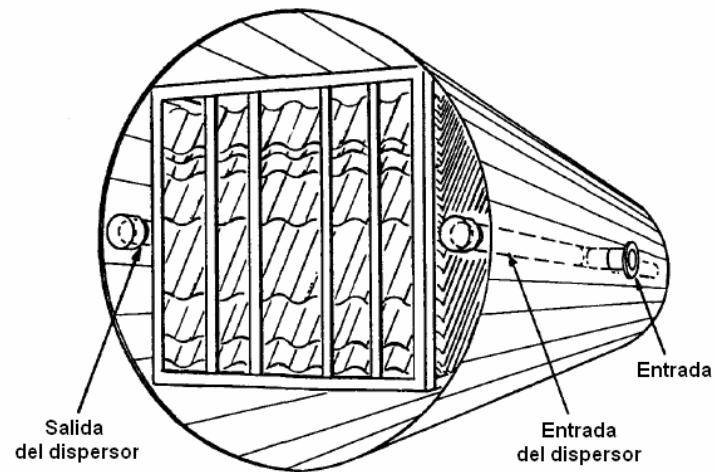
Adaptado de Kenn Arnold, Surface Production Operations, Volumen 1

3.2.3 Separadores de flujo transversal

Modificación del CPI, en el cual el flujo de agua es perpendicular al eje de las corrugaciones de la placa. Permite a los platos estar convenientemente instalados a un ángulo mayor a 45° , para facilitar la remoción de sedimentos en un recipiente presurizado. Proporcionando un control del potencial de gas presente en el equipo.



Figura 12. Esquema de un separador de flujo transversal



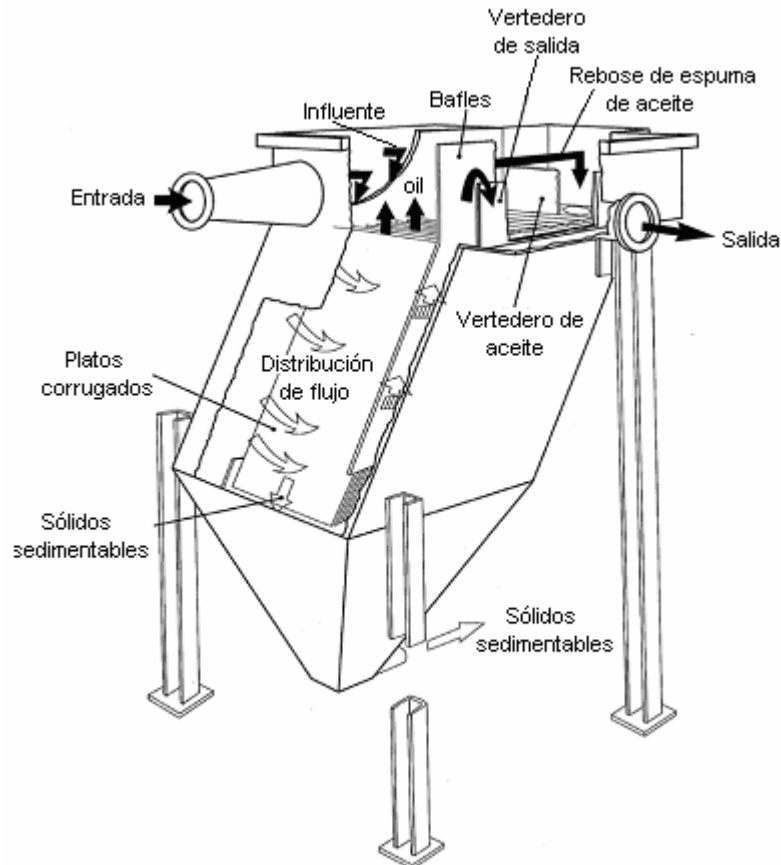
Adaptado de Kenn Arnold, Surface Production Operations, Volumen 1

Estos dispositivos pueden ubicarse ya sea en recipientes a presión verticales u horizontales. En recipientes horizontales se requiere un menor ángulo de inclinación, dado que la distancia que recorre la partícula de aceite desde el fondo hasta la superficie es menor comparada con un skimmer vertical.

En general, los interceptores de placas corrugadas son más económicos y eficientes para la remoción de aceite que los de flujo transversal. No obstante, el flujo transversal debería considerarse cuando se requiere el uso de recipientes a presión y se espera agua con mucho contenido de sólidos. A continuación se presenta en la figura un separador de flujo transversal.



Figura 13. Separador de flujo transversal.



Adaptado de Monographs on Refinery Environmental Control, Management of water Discharges. API Publication 421.

3.3 PAQUETES DE TUBERÍA EN SERPENTÍN (S.P. PACKS)

Los paquetes de tubería en serpentín son diseñados básicamente para generar turbulencia al interior del separador, generalmente son instalados en elementos de segregación gravitacional primarios, tales como los recipientes y los tanques desnatadores. Consta de una serie de tubos en forma de espiral a través del cual el flujo de agua es forzado a pasar, permitiendo así a las gotas de aceite presentes en el agua agruparse y ascender a superficie de una forma más eficiente.



Como en todo sistema de separación primaria, la presencia de sólidos puede generar problemas de eficiencia por taponamiento, y abrasión en los equipos. De la misma forma, en estos elementos de optimización también ocurre y es necesario asegurarse que estos inconvenientes no se presentarán diseñando un mismo diámetro a la entrada y a la salida del paquete de tubería en serpentín.

Son muy efectivos al implementarse en sistemas de tratamiento primario ya que éstos son diseñados para incrementar la distribución en el tamaño de la gota de aceite, mediante el crecimiento o la coalescencia, llevándola hasta un diámetro máximo de 1.000 μm , haciendo más fácil la remoción.

Al ser colocados en serie son más eficientes, según las recomendaciones de la tabla 8.

Tabla 8. Paquetes estándar de tubería en serpentín

| Flujo optimo¹ (BWPD) | número de serie | Diámetro a la entrada y salida (in) | Capacidad del tanque (BBL) | Rango de operación² |
|--|----------------------------|--|---|---|
| 500-1000 | LAA | 1,5" | 100 | 400-2500 |
| 1000-1500 | LA | 2" | 100 | 1000-5000 |
| 1500-2200 | LB | 3" | 100 | 1300-10000 |
| 2200-4500 | LC | 4" | 100 | 1700-18000 |
| 4500-11000 | ID | 6" | 100 | 2500-40000 |
| 11000-22000 | IE | 8" | 210 | 3500-70000 |
| 22000-40000 | IF | 10" | 500 | 4500-100000 |
| 40000-57000 | HG | 12" | 500 | 6000-150000 |

Tomado de Kenn Arnold, Surface Production Operations, Volumen 1

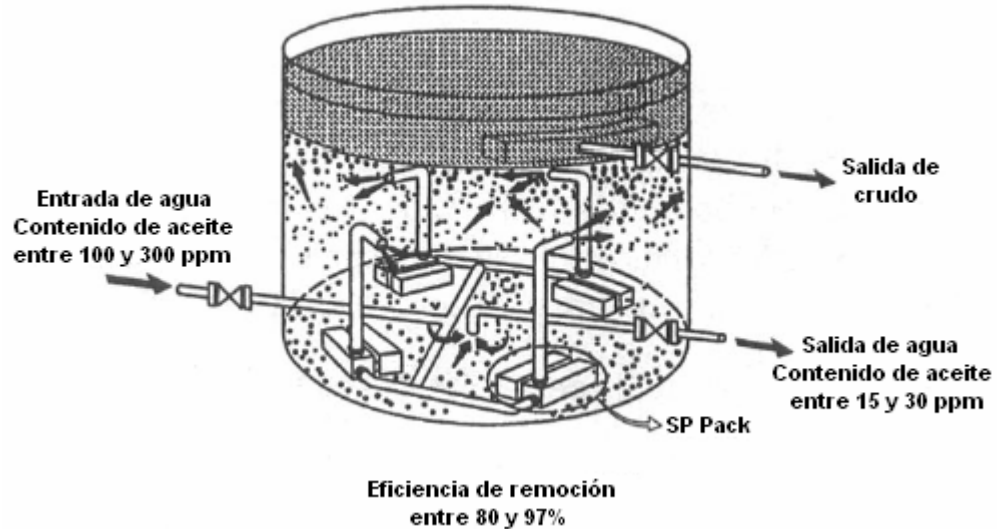
1. Flujo optimo: rango al cual ocurre la mayor remoción de aceite
2. Rango de operación: Amplia gama en la cual los paquetes de tubería en serpentín pueden trabajar sin afectar el proceso de optimización.

Para flujos mayores a 57000 BWPD consultar a MPE at Houston office.



En la siguiente figura se muestra un desnatador optimizado mediante el uso de un paquete de tubería en serpentín.

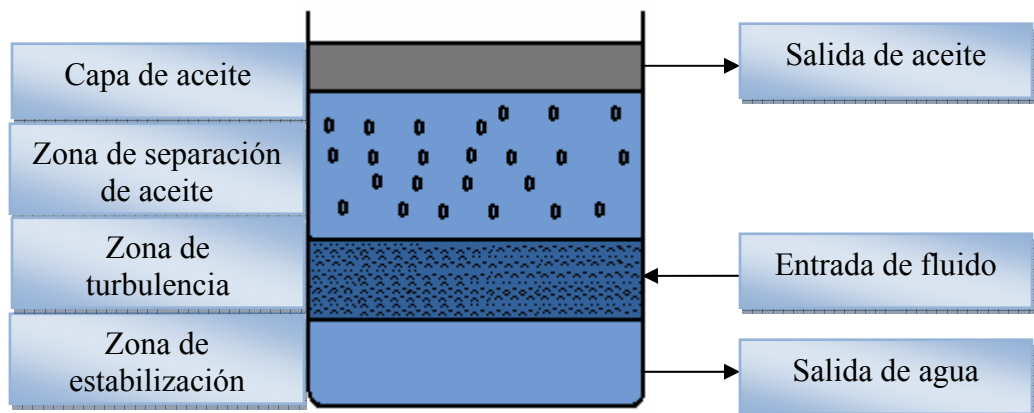
Figura 14. Paquete de tubería en serpentín instalado en un skimmer



Adaptado de Kenn Arnold, Surface Production Operations, Volumen 1

Básicamente, en este tipo de unidades encontramos cuatro zonas definidas como se presenta a continuación.

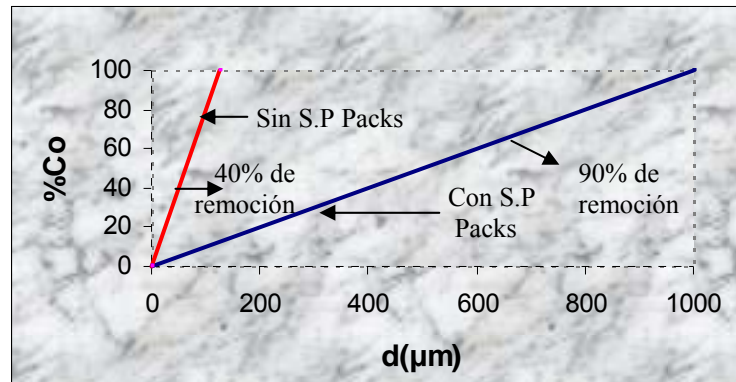
Figura 15. Zonas generadas en el tanque desnatador optimizado





El efecto del paquete de tubería en serpentín instalado en un desnatador genera un incremento en la eficiencia del equipo para un mismo diámetro de partícula de aceite, tal como se muestra en la figura 16.

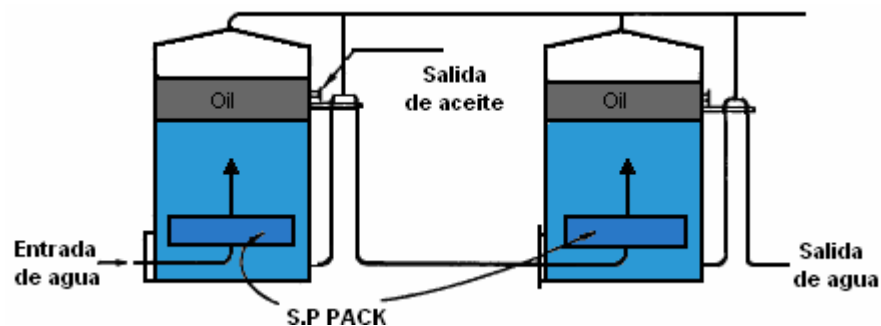
Figura 16. Distribución del tamaño de gota de aceite con o sin S.P Packs



Adaptado de Kenn Arnold, Surface Production Operations, Volumen 1

Como se puede observar en el sistema presentado en la figura 17, a medida que el flujo pasa por la primera etapa se genera una mejor distribución del tamaño de gota permitiendo la remoción de gran cantidad del aceite presente en el agua. Al pasar a la siguiente cámara se remueve parte del aceite que no se pudo eliminar en la anterior etapa, aumentando así la eficiencia del sistema.

Figura 17. Paquetes de tubería en serpentín instalados en recipientes verticales



Adaptado de Kenn Arnold, Surface Production Operations, Volumen 1



3.4 UNIDADES DE FLOTACIÓN

Las unidades de flotación son los únicos equipos de tratamiento de agua residual cuyo principio de separación se fundamenta en el arrastre por gas de las partículas de aceite, aunque también ocurre la separación gravitacional, pero en menor proporción. Las unidades de la flotación emplean un proceso en el cual pequeñas burbujas de gas son generadas y dispersadas en el agua, donde hacen contacto con las gotas del aceite y partículas sólidas. Las burbujas de gas incrementan la diferencia de densidades y ayudan a las gotas de aceite a ascender rápidamente a superficie para su posterior recolección. Coagulantes, polielectrólitos, o desemulsificantes son agregados para optimizar el funcionamiento del equipo.

Figura 18. Unidad de flotación tipo gas disuelto



www.environmental-expert.com

Se pueden encontrar dos clases de unidades de flotación diferenciándose por el método de producción de burbujas de gas en el agua residual, tales como:

- ✓ Unidades de flotación por gas disuelto
- ✓ Unidades de flotación por gas disperso



Cabe resaltar, que las unidades de flotación son sistemas de tratamiento secundario.

