

**DESARROLLO DE UN SOFTWARE PEDAGÓGICO PARA EL DISEÑO DE
SISTEMAS DE TRATAMIENTO CONVENCIONAL DE AGUA DE PRODUCCIÓN
EN AMBIENTES “ONSHORE” Y “OFFSHORE”**

LUIS MIGUEL CORREDOR RODRÍGUEZ

JUAN CARLOS SAAVEDRA BOHÓRQUEZ

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

2020

**DESARROLLO DE UN SOFTWARE PEDAGÓGICO PARA EL DISEÑO DE
SISTEMAS DE TRATAMIENTO CONVENCIONAL DE AGUA DE PRODUCCIÓN
EN AMBIENTES “ONSHORE” Y “OFFSHORE”**

LUIS MIGUEL CORREDOR RODRÍGUEZ

JUAN CARLOS SAAVEDRA BOHÓRQUEZ

Trabajo de grado para optar el título de:

INGENIERO DE PETRÓLEOS

DIRECTOR

MANUEL ENRIQUE CABARCAS SIMANCAS

MSc. En Ingeniería Química

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

2020

DEDICATORIA

A Dios en primer lugar por darme la vida que con sus infinitas bendiciones hoy culmino esta etapa en mi camino a la vida profesional.

A mis padres María del Tránsito Rodríguez Díaz y Libardo Corredor Estévez a quienes es debo todo lo que soy como estudiante, como hijo y como persona, por apoyarme incondicionalmente en los momentos más difíciles y festejar en los momentos de triunfo. Por ser esa motivación para perseverar día a día. Los amo.

A mi primo Nelson Padilla por creer en mí y brindarme sus consejos y siempre su apoyo incondicional especialmente en los momentos que más necesitaba y así para poder culminar exitosamente esta etapa.

A mi tía Nidia Rodríguez por brindarme su confianza y apoyo siempre y brindarme sus consejos para la vida laboral y personal

A mi compañero de proyecto Juan Carlos quien se ha compartido en un amigo en todos estos años de camino universitario y que con su apoyo fue posible culminar este proyecto.

A mis amigos de toda la vida Gerson, Edwin, y primos Esteban y Javier por los momentos de alegría, por conformar un gran equipo deportivo de grandes celebraciones durante gran tiempo. Por su lealtad.

A mis compañeros y amigos de universidad Luis, Ángel, Erika, Thomás, Nelson por todos los momentos vividos en mi paso por la universidad: trasnochadas estudiando, terminando proyectos, por momentos de diversión y charlas amenas.

A mis profesores que tuve durante mi formación universitaria, por transmitirme todos sus conocimientos y sus sabios consejos.

A todos y cada una de las personas que se me hace difícil nombrar uno por uno pues la lista sería inmensa que estuvieron presente y contribuyeron en el proceso de mi formación superior.

Luis Miguel Corredor Rodríguez

DEDICATORIA

En primera instancia darle gracias a Dios por permitirme alcanzar este gran objetivo.

A mis padres, Emelina Bohórquez Pamplona y Carlos Saavedra Niño por el apoyo incondicional que me han brindado a lo largo de mi vida, así como los valores que me han inculcado para culminar esta etapa, porque son mi admiración y mi motor de lucha día a día.

A mis hermanos Paola Andrea Saavedra Bohórquez, Diego Alejandro Saavedra Bohórquez, Ángel Santiago Saavedra Bohórquez, porque son mi admiración y mis ganas de salir adelante.

A mi compañero de tesis Luis Miguel Corredor Rodríguez quien se convirtió en un amigo y un referente en mi aprendizaje a lo largo de la universidad y porque con su apoyo logramos culminar este gran proyecto.

A mi novia Laura Daniela Parra por brindarme compañía, amor, paciencia, apoyo, por corregirme y por ayudarnos a editar los videos fundamentales con los cuales se pueden visualizar el funcionamiento de los equipos.

A mis amigos: María Camila Burgos, Thomas Alfonso Cadena, Lizeth Daniela Arenales, Roberto Colon, Paula Andrea Romero por los momentos de diversión, de estudio, por ser ese apoyo incondicional, por sus consejos y por sus enseñanzas que me permitieron lograr este objetivo.

A las personas que pertenecían a la selección de futbol de la universidad industrial de Santander como lo eran Jorge Reales, Eduardo Rojas, Miguel Criado entre otros, quienes fueron un grupo de apoyo, de esparcimiento, de competencia y que finalmente fueron como una familia a lo largo de este proceso.

Juan Carlos Saavedra Bohórquez

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Industrial de Santander por abrirnos las puertas para poder realizar nuestros estudios de pregrado, por contar con maestros de excelente nivel profesional y personal, los cuales nos han dado todas las bases necesarias para abrirnos paso en el mundo profesional.

A el ingeniero Manuel Enrique Cabarcas Simancas por su guía y exigencia para la excelencia de realización de este trabajo.