3.4.1 Unidades de flotación por gas disuelto

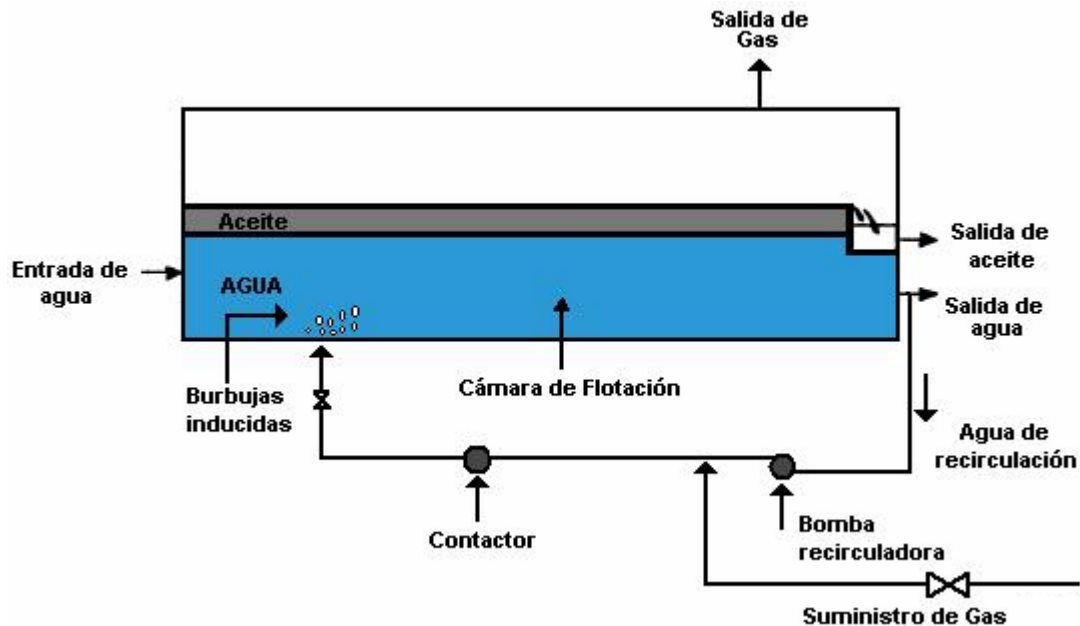
El agua residual entra al recipiente y a medida que el influente pasa a través de la entrada, éste impacta contra una platina desviadora tan pronto entra a la primera de las cuatro celdas activas, cuya función es la de evitar un flujo turbulento a la entrada del dispositivo.

En este sistema se toma parte del agua que ha sido tratada, se satura con gas mediante un contactor (que trabaja a mayor presión) y luego es inyectada al equipo ^[8]. Al entrar al recipiente el gas disuelto en el agua recirculada se rompe formando pequeñas burbujas que hacen contacto con el aceite, el cual es arrastrado hasta superficie formando una capa de espuma que es removida posteriormente.

Este tipo de unidades han resultado útiles en operaciones de refinería, donde el aire se ha utilizado de la misma forma que el gas para la saturación del fluido y se dispone de un espacio lo suficientemente grande. Si el fluido es inyectado a una formación, se debe evitar la presencia de oxígeno en el aire. Aunque, resulta más práctico el uso de gas natural dado que no se lleva a cabo la remoción del oxígeno. Es indispensable la instalación de una unidad de venteo o sistemas de recolección de gas.



Figura 19. Esquema de unidad de flotación tipo gas disuelto



Las limitaciones de las unidades de flotación tipo gas disuelto son:

1. Ocupan grandes espacios y son más pesadas, impidiendo su uso en costa afuera.
2. En algunas instalaciones no se cuenta con unidades de recuperación del vapor, impidiendo así, la recirculación del mismo.

Se ha observado en la práctica que las unidades de flotación tipo gas disuelto son más efectivas que las unidades de flotación tipo gas disperso al instalar un propagador de flujo, y de esta forma proporcionar una mejor distribución de las burbujas en el recipiente.

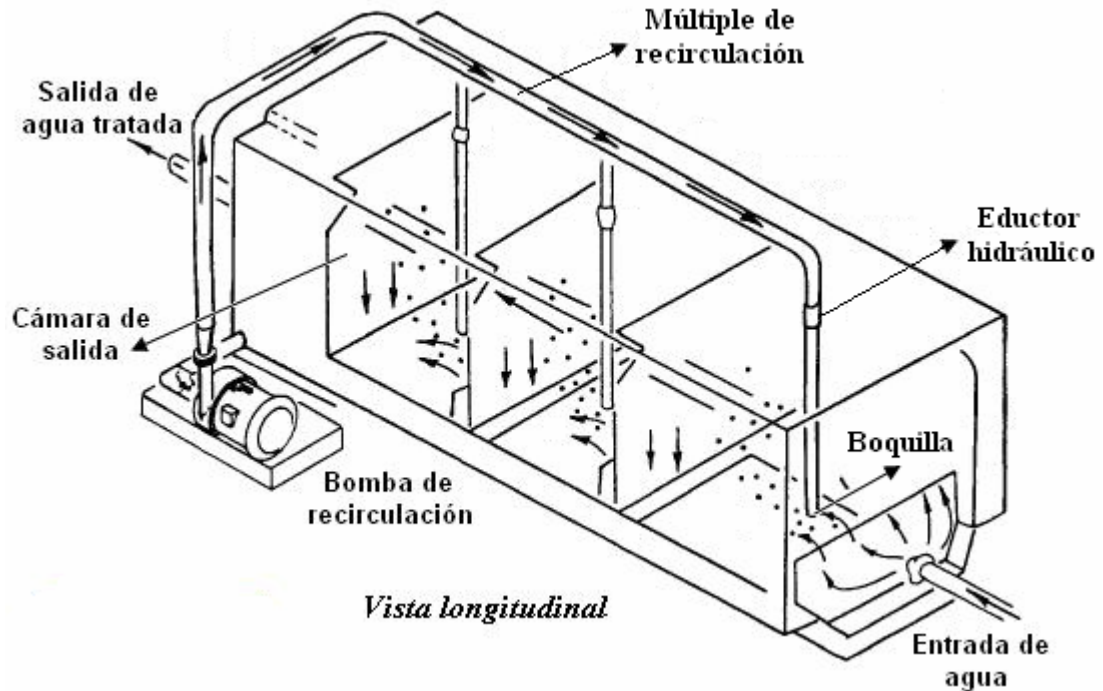
3.4.2 Unidades de flotación por gas disperso

En estas unidades, como mecanismo de producción de burbujas se puede utilizar un eductor para saturar el agua residual y una boquilla para inducir las burbujas



(ver fig. 20), o en su defecto, un rotor mecánico que agita la corriente de agua en la cámara para facilitar la dispersión de las burbujas.

Figura 20. Unidad de flotación tipo gas disperso con eductor hidráulico



Adaptado de Kenn Arnold, Surface Production Operations, Volumen 1

Las burbujas generadas en este tipo de unidades son de mayor tamaño que las generadas en las unidades de flotación tipo gas disuelto, dado que no se encuentran en solución con el fluido y el ascenso de las burbujas a superficie será más rápido, ocasionando así un tiempo de residencia menor.

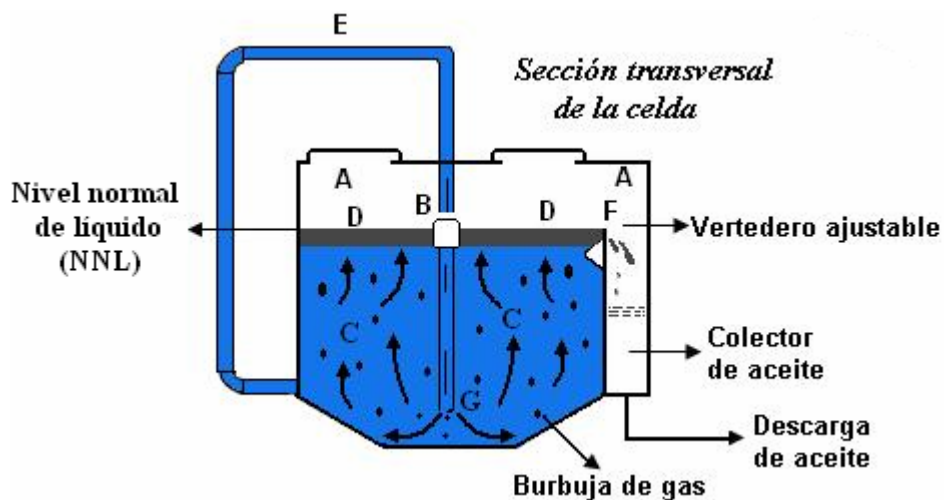
✚ Unidades de flotación por gas disperso con eductor hidráulico

Básicamente, el dispositivo (Fig. 21) sustrae agua tratada de la cámara de salida de la unidad, la cual es llevada hacia el múltiple de recirculación y saturada con gas mediante un eductor (B) que toma el gas de la sección de vapor (A), luego es inyectada a cada uno de los compartimientos del sistema para optimizar la



operación. Las burbujas inducidas se rompen al salir de la boquilla (G) dispersándose en el volumen total para luego arrastrar las partículas de aceite disueltas en el agua hasta superficie formando una nata de aceite en forma de espuma (D), fenómeno que se conoce como flotación (C). Por rebose, la capa de aceite es vertida hacia el colector (F) para luego ser removida.

Figura 21. Celda de una unidad de flotación tipo gas disperso con eductor hidráulico



Adaptado de Kenn Arnold, Surface Production Operations, Volumen 1

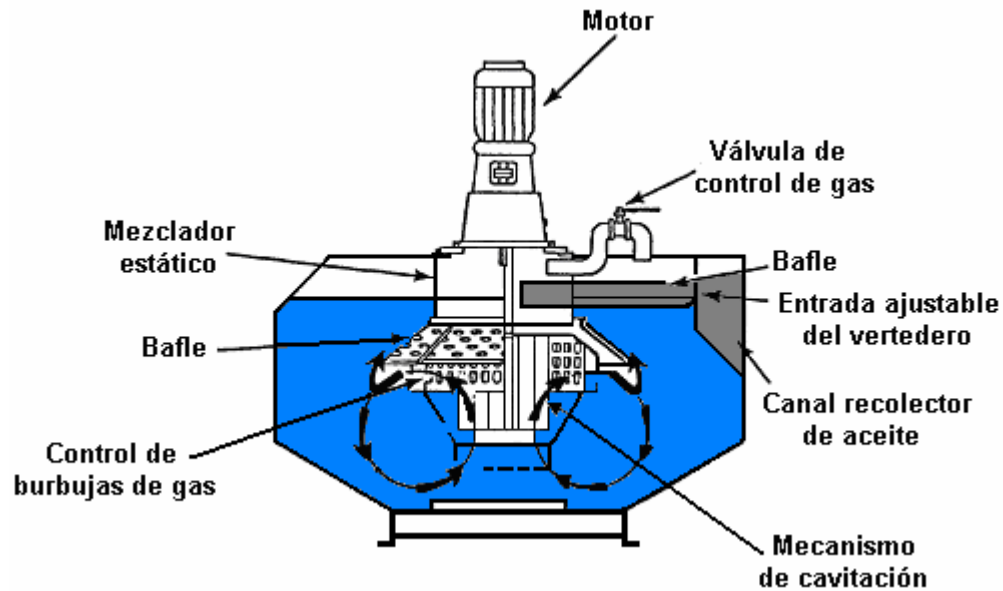
Generalmente, cuando el agua residual es tratada en unidades de flotación tipo gas disperso, el diseño en serie consta de una, tres o cuatro celdas. Valores típicos menores a $10\text{ft}^3/\text{bbl}$ de la relación gas/agua son tomados como criterios de diseño. Las unidades de flotación tipo gas disperso con rotor mecánico requieren mayor energía y gas que las unidades con eductor hidráulico.

✚ Unidades de flotación por gas disperso con rotor mecánico

En este tipo de unidades, el rotor mecánico hace que el agua fluya como muestran las flechas en la figura, generando remolinos y vacío dentro del flujo circular. Las cubiertas aseguran que el gas se disperse y sea arrastrado con el agua.



Figura 22. Sección transversal de una celda de una unidad de flotación tipo gas disperso con rotor mecánico



Adaptado de Kenn Arnold, Surface Production Operations, Volumen 1

Las burbujas arrastran partículas de aceite hacia superficie, allí chocan con un baffle colocado en la tapa que conduce la espuma al colector para luego ser removida.

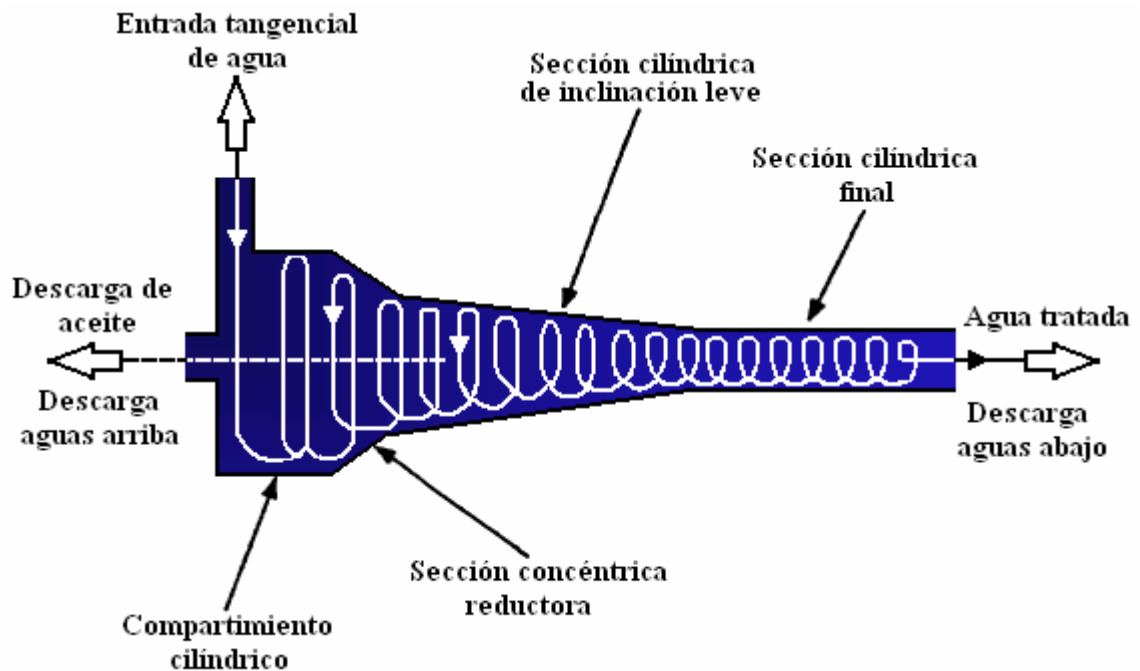
3.5 HIDROCICLONES

Este tipo de unidades utiliza la fuerza centrífuga para remover las gotas de aceite presentes en el agua (ver fig. 23). El flujo entra al compartimiento de forma tangencial creando un remolino de alta velocidad, en el cual las gotas de aceite coalescen y fluyen en contracorriente. A medida que el fluido pasa a través de las secciones concéntricas de reducción (alto grado de inclinación) y decreciente (con ángulo de inclinación leve), se produce un incremento en la velocidad. Luego, el fluido ingresa a una sección cilíndrica donde el caudal se mantiene constante. Las partículas de mayor tamaño son separadas en la sección decreciente, mientras que las partículas más pequeñas, son removidas en la sección final. Las partículas



de aceite al tener menor densidad son arrastradas por la fuerza centrífuga hacia la zona de baja presión generada en el centro del cilindro, en donde fluyen en dirección contraria al flujo. El aceite es removido a través de un puerto de diámetro pequeño ubicado en la cabeza del hidrociclón, mientras que el agua sale por la parte baja del equipo [4].

Figura 23. Hidrociclón



Adaptado de Kenn Arnold, Surface Production Operations, Volumen 1

Los hidrociclones estáticos requieren una presión mínima de 100 psi para generar las velocidades requeridas. Algunos equipos son diseñados para operar a presiones más bajas, pero éstos no son tan eficientes como los que operan a altas presiones. Los hidrociclones pueden remover partículas de aceite de diámetros entre 5 y 15 μm .

El funcionamiento es influenciado principalmente por la relación de descarga de aceite y la relación de caída de presión (PDR), además también es afectado por el tamaño de la gota de aceite y la concentración de aceite a la entrada, la diferencia de gravedades específicas y la temperatura a la entrada. Temperaturas mayores a

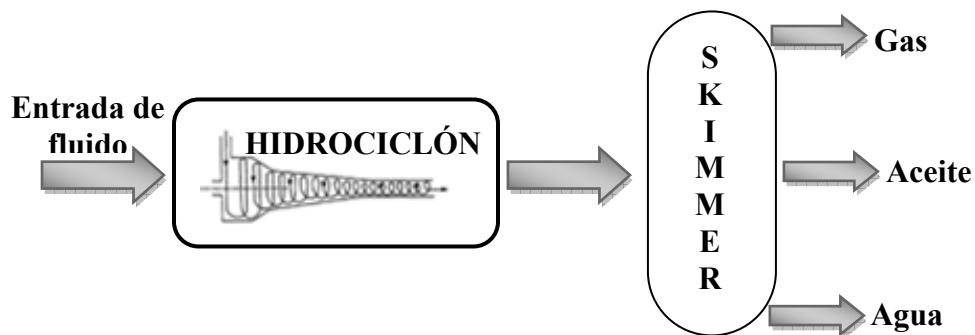


80°F generan mejores resultados. La relación de descarga de aceite se refiere a la razón entre la salida de aceite y el fluido total de entrada. Generalmente, la relación de descarga se encuentra entre 1 y 3%. Ésta relación es también proporcional al PDR. La operación por debajo de éste rango da lugar a bajas eficiencias de remoción y por encima aunque no influye en la remoción de aceite, es necesario recircular mayor cantidad de fluido a través de la facilidad. El PDR se refiere a la relación entre la caída de presión a la entrada del fluido y la salida de descarga de aceite, y la caída de presión entre la entrada del fluido y la salida del agua. Un PDR entre 1.4 y 2.0 es usualmente requerido.

Para cálculos de diseño se asume una remoción de aceite del 90%, aunque en la práctica este resultado no se presenta.

Los hidrociclones son excelentes dispositivos coalescedores, funcionan como un elemento de tratamiento primario seguido por skimmer. En la siguiente figura se presenta la ubicación del equipo en la facilidad.

Figura 24. Ubicación de un hidrociclón en la facilidad



Entre algunas ventajas de los hidrociclones estáticos se encuentran:

- No poseen partes móviles, por lo tanto no se requiere mayor atención a la operación y mantenimiento.



- Diseño compacto, reduce requisitos de peso y espacio comparados con las unidades de flotación.
- Son estables al movimiento.
- Su diseño modular permiten manejar volúmenes mayores de flujo.
- Costos de operación más bajos comparados con las unidades de flotación.

Las desventajas incluyen la necesidad de instalar una bomba si el aceite entra a la unidad a una presión por debajo de la presión mínima de operación y la tendencia del puerto de descarga a taponarse con arena y/o escamas. La arena en el agua producida causará la erosión de los conos e incrementará los costos de operación.

3.6 PISCINAS PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS

Generalmente, son elementos diseñados para el tratamiento secundario del agua residual con el objetivo de proporcionar un tiempo de retención relativamente grande comparado con los demás equipos. Estas se pueden clasificar según su profundidad en:

- **Piscinas aeróbicas**

Lagunas en las cuales los microorganismos oxidan la materia orgánica aprovechando el oxígeno disuelto presente en el agua. La profundidad oscila entre 0.5 y 1 m, permitiendo el paso de la luz solar a través del cuerpo de agua, y así favorecer el crecimiento de algas por acción de la fotosíntesis, las cuales generan grandes cantidades de oxígeno.

- **Piscinas anaeróbicas**

Lagunas con profundidades entre 2.0 y 4.0 m, donde los microorganismos toman el oxígeno de sulfatos y nitratos presentes en el agua para producir



CO₂, por lo tanto, este tipo de lagunas permite una alta concentración de contaminantes sin contenido de oxígeno disuelto a diferencia de las piscinas aeróbicas.

➤ Piscinas facultativas

Lagunas con características aeróbicas y anaeróbicas simultáneamente, en las cuales los microorganismos se mantienen en condiciones aeróbicas en superficie y anaeróbicas en el fondo de la piscina. La profundidad oscila entre 1.0 y 2.0 m. Comúnmente, este tipo de piscinas son usadas en la industria petrolera implementando sistemas de aireadores.

Figura 25. Piscina para el tratamiento de agua residual



Estación Barquereña

Las piscinas para el tratamiento de aguas residuales tienen como objeto:

- Preservación de la flora y la fauna al remover el contenido de aceite y otros contaminantes (DBO y DQO) que inciden de forma negativa en el agua receptora.
- Incrementar y/o mantener los niveles de oxígeno disuelto en el agua residual.
- Reducción en la concentración de compuestos aromáticos, fenólicos y metales.
- Estabilizar las condiciones de PH.



De acuerdo al fenómeno que predomine en la piscina para el tratamiento de agua, éstas se pueden clasificar en:

■ PISCINAS DE SEDIMENTACIÓN

Se basa en la separación gravitacional, y al igual que en algunos sistemas de tratamiento primario se encuentran expuestos a la atmósfera para reducir la concentración de aceite soluble por efecto de la presión, disminuir la temperatura y remover H_2S y CO_2 al permitirse la aireación del agua. Además, genera el asentamiento de los sólidos suspendidos e inicia el proceso de oxidación.

Es indispensable el uso de clarificante en estas unidades para la precipitación de sólidos, dependiendo del tamaño y la composición se usa uno u otro compuesto. En la industria petrolera el sulfato de aluminio es conocido como el mejor clarificante.

Algunos aspectos a tener en cuenta en este tipo de unidades:

- ❖ Es necesaria la disponibilidad de grandes extensiones de tierra.
- ❖ El ambiente puede influir en su desempeño. Existen elementos que pueden evaporarse o degradarse con el sol e influir positiva o negativamente dependiendo si la concentración del contaminante aumenta o disminuye. Además, la lluvia ayuda a la oxigenación.
- ❖ La separación por gravedad de grasas y aceites comúnmente no es óptima.

Cuando la oxigenación no es la adecuada se recomienda el uso de aireadores mecánicos y biofiltros.



PISCINAS DE OXIDACIÓN

La optimización de este tipo de unidades se lleva a cabo mediante aireadores, los cuales oxigenan el agua residual permitiendo la reproducción de microorganismos para la oxidación de materia orgánica, de tal forma que el material resultante poseerá mayor densidad y se depositará, esto implica que se presentará una disminución de la carga orgánica contaminante (DBO, DQO, aceite y fenoles, entre otros). Además, disminuye la temperatura del agua a verter. Útil cuando las concentraciones de materia orgánica son muy altas y la biodegradación no es óptima bajo condiciones normales.

3.7 TRATAMIENTO DE AGUAS DE INYECCIÓN

Generalmente, cuando la calidad del agua no cumple con los parámetros exigidos por la normatividad ambiental, es necesario inyectar el agua a una formación que sea compatible con ésta y con los fluidos que pueda contener. Por ello se hace indispensable el uso de unidades de filtración, las cuales proporcionan una alta remoción de aceite y sólidos. Aunque el sistema de inyección requiere de un estudio detallado de las características de formación receptora, propiedades del agua de inyección y otros elementos, en este texto se hará sólo énfasis en las unidades de filtración, brindando pautas para estudios posteriores de alternativas de disposición de aguas residuales.

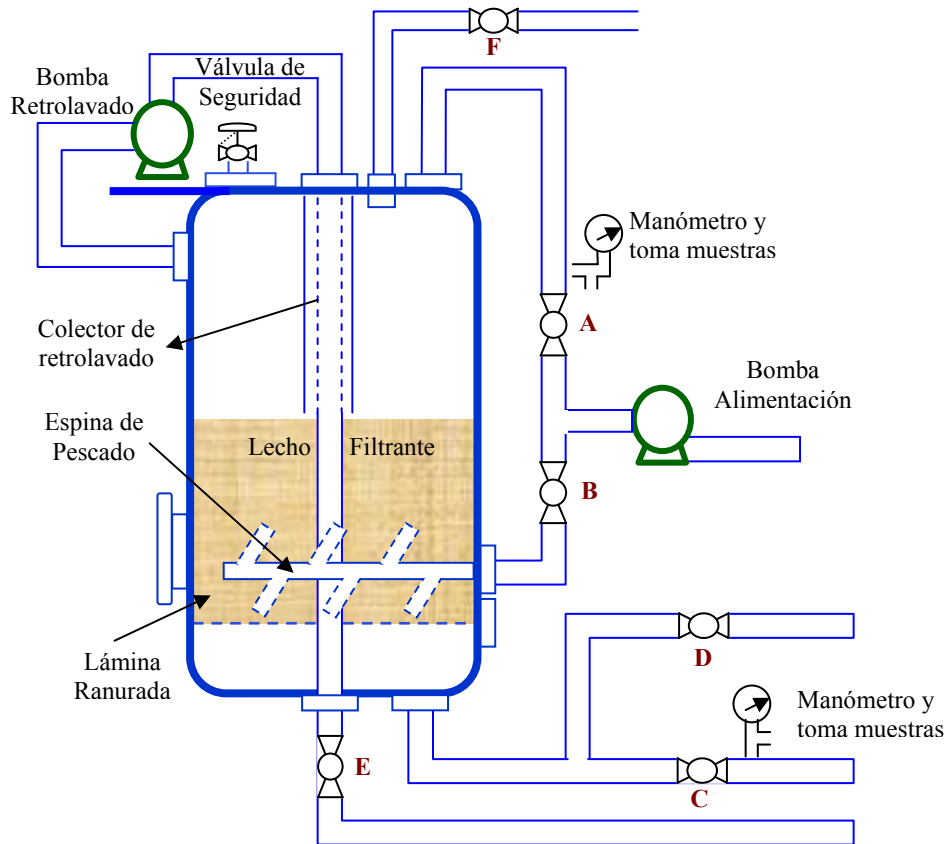
3.7.1 UNIDADES DE FILTRACIÓN

Son recipientes cerrados y a presión con dimensiones específicas, cuyo objetivo es disminuir la carga de aceites y sólidos contenidos en el agua, los cuales son indeseables o perjudiciales en operaciones de inyección ^[9].



La mayor parte de sólidos y aceites son removidos al hacer pasar el fluido a través del filtro. En los filtros convencionales se puede usar como lecho filtrante: arena, grava, antracita, carbón activado, cascarilla de nuez, entre otros.

Figura 26. Esquema de unidad de filtración



Tomado de New Gas and Oil Company

Entre las características más sobresalientes de estos equipos se pueden encontrar:

- 🌍 Alta remoción de aceites y sólidos suspendidos en agua.
- 🌍 Equipo diseñado con dimensiones específicas, de acuerdo a la necesidad de operación.
- 🌍 Fácil Instalación y mantenimiento, gracias a su presentación modular.

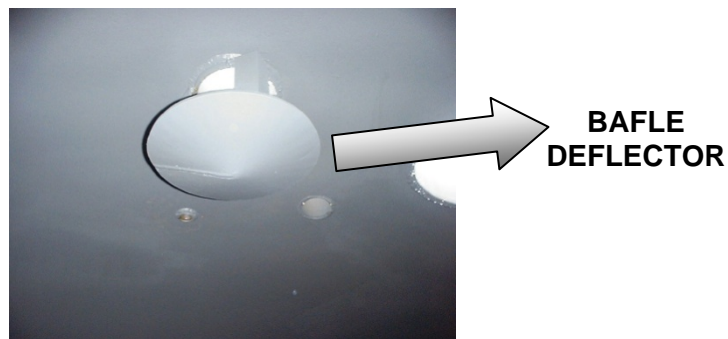


La remoción de material contaminante presente en el agua residual se lleva a cabo en cuatro etapas, las cuales son descritas a continuación:

➤ **FILTRACIÓN**

El fluido entra por la parte superior, es distribuido uniformemente por medio de una platina deflectora (ver fig. 27) y luego es conducido hacia el lecho filtrante ubicado en la parte inferior del equipo.

Figura 27. Bafle deflector en un filtro



Tomado de New Gas and Oil Company

Esta operación se lleva a cabo manteniendo abiertas las válvulas A, C y F, y cerradas las válvulas B, D y E, para hacer pasar el fluido a través del lecho filtrante, removiendo la mayor parte de los contaminantes presentes en el agua.

Para evitar la pérdida de material filtrante, se debe colocar una malla que soporta tanto el lecho como las diferencias de presión generadas dentro del equipo.

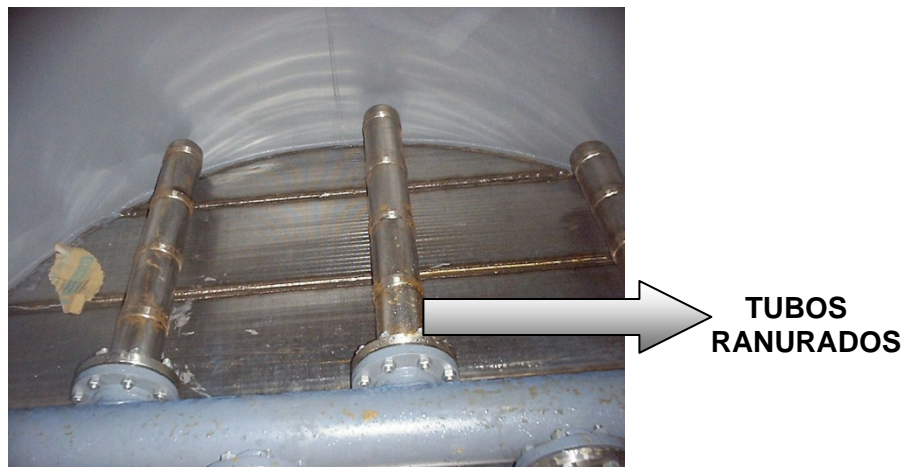


RETROLAVADO

El fluido ingresa por la parte inferior del equipo ayudado por una bomba de alimentación, donde asciende removiendo aceite y sólidos del lecho filtrante.

El agua ingresa a través de un conjunto de tubos ranurados, como se muestra en la figura, para garantizar la turbulencia del lecho filtrante en el volumen total del equipo, luego en la parte superior es succionada por una bomba de retrolavado, la cual dirige parte del caudal hacia un colector de retrolavado que conduce el agua residual a un decantador, mientras la otra corriente es recirculada.

Figura 28. Ubicación de tubos ranurados en forma de espina de pescado



Tomado de New Gas and Oil Company

En este ciclo se pone en funcionamiento la bomba de retrolavado y las válvulas E y B se abren. La bomba de retrolavado (ver fig.29) es puesta en marcha por un periodo de 2 minutos al inicio y dos minutos al final de la fase, para permitir el arrastre de aceite y sólidos del lecho.

Las válvulas A, C, D y F se encuentran cerradas. Dependiendo de la carga a la entrada del filtro se establece un tiempo de retención de 20 minutos generalmente.



Figura 29. Ubicación de una bomba de retrolavado en unidad de filtración



Tomado de New Gas and Oil Company

➤ **ASENTAMIENTO**

Durante este periodo todas las válvulas permanecerán cerradas para permitir que el lecho vuelva a la posición de filtración. El tiempo de depositación es aproximadamente 30 segundos.

➤ **NORMALIZACIÓN**

Esta etapa corresponde al lavado final del lecho filtrante, en la cual se remueve el material contaminante remante del lecho para ser depositados en la caja API y ser procesados por el mismo filtro. Las válvulas A y D, se encuentran abiertas, mientras las válvulas B, C, E y F permanecerán cerradas. Este período tiene una duración de 10 minutos.

✚ **CARACTERÍSTICAS DEL LECHO FILTRANTE**

Como material filtrante generalmente se utiliza la cáscara de nuez extraída del fruto de la palma africana (ver figura 30). Gracias a sus propiedades oleofílicas



(absorción y retención de aceite) permiten la remoción de hidrocarburo y sólidos de grandes volúmenes de aguas residuales producto de la industria petrolera. Pueden remover concentraciones de aceite y grasa desde 40 a 60 ppm hasta un valor aproximado de 3 ppm.

Los resultados obtenidos con la cáscara de nuez y el método de retrolavado utilizado, evitan la adición de productos químicos para facilitar la filtración.

Figura 30. Cascarilla de nuez de la palma africana



Tomado de New Gas and Oil Company

En Colombia se produce y distribuye material filtrante que proporciona una calidad similar al producido en el extranjero, disminuyendo el costo en un 50% y evitando alzas en los precios por efecto de la importación.

A continuación se presentan algunas de las propiedades físicas y químicas de la cáscara de nuez:



TABLA 9. Propiedades físicas y químicas de la cáscara de nuez

| Aspecto físico | Granulado tamizado de color café |
|----------------------------|----------------------------------|
| PH | 6.5 a 8.5 |
| Densidad | 0.7 – 0.8 g/ml |
| Humedad | 10.27% |
| Grasa | 0.86% |
| Coeficiente de uniformidad | Menor a 1.5 |
| Granulometría | |
| Malla | 8 -12 |
| Malla | 12-20 |
| Malla | 20-30 |
| Malla | 30-40 |

De la etapa de retrolavado los residuos deben ser enviados a un decantador (ver fig. 31) en donde es separada el agua libre de los sólidos y aceite por diferencia de gravedades específicas. Posteriormente los sedimentos son enviados a lechos de secado.

Figura 31. Piloto de reinyección de agua en la estación Suria de Ecopetrol S.A.



Tomado de New Gas and Oil S.A.



4. DIMENSIONAMIENTO DE EQUIPOS UTILIZADOS EN EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES

El Instituto Americano del Petróleo (API) ha establecido ciertos criterios del diseño para determinar las dimensiones críticas y las características físicas del separador. Éstos se presentan en una serie de cálculos paso a paso del diseño. Los cálculos del diseño requieren que ciertas características de las aguas residuales sean especificadas. En cuanto las propiedades del agua sean conocidas más a fondo, más confiable será el funcionamiento del separador.

4.1 OIL SKIMMER

Los siguientes parámetros son requeridos para el diseño:

- a. Flujo de diseño (Q_w), flujo máximo de aguas residuales que podría esperarse durante la vida productiva del yacimiento.
- b. Temperatura de las aguas residuales. Bajas temperaturas son usadas para la conservación del diseño del separador.
- c. Gravedad específica de las aguas residuales $(SG)_w$.
- d. Viscosidad absoluta (dinámica) de las aguas residuales μ_w . Si no se dispone de esta información se asume una viscosidad de 1 cp.
- e. Gravedad específica del aceite presente en las aguas residuales $(SG)_o$. Valores altos se utilizan para aumentar la diferencia de gravedades específicas y mejorar así el tratamiento.



f. Tamaño de partícula a remover $(d_m)_o$. El tamaño nominal es 150 μm , aunque otros valores se pueden usar. Además, es importante conocer la distribución del tamaño de la gota de aceite en el agua producida, antes de entrar al sistema de tratamiento.

4.1.1 Skimmer cilíndrico horizontal presurizado (al 50% de su capacidad)

♣ Ecuación de asentamiento

$$d * L_{\text{eff}} = 1000 \frac{Q_w \mu_w}{(\Delta SG)_{w/o} (d_m)_o^2}$$

Donde:

d: diámetro interno del recipiente (24, 48, 60, 72, 84, 96), pulgadas.

L_{eff} : longitud donde ocurre la separación, pies.

Q_w : máximo caudal de agua que se producirá en la vida activa del campo, BWPD.

μ_w : viscosidad del agua, cp.

$(\Delta SG)_{w/o}$: diferencia de gravedades específicas entre el agua y el aceite.

$(d_m)_o$: diámetro de partícula de aceite, micrones.

♣ Ecuación de tiempo de residencia

$$d^2 * L_{\text{eff}} = 1.4(t_r)(Q_w)$$

Donde:

(t_r) : tiempo de residencia en minutos.

Para escoger el diámetro interno y la Longitud efectiva del recipiente se grafican respectivamente los valores d Vs L_{eff} , tomando aquellos que satisfagan ambas



ecuaciones. Sin embargo, las dimensiones del equipo se definen en términos del diámetro interno del recipiente y la longitud total entre costuras, por lo tanto se debe tener en cuenta que la longitud efectiva es aproximadamente el 75% de la longitud entre costuras.

4.1.2 Skimmer cilíndrico vertical presurizado ó a presión atmosférica

♣ Ecuación de asentamiento

$$d^2 = 6691 \frac{(F)(Q_w)(\mu_w)}{(\Delta SG)_{w/o} (d_m)_o^2}$$

F: Factor de turbulencia y corto circuito, depende del diseño de entrada y salida de los colectores y baffles.

| Rango del diámetro | factor F |
|--------------------------|-----------------------------|
| $d \leq 48''$ | 1.0 |
| $48'' \leq d \leq 120''$ | 2.0 |
| $d \geq 120''$ | Se descarta por turbulencia |

♣ Ecuación de tiempo de residencia

$$H = 0.7 \frac{(t_{rw})(Q_w)}{(d)^2}$$

H: Altura de la pierna de agua, pies



La longitud del recipiente puede hallarse sumando tres pies a la altura de la columna de agua.

4.1.3 Tanque desnatador rectangular horizontal (CAJA API)

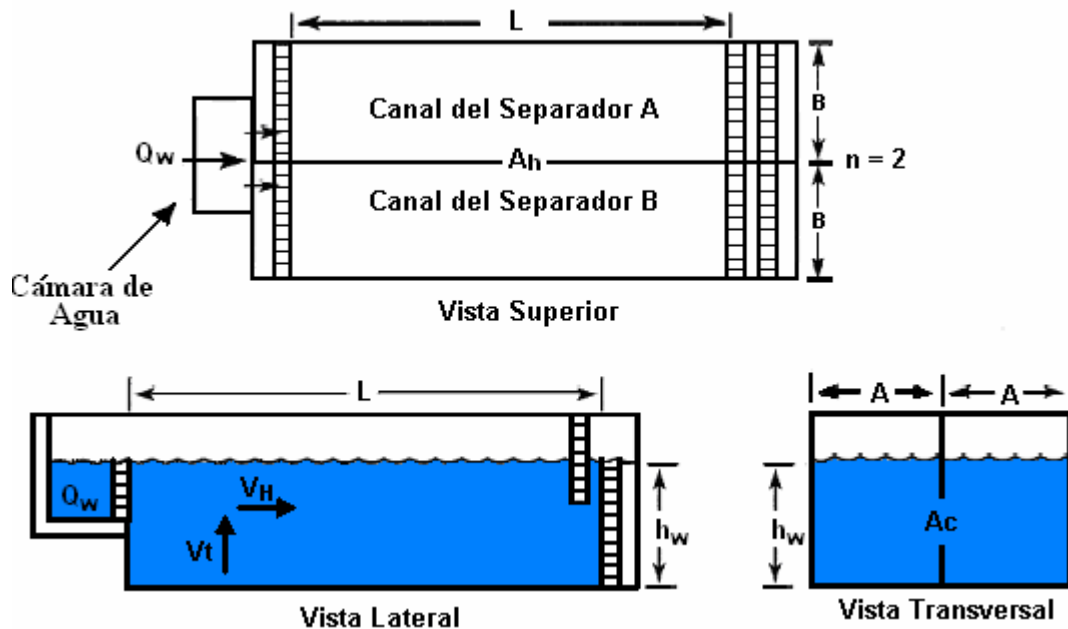
✍ El diseño de separadores agua/aceite convencionales está sujeto a los siguientes parámetros:

- a. La velocidad horizontal (V_H) a través del separador debe ser inferior o igual a 3 pies por minuto, o igual a 15 veces la velocidad de ascenso de las partículas de aceite (V_t).
- b. La altura de la columna de agua (h_w) en el separador no debe ser menor a 3 pies, para reducir al mínimo la turbulencia. En la práctica no es común exceder una profundidad de 8 pies de agua.
- c. La relación de la altura de la columna de agua al ancho del separador API está dado entre 0.3 a 0.5 comúnmente en la refinería.
- d. El ancho del separador generalmente se encuentra entre 6 y 20 pies.
- e. Se debe proporcionar un mínimo de dos canales en el separador, uno está disponible para el uso cuando llega a ser necesario la limpieza o reparación del otro equipo.



En la figura 32 se ilustra un separador agua/aceite y se representan las variables de diseño señaladas anteriormente.

Figura 32. Variables de diseño del separador agua/aceite



Adaptado de Monographs on Refinery Environmental Control, Management of Water Discharges. API Publication 421

Parámetros de diseño especificados en la norma API 421.

A: área de sección transversal de cada canal, ft^2 .

A_c : área de sección transversal del separador, ft^2 .

A_h : área total de la superficie del separador, ft^2 .

B: ancho del canal, ft.

h_w : altura de la columna de agua, ft.

L: longitud del canal, ft.

n: número total de compartimientos del separador.

Q_w : caudal de entrada, ft^3/min .

V_H : velocidad horizontal, ft/min.

V_t : velocidad de ascenso de las partículas de aceite, ft/min.



✍ Se deben tener en cuenta también las siguientes sugerencias para el diseño:

- a. La cantidad de freeboard (distancia vertical entre la línea de agua y la cubierta del recipiente).
- b. Una relación longitud-ancho (L/B) de por lo menos 5 se sugiere para proporcionar una distribución uniforme del flujo y para reducir al mínimo los efectos de la turbulencia a la entrada y la salida del canal del separador.

Para efectos del cálculo de las ecuaciones de asentamiento y tiempo de residencia el caudal de agua debe estar especificado en unidades de campo (BWPD), en las demás ecuaciones serán incluidos los valores con las unidades especificadas en la norma API.

♣ Ecuación de asentamiento

$$W * L_{\text{eff}} = \frac{70(Q_w)(\mu_w)}{(\Delta SG)_{w/o} (d_m)_o^2}$$

Donde:

W: Ancho del tanque, pies

L_{eff}: longitud donde ocurre la separación, pies.

La ecuación es independiente de la altura de la pierna de agua, donde su nivel es controlado para mantenerse a menos de la mitad del ancho, y así lograr una distribución de flujo uniforme.



- ♣ **Altura de la columna de agua**

$$h_w = 0.5W$$

- ♣ **Ecuación de tiempo de residencia**

$$W^2 * L_{\text{eff}} = 0.008 (t_r) (Q_w)$$

Para la selección del mejor diseño, se gráfica el ancho versus la longitud efectiva, donde cualquier solución que satisfaga ambas ecuaciones puede ser usada, pero que el ingeniero debe escoger acorde con las características del caudal y el fluido que se está tratando.

Para un diseño más detallado del equipo, se tienen en cuenta parámetros especificados en normas API, en el orden que se presenta a continuación.

- ♣ **Velocidad horizontal (V_H)**

Se han establecido estas dos condiciones basados en experiencia de operación con separadores agua/aceite

$$V_H = 15V_t \leq 3$$

El límite superior recomendado para separadores convencionales agua/aceite en refinería es 3 pies por minuto, aunque algunos separadores pueden funcionar a velocidades más altas. La mayoría de las refinerías operan a velocidades horizontales mucho menores a 3 pies por minuto.



- ♣ Mínima sección de área transversal de flujo (A_c)

La mínima área transversal de flujo (A_c) puede ser determinada de la relación de caudal máximo de diseño (Q_w) respecto al valor de la velocidad horizontal (V_H),

$$A_c = \frac{Q_w}{V_H}$$

- ♣ Número de canales requeridos para el separador (n)

Se debe escoger el mínimo número de canales para el separador. No obstante, se recomienda un mínimo de dos canales para evitar el cierre del separador al realizarse mantenimiento. Para reducir al mínimo el número de canales, el área de sección transversal se debe maximizar de acuerdo con las condiciones del diseño fijadas anteriormente. Generalmente, las dimensiones máximas recomendadas de la sección transversal para un canal simple son; 20 pies de ancho y 8 pies de profundidad, sobre esta base, el número de canales (n) requerido se calcula, como sigue:

$$n = \frac{A_c}{160}$$

- ♣ Ancho y profundidad del canal

Si el ancho del canal (B) se encuentra entre 6 y 20 pies se debe substituir en la siguiente ecuación:

$$h_w = \frac{A_c}{B * n}$$



La profundidad del canal debe estar en el rango de 3 a 8 pies y la relación profundidad/ancho entre 0.3-0.5. En caso de no cumplir cualquiera de estos criterios, se debe escoger diversos valores para el ancho del separador, hasta que se obtenga una profundidad que cumpla con estos criterios.

♣ Longitud del separador

La longitud de canal (L), se encuentra al usar la siguiente ecuación:

$$L = F \left(\frac{V_H}{V_t} \right) h_w$$

La longitud del separador debe ser por lo menos cinco veces su ancho, para reducir al mínimo la turbulencia en las zonas de entrada y salida.

♣ Velocidad de ascenso

La ecuación para la tasa de carga en superficie se representa como sigue:

$$V_t = \frac{Q_w}{A_H}$$

♣ Otras relaciones geométricas para la superficie y el área de sección transversal del separador se presentan a continuación:

$$A_h = L * B * n$$

$$A_c = h_w * B * n$$



♣ Mínima área horizontal

En un separador ideal, cualquier partícula que tenga una tasa de ascenso mayor o igual a la profundidad del agua dividida por el tiempo de retención alcanzará la superficie, siempre que ésta inicie desde el fondo del compartimiento. Cuando la tasa de ascenso sea igual al flujo del líquido, esta relación es expresada como sigue:

$$V_t = \frac{(h_w)_i}{t_r} = \frac{(h_w)_i}{\frac{L_i B_i (h_w)_i}{Q_w}} = \frac{Q_w}{L_i B_i} = V_o$$

$(h_w)_i$: altura de la columna de agua en un separador ideal, ft.

L_i : Longitud para un canal ideal, ft.

B_i : ancho del canal ideal, ft.

Q_w : caudal de entrada, ft³ /min.

V_o : velocidad del líquido, ft/min.

V_t : velocidad de ascenso de las partículas de aceite, ft/min.

El área superficial para un separador ideal no depende de la profundidad del canal.

♣ La mínima área horizontal (A_h) es hallada de la siguiente forma:

$$A_h = F \left(\frac{Q_w}{V_t} \right)$$



4.2 PLATINAS COALESCEDORAS

Generalmente los parámetros usados para el diseño de separadores convencionales son también usados para el dimensionamiento de los sistemas de placas paralelas.

Es necesario optimizar el funcionamiento de un separador cuando:

- La concentración de aceite a la salida del Oil Skimmer es mayor que la requerida, al presentarse variaciones en las propiedades del fluido.
- Existe un diseño inadecuado del separador agua/aceite.

Existen varias formas para mejorar el funcionamiento del separador. Sin embargo, antes de tomar cualquier decisión para modificar la unidad, se debe realizar una identificación de las averías en el proceso. Para ello se debe verificar que el separador cumpla con los criterios API bajo las condiciones actuales de funcionamiento, entre las cuales se deben tener en cuenta:

- Gravedad específica del aceite (tomando como referencia el aceite de mayor densidad presente en el agua).
- Dimensionamiento del equipo (longitud, ancho y profundidad) y la carga de aceite (libre, emulsionado y disuelto).
- Temperatura del fluido (generalmente es medida cuando el rendimiento del equipo es bajo).
- Flujo de diseño.



Con estas características es posible verificar los demás parámetros, para el diseño de separadores agua/aceite presentados en la sección anterior.

La mayoría de las configuraciones de placas paralelas se basa en los estándares de diseño, como el cálculo del área superficial y el número de paquetes de placas requeridos teóricamente. A continuación, se presentan los rangos típicos para algunos de estos parámetros.

Tabla 10. Rangos típicos para las variables básicas del diseño en la separación de platos paralelos

| Variable | Rango |
|--|--|
| Distancia perpendicular entre platos | 0.65 – 1.5 pulgadas |
| Angulo de inclinación del plato horizontal | 45° - 60° |
| Tipo de aceite removido | Aceite libre |
| Dirección de flujo de agua residual | Transversal o paralelo al eje de las corrugaciones |

Adaptado de Monographs on Refinery Environmental Control, Management of water Discharges. API Publication 421

Dimensionamiento de platinas coalescedoras

✚ Ecuación general CPI y PPI (para flujo transversal y paralelo)

$$H * W * L = 4.8 \frac{(Q_w)(h)(\mu_w)}{\cos\phi(\Delta SG)_{w/o} (d_m)_o^2}$$



Donde:

HW: alto y ancho de la sección de platinas, perpendicular al eje de flujo, ft.

L: longitud de la sección de platinas paralelo al eje de flujo, ft.

Q_w : caudal de agua a tratar, bbl/d.

h: distancia perpendicular entre platinas, in.

μ_w : viscosidad del agua, cp.

φ : ángulo de inclinación de las platinas respecto a la horizontal.

$(\Delta SG)_{w/o}$: diferencia de gravedades específicas.

$(d_m)_o$: diámetro de partícula de aceite, micrones.

✚ Mínima área transversal HW

$$H * W = 6.9 * 10^{-4} (Q_w)(h)$$

4.2.1 Interceptor de placas corrugadas

Dimensiones estándar de los paquetes de platinas:

$$H = 3.25 \text{ ft}$$

$$h = 0.69 \text{ in}$$

$$W = 3.25 \text{ ft}$$

$$\varphi = 45^\circ$$

$$L = 5.75 \text{ ft}$$

📖 El número de paquetes a ser instalados dentro del CPI es calculado como:

$$\text{Número de paquetes de platinas (ángulo de } 45^\circ) = 0.077 \frac{(Q_w)(\mu_w)}{(\Delta SG)_{w/o} (d_m)_o^2}$$

Cada paquete maneja un flujo máximo de 20000 BWPD.



■ Variación en la inclinación del paquete de platinas

Se ha observado en la práctica, que el aumentar el ángulo de inclinación a 60° evita el taponamiento por sólidos, lo cual requiere un incremento del 40% en el número de paquetes.

$$\text{Número de paquetes de platinas (ángulo de } 60^\circ) = 0.11 \frac{(Q_w)(\mu_w)}{(\Delta SG)_{w/o} (d_m)_o^2}$$

4.2.2 Separadores de flujo transversal

Las ecuaciones generales son iguales a las utilizadas para CPI y PPI, sólo varía el factor que acompaña las ecuaciones dado que en este tipo de separadores se requiere el uso de distribuidores de flujo a la entrada y a la salida, aumentando la eficiencia y reduciendo la longitud en 75%. Por lo tanto, las ecuaciones se presentan de la siguiente manera:

■ Ecuación general

$$H * W * L = 6.4 \frac{(Q_w)(h)(\mu_w)}{\cos\phi (\Delta SG)_{w/o} (d_m)_o^2}$$

■ El número de paquetes a ser instalados dentro del separador de flujo transversal (CFD), es calculado como:

$$\text{Número de paquetes de platinas (ángulo de } 45^\circ) = 0.103 \frac{(Q_w)(\mu_w)}{(\Delta SG)_{w/o} (d_m)_o^2}$$



■ Variación en la inclinación del paquete de platinas

$$\text{Número de paquetes de platinas (ángulo de } 60^\circ) = 0.146 \frac{(Q_w)(\mu_w)}{(\Delta SG)_{w/o} (d_m)_o^2}$$

4.3 PAQUETES DE TUBERÍA EN SERPENTÍN (S.P. PACKS)

La eficiencia en cada etapa de los paquetes de tubería en serpentín, está dada por la siguiente ecuación:

$$E = \frac{C_i - C_o}{C_i}$$

En donde:

C_i : Concentración de aceite a la entrada

C_o : Concentración de aceite a la salida

La distribución del diámetro de partícula puede ser asumida como una línea recta, por lo tanto, la eficiencia de cada uno de los paquetes se puede expresar de la siguiente manera:

$$E = 1 - \frac{(d_m)_o}{d_{\max}}$$

Donde:

$(d_m)_o$: diámetro de la gota de aceite a tratar en cada una de las etapas.

d_{\max} : diámetro máximo de la gota de aceite. Para mayor facilidad, se puede asumir que el diámetro máximo generado por el paquete de tubería en serpentín es de 1000 μm .



La eficiencia total del sistema del paquete de tubería en serpentín es dependiente del número de etapas, y está dada por la siguiente relación ^[6]:

$$E_t = 1.0 - (1.0 - E)^n$$

Donde:

E_t : eficiencia total del sistema implementando varias etapas.

E : eficiencia de cada una de las etapas.

n : número de etapas.

4.4 UNIDADES DE FLOTACIÓN

Para el dimensionamiento de estos equipos de tratamiento secundario, el diseño debe basarse en los valores máximos de cada uno de los parámetros para evitar problemas operacionales en caso de presentarse un aumento significativo en la producción de agua.

4.4.1 UNIDADES DE FLOTACIÓN TIPO GAS DISUELTO

Para el diseño de este tipo de unidades el ingeniero debe considerar los siguientes criterios de operación, los cuales ya se encuentran establecidos y son proporcionados al fabricante para la consecución del equipo.

Tabla 11. Parámetros para el diseño

| Parámetro | Rango | | Unidades |
|------------------|--------|--------|--------------------------|
| | Mínimo | Máximo | |
| Agua recirculada | 20% | 50% | Del agua tratada |
| Gas a inyectar | 0.2 | 0.5 | scf/bbl de agua a tratar |



| | | | |
|------------------------------|----|----|----------------------|
| Agua tratada + recirculada | 2 | 4 | gpm/pie ² |
| Tiempo de residencia | 10 | 40 | minutos |
| Altura de la columna de agua | 6 | 9 | pies |
| Presión de operación | 20 | 40 | psig |

Tomado de Kenn Arnold, Surface Production Operations, Volumen 1

4.4.2 UNIDADES DE FLOTACIÓN TIPO GAS DISPERSO

Matemáticamente puede ser demostrado que para obtener una mayor eficiencia en el diseño se debe cumplir que exista una alta tasa de inducción de gas, diámetros de partículas de gas pequeños y una zona de mezcla relativamente grande.

Basados en experiencia de campo, se ha observado que estas unidades tienden a remover una cantidad constante de aceite. Un tiempo de residencia de 1 minuto en cada celda permite que las burbujas de gas se rompan, se dispersen y asciendan hasta formar una capa de aceite en superficie.

Cada fabricante proporciona dimensiones estándar y establece el caudal máximo de operación basado en su criterio.

Generalmente, se asume una eficiencia del 90% como criterio de diseño de la unidad y una remoción del 50% en cada celda.

$$E_t = 1.0 - (1.0 - E)^n$$

Donde:

E_t : eficiencia total del sistema implementando varias etapas.

E : eficiencia de cada una de las celdas.



n: número de celdas.

La eficiencia real de la unidad dependerá de muchos factores que no puedan ser controlados o predichos en laboratorio o pruebas en práctica.

Existen diferentes clases de unidades de gas disperso dependiendo del fabricante. En general, para el diseño se debe tener en cuenta:

- Sección de inducción de burbujas.
- Sección de mezcla (zona de saturación de gas).
- Sección de separación. Donde ocurre el fenómeno de flotación que permite el arrastre hasta superficie de las gotas de aceite.
- Sección de recolección.

La mayoría de las unidades tipo gas disperso son diseñados con tres o cuatro celdas, donde el flujo de agua se traslada en serie de un compartimiento a otro por la parte inferior de los tabiques divisorios. Durante este trayecto, la turbulencia genera el efecto de flujo tapón, proporcionando el tiempo de residencia adecuado para evitar el fenómeno de corto circuito.

Experimentalmente se ha observado que a mayor salinidad se obtiene un menor tamaño de burbuja. Para valores inferiores al 3% el tamaño de burbuja depende de la concentración de sal. Valores superiores al 3% hacen que el tamaño de burbuja se mantenga constante, y la recuperación de aceite sea aún mayor.

Para mejorar el enlace entre las burbujas de gas y las partículas de aceite se utilizan productos químicos como los polielectrolitos. Estos productos químicos ayudan a la flotación y cohesión entre las burbujas y los sólidos, ocasionando así, una mayor remoción de sólidos presentes en el agua residual.







La remoción de aceite depende, en cierta medida, del diámetro de partícula de aceite dado que, para valores entre 2 y 5 μm la flotación influye muy poco. En este tipo de unidades, como la remoción de aceite es casi independiente del diámetro de partícula, la disminución del diámetro generado por las caídas de presión en válvulas y líneas, no debe ser tenida en cuenta para efectos de diseño. Tamaños de partícula entre 10 y 20 μm no afectan la remoción de crudo, por ello, no es necesario instalar elementos de optimización para la coalescencia de las gotas.

Generalmente, el volumen de aceite removido puede ser desde un 2% hasta un 5% del volumen total de fluido presente en la unidad, llegando hasta un valor de 10% en casos excepcionales.

4.5 PISCINAS PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS

El dimensionamiento de las piscinas de sedimentación y oxidación es básicamente el mismo, dado que, como se vió anteriormente, la diferencia radica simplemente en el fenómeno que predomine en éstas.

PARÁMETROS PARA EL DIMENSIONAMIENTO

-  Tiempo de residencia mayor a 48 horas.
 -  Profundidad entre 1.0 y 2.0 m.
 -  La estructura debe estar ligeramente inclinada hacia adentro y hacia afuera.
 -  El largo es aproximadamente dos veces el ancho.
-

Se deben tener en cuenta las siguientes recomendaciones al momento de realizar el diseño.



- Para una mayor eficiencia de la unidad se debe contar con una mayor área de exposición. Sin embargo, la piscina no debe ser tan grande porque se puede generar el crecimiento de algas que consuman oxígeno y producir malos olores en los alrededores, ni tan pequeña porque requerirá de un mantenimiento continuo debido a que la acumulación de sólidos en el fondo provoca una reducción en el volumen de la piscina.
- Optimizar la aireación de la piscina mediante aspersores, torres de enfriamiento o sistemas de atomización.
- Uso de bandas desnatadoras para la remoción de grasas y aceites.
- Desarrollar cultivos de bacterias para permitir una eficiente oxigenación y descomposición de materia orgánica.

La inclinación de las piscinas será determinada por el ingeniero civil encargado de la construcción, dependiendo de las características del suelo y de las dimensiones proporcionadas, tomando como referencia el tiempo de residencia y el caudal de agua a tratar. Esto se realiza con el fin de evitar el derrumbe de las paredes generado por diferencias de presión.

Figura 33. Piscinas para el tratamiento de aguas residuales



Estación Barquereña



5. OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO

En los capítulos anteriores se muestran los parámetros que influyen en el rendimiento del equipo. A continuación, se presenta una guía para la operación y mantenimiento de cada uno de los equipos, teniendo como fin alargar la vida útil del separador y por consiguiente, la mejora en el tratamiento a través de los años.

5.1 OIL SKIMMER

5.1.1 PROCEDIMIENTOS DE RUTINA

✚ El control de nivel (LC) se puede realizar de dos formas

- ♣ Utilizando un regulador de nivel que se acciona automáticamente cuando el aceite llega al nivel de capacidad para el cual fue diseñado el separador. Este regulador opera por medio de un desplazador ó en su defecto, un transmisor de presión diferencial neumática.
- ♣ Regulando el nivel de líquido por medio de una pierna de agua, para evitar que el tanque se vacíe, teniendo como principio fundamental el de una columna hidrostática. Para obtener el nivel adecuado de agua en el tanque, se instala un colector en la parte superior de la pierna de agua.

Para evitar fluctuaciones en la interface, la velocidad de descarga debe ser baja.



✚ Para evitar la corrosión en el equipo, se debe impedir la entrada de oxígeno al sistema usando un sistema de cobertura de gas, el cual comprende:

♣ Válvula de alivio de presión (PRV)

Cuando la presión del sistema aumenta a más de 8 onzas de presión se abre esta válvula liberando gas.

♣ Válvula de presión y vacío

En caso tal, que la presión se encuentre por encima de 9 onzas y la PRV sea incapaz de despresurizar el sistema, se abre esta válvula. Además, esta válvula evita el colapso del equipo al presentarse presiones de vacío (aproximadamente -2 pulgadas de agua), igualando la presión del equipo con la presión atmosférica.

♣ Válvula de control de presión (PCV)

Mantiene el sistema de cobertura de gas en 7 onzas, al disminuir la presión en el equipo, se permite la entrada de gas para contrarrestar la caída de presión generada.

✚ Paneles de seguridad

En éstos se indican niveles de fluido alto y bajo en el sistema.

♣ Swiche de nivel alto (LSH)

Permite la apertura de una o dos válvulas cuando el nivel del fluido asciende por encima de la capacidad especificada en el diseño, permitiendo



la salida de agua hacia otro elemento de optimización como la caja API. Una vez normalizado el nivel de fluido, la válvula se cierra y el equipo continúa operando a condiciones de diseño.

Generalmente una condición de nivel alto, se presenta cuando:

- Se presentan grandes baches de fluido.
- El equipo al cual va a entrar el agua de descarga se apagó y las válvulas de entrada y/o salidas del mismo están cerradas, o en su defecto, las válvulas de salida del equipo anterior quedaron abiertas.
- Las válvulas de control de nivel están cerradas o no están operando correctamente.
- No existe la suficiente capacidad de evacuación de las bombas centrífugas, ya sea por daños o que no esté en funcionamiento.

♣ Swiche de bajo nivel (LSL)

Cuando el nivel del fluido desciende, impide la salida de agua del equipo apagando las bombas de evacuación.

Generalmente una condición de bajo nivel, se presenta cuando:

- Las válvulas de entrada y/o salidas del equipo al cual entra el agua de descarga quedaron abiertas, o en su defecto, las válvulas de salida del equipo anterior quedaron cerradas.



5.1.2 MANTENIMIENTO

La toma de muestra se puede realizar a la salida de cada uno de los equipos, dado que la demanda de tiempo y dinero para este tipo de pruebas es relativamente baja.

Para detectar fallas, reemplazar o inspeccionar el equipo se deben llevar a cabo los siguiente pasos.

- Permita la entrada de agua hasta que el nivel alcance el colector y se remueva todo el aceite
- Abra las válvulas de salida y cierre la entrada de agua al equipo.
- Las válvulas de control de nivel deben ser operadas manualmente y permanecer abiertas, ya que no se accionan de forma automática.
- Cierre las válvulas de salida del equipo al quedar totalmente desocupado.
- Suspenda el sistema de cobertura de gas en el equipo.
- Despresurice el equipo.
- Proceda a destapar el equipo por el manhole.
- Permita la aireación del equipo.

Ya realizado el mantenimiento se procede a poner en funcionamiento nuevamente el equipo.

- Cierre los manhole, aplique grasa a empaques y tornillos. Ajuste los tornillos de los manhole en cruz para asegurar un sello hermético.
- Cierre las válvulas de despresurización del equipo.
- Habilite nuevamente el sistema de cobertura de gas.
- Abra la entrada de fluido al sistema y cierre las válvulas de drenaje.
- Abra las válvulas de salida de agua del equipo.



- Ajuste el nivel de la interface en el recipiente.

5.2 OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO DEL SISTEMA DE PLATINAS COALESCEDORAS

El flujo a través de una unidad de placas paralelas, puede ser dos a tres veces el de un separador convencional equivalente. Según fabricantes, el espaciamiento requerido de puede ser reducido hasta dos veces en ancho y diez veces en longitud cuando la unidad de placas paralelas es usada en lugar del convencional. Además de incrementar el área superficial, la presencia de platos paralelos puede disminuir la tendencia a presentarse un corto circuito y reducir la turbulencia en el separador, así aumentar la eficiencia. Para mejorar la recolección de aceite y de arena, las placas son generalmente corrugadas.

El aceite recolectado en el sistema de platos paralelos es mayor que el removido en separadores convencionales, y el contenido de aceite total en el efluente puede llegar a ser hasta 60 por ciento más bajo para los sistemas de platos paralelos, con una proporción más alta de pequeñas gotas de aceite removidas.

En un estudio realizado por API a cinco unidades de placas paralelas con concentraciones de aceite a la entrada entre 25 y 13.000 mg/l (un promedio de 3665 mg/l), se obtuvo concentraciones de salida entre 15 y 200 mg/l (un promedio de 79 mg/l). Los aceites separados por esas unidades presentaban una gravedad específica promedio de 32 °API, con un rango entre 15 y 56 °API, en un rango de temperaturas entre 70 y 190 °F ^[7].

Se ha demostrado experimentalmente que un sistema optimizado por placas paralelas puede tratar concentraciones de aceite o grasa alrededor de 50 mg/l. La alteración de este límite puede ser causado por:



- ✦ Aceite emulsionado o disuelto presente en las aguas residuales

- ✦ El mal funcionamiento del separador resultado de la desviación del diseño.
Las olas de flujo también pueden disminuir la eficiencia de los separadores de placas paralelas, elevar los sólidos y taponar los platos.

- ✍ Aspectos a tener en cuenta:
 - ✦ si la inclinación o espaciado entre placa y placa es muy bajo, se puede presentar taponamiento en los equipos.

 - ✦ La arena debe ser recogida a la entrada de la placa para reducir el flujo en el fondo del recipiente.

 - ✦ Los sólidos acumulados pueden ser removidos, limpiando el paquete de placas con un chorro de agua o aire, o mediante limpieza mecánica.

 - ✦ Para evitar el taponamiento debe tenerse en cuenta la acumulación de sólidos en el diseño inicial del equipo. Además, realizar periódicamente mantenimiento del equipo.

 - ✦ Si el agua residual presenta alto contenido de sólidos, el ángulo de inclinación debe ser 60° respecto a la horizontal, lo cual excede el ángulo de reposo de los sólidos presente en las aguas residuales.



5.3 OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO DE UNIDADES DE FLOTACIÓN

5.3.1 OPERACIÓN DE UNIDADES DE FLOTACIÓN

Dentro de cada una de las celdas activas el nivel de líquido (NNL) se mantiene mediante un colector de aceite que puede ajustarse a una altura determinada, y proporcionar un mayor o menor tiempo de residencia al fluido. El nivel de líquido debe ajustarse a 18" por encima del centro de la unidad ó a una altura cerca del 75% del diámetro de la unidad. Se debe colocar a la entrada de la primera celda del equipo una platina desviadora para evitar el flujo turbulento.

De la parte superior de la unidad de flotación tipo gas disperso el rotor mecánico toma el gas y con su movimiento rotacional genera un remolino para facilitar la inyección del gas en el fluido a tratar, con el objeto de ocasionar el fenómeno de flotación y remover la nata de aceite formada en la superficie por medio de colectores auto-ajustables. Finalmente, el agua limpia se extrae en el último compartimiento del dispositivo.

El colector de aceite está localizado entre el baffle de rebose y un baffle ubicado en el fondo del equipo. Los vertederos son auto-ajustables para tener un control adecuado del nivel de fluido. En algunos dispositivos, las bandejas desnatadoras son ajustadas a una altura determinada, añadiendo ó retirando pesas de acuerdo a los requerimientos de desnatado. La tasa de aceite desnatado es controlada por medio de la apertura o cierre de válvulas ubicadas en la tubería de descarga de aceite para cada compartimiento.

Para evitar la descarga de gas con el agua residual, se encuentra instalada al final de la unidad una celda de desgasificación separada de las celdas activas por un arreglo de baffles ubicados en la parte superior y en el fondo.



Para asegurar que sólo el agua limpia sea descargada de la unidad, en la celda de desgasificación el flujo se dirige desde el fondo a través de un codo permitiendo al aceite ser arrastrado por las burbujas de gas.

Al disminuir el flujo de entrada a la unidad se incrementa el tiempo de residencia. Sin embargo, la eficiencia de la unidad se ve afectada al someter al equipo a flujos mayores que el especificado en el diseño.

5.3.2 MANTENIMIENTO DE UNIDADES DE FLOTACIÓN

Básicamente, el mantenimiento de este tipo de unidades consiste en la remoción de los sólidos y la nata de aceite generados en el proceso. Sin embargo, se deben llevar a cabo unas inspecciones periódicas por parte del operador, para detectar anomalías en el equipo ó asegurar que:

- ↗ El mecanismo de inducción de burbujas esté funcionando adecuadamente.
- ↗ El nivel sea el deseado en cada una de las celdas de la unidad.
- ↗ El equipo se mantiene a la presión especificada de diseño, mediante el sistema de cobertura de gas.
- ↗ La calidad del efluente sea la requerida.








Figura 34. Unidades de flotación tipo gas disuelto



<http://environment.madeinholland.jp/>



Teniendo en cuenta la configuración existente de la unidad de flotación, es posible determinar las fallas en el equipo. Entre las más comunes podemos encontrar:

-  El motor o el rotor en la unidad de flotación no giran.
-  Insuficiente o nula generación de burbujas en la turbina.
-  El nivel de agua no es el adecuado en cada una de las celdas.
-  El nivel de los desnatadores no es óptimo para la recolección de aceite.
-  Fugas de gas en los accesos y/o válvula de alivio.
-  La presión requerida en la unidad no se mantiene.
-  Baja calidad del agua en el efluente.

Al detectar alguna de estas fallas, el ingeniero a cargo de la unidad será el encargado de reportar, supervisar y dado el caso, arreglar el daño en el menor tiempo posible.

5.4 OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO DE PISCINAS PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES

En estos elementos no se requiere un detallado procedimiento a seguir para la operación y mantenimiento, dado que las características no poseen un alto grado de complejidad. Aspectos a tener en cuenta:

- Las paredes y el fondo de la piscina deben estar impermeabilizadas (concreto, tela asfáltica, icopor, brea, entre otros) para evitar filtraciones del fluido a zonas vecinas o viceversa.
- Remover periódicamente el aceite para evitar el rebose de la capa de aceite.
- Remoción continua de sólidos depositados en el fondo de la piscina.
- Controlar el crecimiento de algas que consuman oxígeno.



6. GUÍA ESTÁNDAR PARA EL DISEÑO DE UN SISTEMA DE TRATAMIENTO

La industria de los hidrocarburos ha visto la necesidad de implementar métodos estándar para el examen de aguas producidas por la creciente presión que ha generado a nivel mundial el impacto ambiental, reflejándose en medidas restrictivas impuestas en países como Estados Unidos, en los cuales no se permite la descarga de agua en superficie.

Como primera medida para el diseño, la corriente de agua a la salida del sistema de tratamiento de aceite debe ser caracterizada para determinar la concentración y el diámetro de partícula de aceite, además el contenido de sólidos presentes en el agua, para la selección del equipo adecuado.

6.1 PARÁMETROS REQUERIDOS PARA EL DISEÑO

Para un adecuado diseño, es necesario disponer de ciertas características de producción ^[8], las cuales se presentan a continuación:

- ✍ Flujo de diseño (Q_w), flujo máximo de aguas residuales que podría esperarse durante la vida productiva del yacimiento (BWPD).
- ✍ Calidad del fluido a verter (ppm). Según el decreto 1594/1984 la remoción de aceite debe ser mayor o igual al 80% de la carga. Por esto, dependiendo del caudal promedio del vertimiento se conocerá la concentración máxima permisible de aceite en la descarga. Aunque generalmente, las EMAR (Entidad Encargada del Manejo y Administración del Recurso) y el Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, pueden exigir valores más restrictivos.



- ✍ Concentración de aceite soluble (mg/l). Se debe tener en cuenta que la máxima concentración de aceite requerida a la salida del sistema equivale a la concentración de aceite libre menos la concentración de aceite disuelto (soluble).

- ✍ Concentración de aceite a tratar (ppm). Se puede determinar de muestras obtenidas en campo o de pruebas en laboratorio. En caso de no disponer de la concentración del aceite a la entrada del sistema de tratamiento, se puede asumir un valor desde 1000 hasta 2000 mg/l.

- ✍ Aguas lluvia y de lavado, generadas en las instalaciones (BWPD).

- ✍ Temperatura de las aguas residuales ($^{\circ}\text{F}$). Es recomendable que la temperatura de vertimiento sea igual a la temperatura ambiente para no generar perturbaciones en la flora y la fauna. En caso tal, que la temperatura sea mayor que la temperatura del medio, se recomienda el uso de aireadores en las piscinas.

- ✍ Gravedad específica de las aguas residuales $(\text{SG})_w$. Si este dato no se encuentra disponible, es posible asumir un valor estándar de 1.07

- ✍ Viscosidad absoluta (dinámica) de las aguas residuales μ_w (cp). Si no se dispone de esta información se asume una viscosidad de 1 cp.

- ✍ Gravedad específica del aceite presente en las aguas residuales $(\text{SG})_o$. Valores bajos aumentan la diferencia de gravedades específicas y hacen más fácil y eficiente el tratamiento.



✍ Diámetro máximo de partícula de aceite a remover. Este valor puede ser calculado mediante la ecuación de Hinze. Es importante conocer la distribución del tamaño de la gota de aceite en el agua producida, antes de entrar al sistema de tratamiento. Si no es conocido dicho valor, un rango aceptable está definido entre 250 y 500 μm .

6.2 PROCEDIMIENTO PARA LA SELECCIÓN DE SISTEMAS DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES

Es necesario implementar una metodología estándar para reducir tiempo, costos y evitar el sobredimensionamiento de equipos ó el diseño de elementos innecesarios utilizados para cumplir con las normas ambientales de vertimiento.

En general, todo sistema de tratamiento de aguas residuales deberá contener inicialmente un Oil Skimmer, el cual será diseñado de acuerdo a la disposición final del agua tratada. Puede considerarse el uso de hidrociclones en caso tal que el contenido de aceite y/o sólidos sea muy alto.

La posibilidad de que se presente arrastre de gas es baja debido al paso del fluido a través de válvulas, tanques y separadores, los cuales remueven casi la totalidad del gas producido, a menos que el agua provenga de un separador trifásico que opere a bajas presiones.

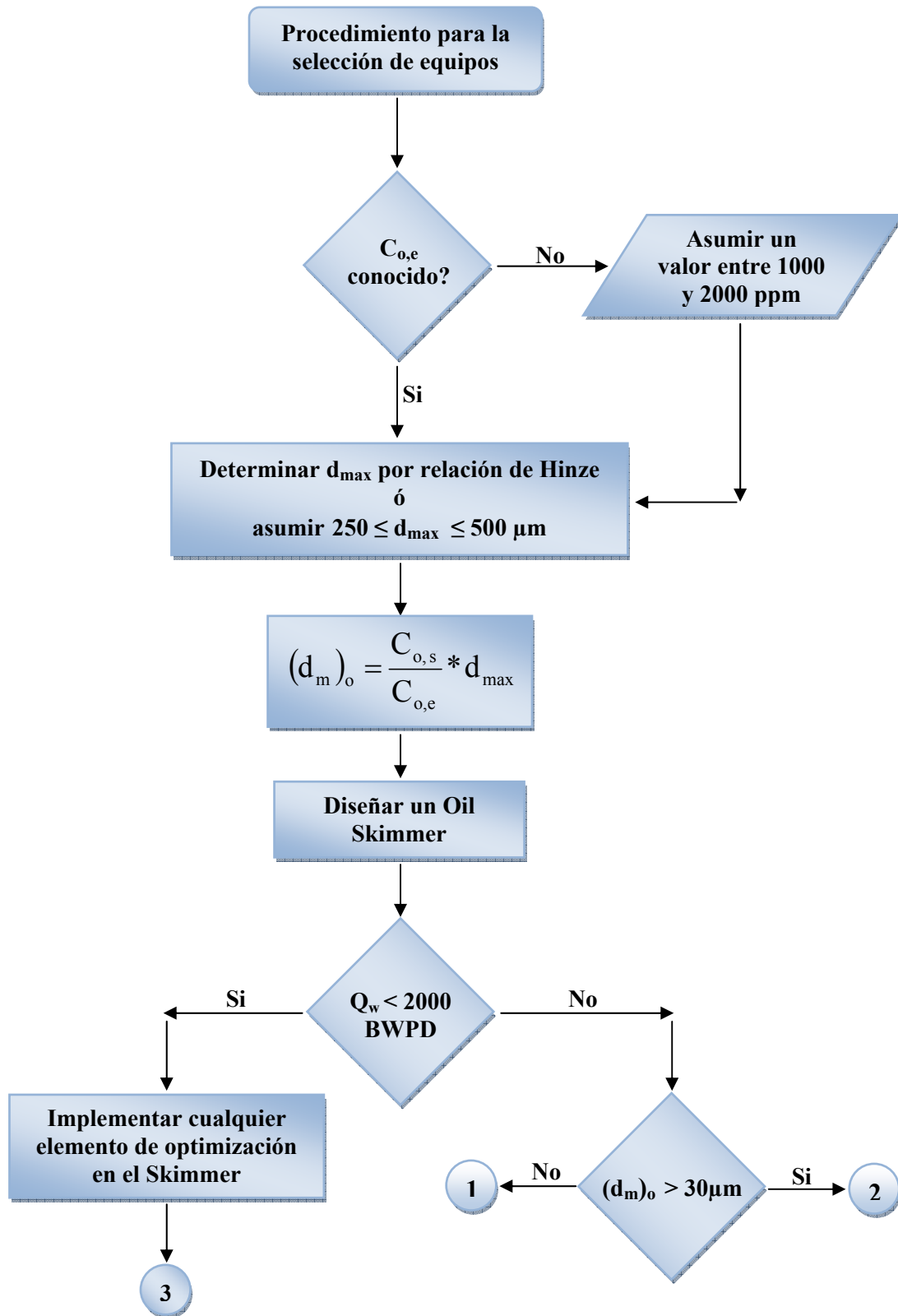
Cuando la calidad del agua se vea afectada con niveles anormales de aceite, ésta puede ser generada por daños o mal funcionamiento de los equipos de tratamiento del aceite. Por lo tanto, se hace necesaria la revisión de cada uno de los equipos para detectar la excesiva pérdida de fluido.

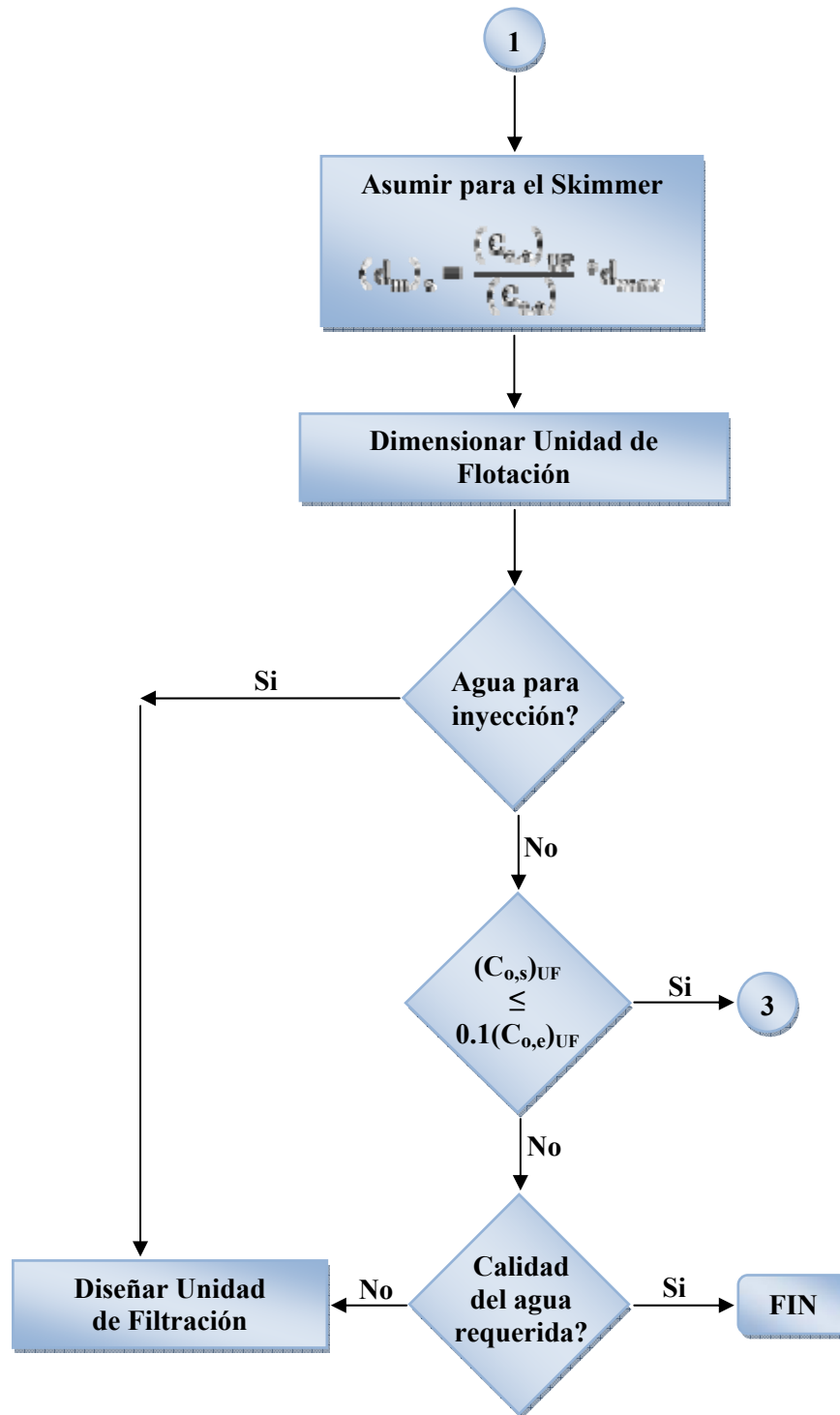
La metodología está diseñada para la remoción mecánica de sólidos suspendidos y aceite, sin embargo, en el tratamiento se reduce significativamente el contenido

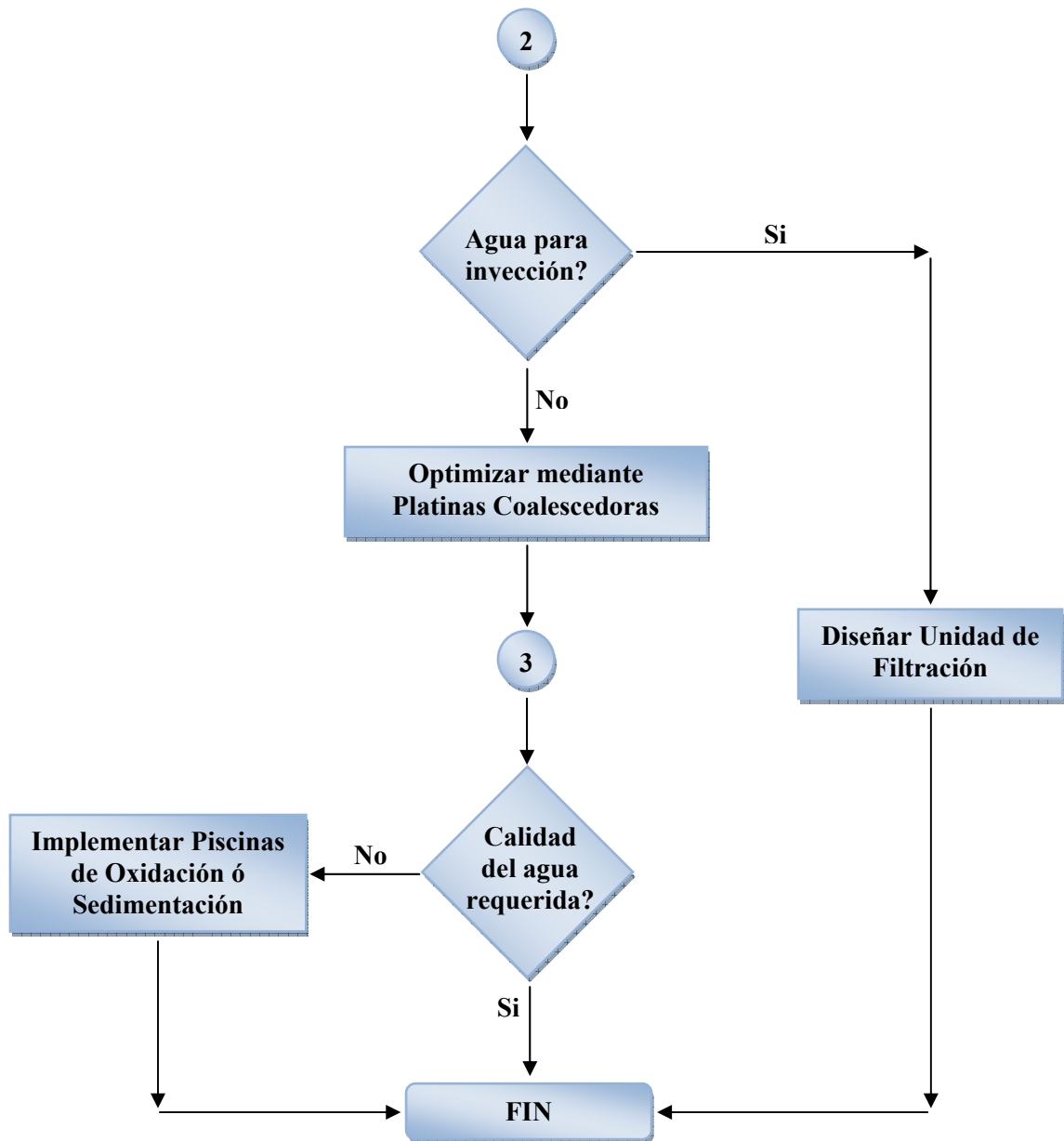


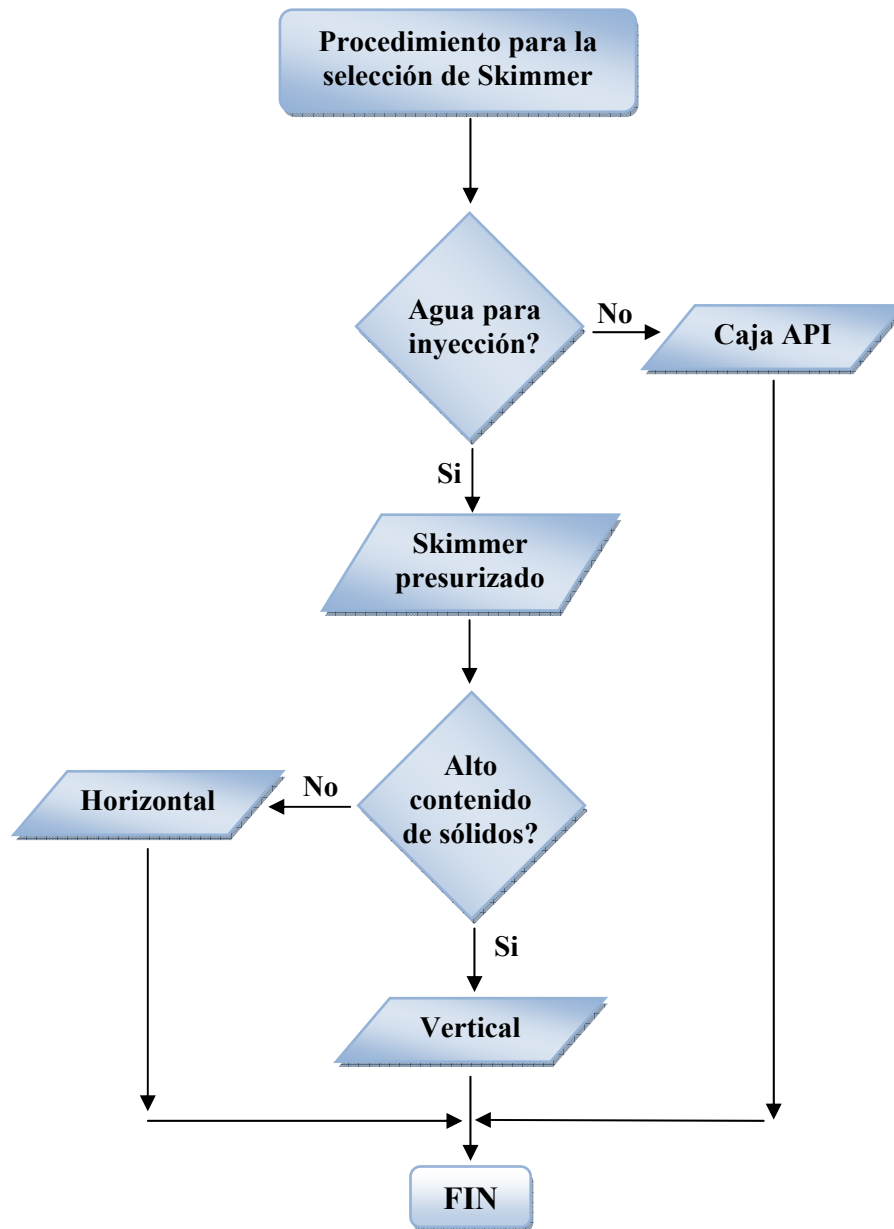
de los demás contaminantes. El diseño puede variar de forma considerable al presentarse una alta carga de otros contaminantes. En este caso, se deberá implementar adicionalmente un sistema de tratamiento químico.

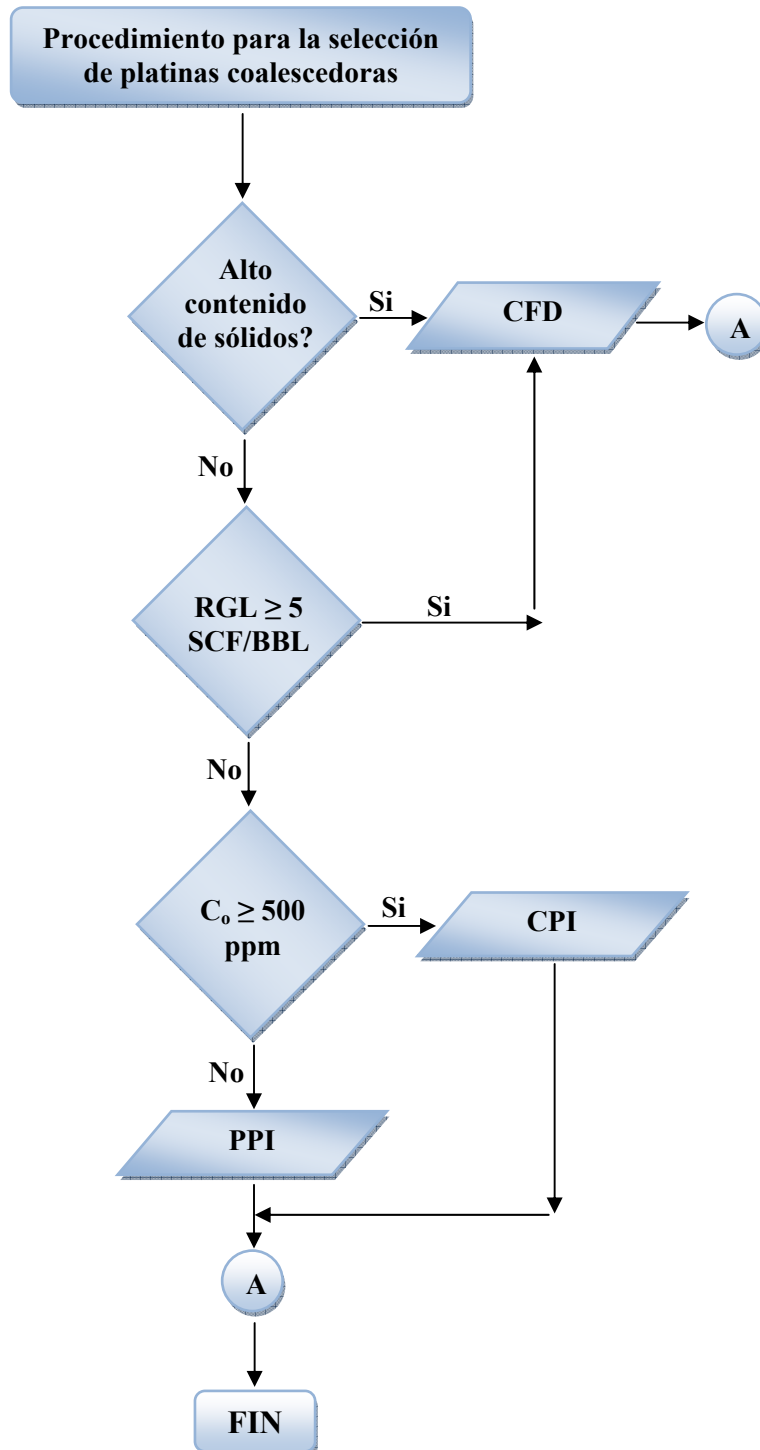
La guía que se presenta a continuación tiene como objetivo proporcionar las herramientas suficientes al ingeniero, quién con su criterio, deberá implementar el sistema adecuado de acuerdo a las condiciones del agua de entrada.













$C_{o,e}$: Concentración de aceite a la entrada, mg/l.

$C_{o,s}$: Concentración de aceite a la salida, mg/l.

$(C_{o,e})_{UF}$: Concentración de aceite a la entrada de la unidad de flotación, mg/l.

$(C_{o,s})_{UF}$: Concentración de aceite a la salida de la unidad de flotación, mg/l.

$(d_m)_o$: Diámetro de partícula de aceite a tratar, μm .

d_{max} : Diámetro máximo de partícula de aceite, μm .

$(d_m)_s$: Diámetro de partícula a tratar en el skimmer, μm .



CONCLUSIONES

Actualmente, en Colombia se han estipulado normas con el fin de reducir el impacto generado por la descarga en aguas superficiales, subterráneas y marítimas. Sin embargo, el Decreto 1594 de 1984 es bastante flexible al no estipular valores, permitiendo el vertimiento de gran concentración de carga contaminante en el agua residual.

Es importante promover una cultura en donde la explotación de recursos naturales sea consecuente con el desarrollo y la tecnificación de la industria, y así evitar el impacto ambiental progresivo. Una concentración de 30 a 50 ppm de aceite puede no ser representativa para caudales bajos, pero debido a la alta producción de agua residual sobretodo en campos maduros, las pérdidas ambientales son bastante significativas.

Desde la perspectiva nacional las concentraciones recomendadas en el presente texto podrían ser interpretadas como valores bastante rígidos, pero para las agencias reconocidas internacionalmente tales como la APHA Y la EPA, estos valores son muy flexibles, recomendando incluso el no vertimiento del agua en corrientes superficiales.

Para un óptimo tratamiento del agua residual se deben tener en cuenta características del fluido tales como viscosidad, densidad, diámetro de partícula a tratar, temperatura y carga contaminante entre otras, las cuales establecen el sistema de tratamiento a implementar.

La configuración de un sistema de tratamiento mecánico puede variar de acuerdo a la carga contaminante, y consta siempre de un Oil Skimmer dispuesto como dispositivo de tratamiento inicial. En algunos casos se hace necesaria la



implementación de algún tipo de tratamiento químico adicional para cumplir con los requerimientos ambientales.

En general, la mayor parte de los equipos requieren una revisión periódica para su mantenimiento, aunque esta no es muy compleja. Al presentarse concentraciones anormales a la entrada del sistema, se deben realizar inspecciones a los equipos de tratamiento de crudo para detectar posibles fallas.



REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. SCHLUMBERGER, Oilfield Review. "Control de agua". Publicación Verano 2000.
2. MINISTERIO DE ENERGÍA Y MINAS DE PERÚ. Protocolo de monitoreo de calidad del agua.

----- Reglamento para la Protección Ambiental en las Actividades de Hidrocarburos". Decreto Supremo No. 046-93 EM. Perú.
3. MINISTERIO DE AMBIENTE, VIVIENDA Y DESARROLLO TERRITORIAL. Usos del agua y residuos líquidos. Decreto 1594 del 26 de junio de 1984. Colombia.
4. ARNOLD, Kenn y STEWART, Maurice. Surface Production Operations. Design of Oil -Handling Systems and Facilities. Segunda Edición. Vol.1.
5. NALCO CHEMICAL COMPANY; KEMMER, Frank N; McCALLION, John. Manual del agua: su naturaleza, tratamiento y aplicaciones. México. McGraw-Hill, 1995.
6. VELANDIA GALEANO, Daniel. Facilidades de Producción en Campos Petroleros. 1 ed. Bogotá. Cargraphics S.A. 2002. 138 - 177 p.
7. AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE. Monographs on Refinery Environmental Control, Management of Water Discharges. API 421.



8. PÁEZ CAPACHO, Ruth. Diplomado en facilidades de Superficie. Módulo 3. Operaciones de recolección y Tratamiento de Fluidos Producidos. Apiay 2000.
9. NEW GAS AND OIL S.A. Sistemas de filtración para el Tratamiento de Aguas Residuales: Filtro “New Water”.