A Ecopetrol S.A, por los ingenieros que contribuyeron la explicación de algunos de los temas desarrollados en este trabajo. Además de darnos una visión del funcionamiento de un STAP operando.

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	17
1. GENERALIDADES.....	19
1.1. AGUA DE PRODUCCIÓN	20
2. SISTEMAS DE TRATAMIENTO CONVENCIONAL DE AGUA DE PRODUCCIÓN	23
2.1. SISTEMA DE TRATAMIENTO PRIMARIO	25
2.1.1. Separador API.....	26
2.1.2. Interceptor de placas corrugadas (CPI).....	28
2.1.3. Hidrociclón	33
2.1.4. Skim vessel y tanques desnatadores	42
2.2. SISTEMA DE TRATAMIENTO SECUNDARIO	47
2.2.1. Sistema de flotación por gas.	47
2.2.2. Hydrocell (IGF) – Siemens	57
2.2.3. Quadricell (IGF) – Siemens.....	58
2.2.4. Veirsep (DGF) – Siemens	58
2.3. SISTEMA DE TRATAMIENTO TERCIARIO	59
2.3.1. Filtro cáscara de nuez:	61
2.3.2. Filtro de arena:	65
3. METODOLOGÍA DE DISEÑO.....	73
3.1. DISEÑO DEL SEPARADOR API	73
3.2. DISEÑO DEL CPI	77
3.3. DISEÑO DEL HIDROCICLÓN	80
3.4. DISEÑO DEL SKIM VESSEL.....	84

3.4.1. Skim vessel vertical.....	84
3.4.2. Skim vessel horizontal.....	84
3.5. DISEÑO CELDAS DE FLOTACIÓN.....	85
3.5.1. Hydrocell (IGF) – Siemens:.....	85
3.5.2. Quadrycell (IGF) Siemens:.....	86
3.5.3. Veirsep (DGF) -Siemens:.....	88
3.6. DISEÑO DEL SISTEMA DE FILTRACIÓN	90
3.6.1. Power Clean – Veolia.....	90
3.6.2. Auto- Shell Filter.....	91
3.6.3. Wemco Silver Band – Schlumberger.....	92
4. SOFTWARE PEDAGÓGICO “WATER-TREATMENT”	95
5. VALIDACIÓN DEL SOFTWARE	104
6. CONCLUSIONES	106
7. RECOMENDACIONES	108
BIBLIOGRAFÍA.....	109
ANEXOS.....	113

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Clasificación de los equipos involucrados en los sistemas de tratamiento convencional de agua de producción.....	24
Tabla 2. Dimensiones de los hidrociclones según el modelo.....	40
Tabla 3. Valores recomendados del factor de turbulencia y corto-circuito.....	75
Tabla 4. Distribución del tamaño de las gotas de aceite.....	79
Tabla 5. Dimensiones de los modelos de la unidad de flotación Hydrocell-Siemens	86
Tabla 6. Dimensiones de los modelos de la unidad de flotación Quadrycell Siemens.	87
Tabla 7. Dimensiones de los modelos de la unidad de flotación VEIRSEP Siemens.	88
Tabla 8. Dimensiones de los modelos de la unidad de flotación VEIRSEP-P Siemens.....	89
Tabla 9. Condiciones de diseño del filtro Power Clean.....	90
Tabla 10. Dimensiones del filtro Auto-shell - Siemens.....	91
Tabla 11. Características de los modelos del filtro Wemco Silver Band - Schlumberger.....	92
Tabla 12. Dimensiones del filtro Wemo Silver Band - Schlumberger.....	93
Tabla 13. Validación del diseño del separador API.....	104
Tabla 14. Validación del diseño del CPI.	104
Tabla 15. Validación de diseño del hidrociclón.	105
Tabla 16. Validación de diseño de skim vessel vertical	105
Tabla 17. Validación de diseño de skim vessel horizontal	105
Tabla 18. Validación de remoción de aceite	105

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Producción anual de agua y crudo desde 1992.....	20
Figura 2. Esquema de un separador API.....	27
Figura 3. Paquete de platos de un CPI.....	29
Figura 4. Esquema de un CPI de flujo descendente.....	30
Figura 5. Esquema de un CPI de flujo Ascendente	31
Figura 6. Partes de un hidrociclón	34
Figura 7. Recipiente con liners.	35
Figura 8. Esquema de las dimensiones de un hidrociclón.....	41
Figura 9. Esquema de un tanque desnatador.....	43
Figura 10. Skim vessel vertical	45
Figura 11. Skim vessel horizontal.	46
Figura 12. Regiones de la celda de flotación.....	50
Figura 13. Sección transversal unidad de flotación hidráulica	51
Figura 14. Celda de flotación hidráulica.....	52
Figura 15. Sección transversal de la unidad mecánica.....	53
Figura 16. Celdas de flotación mecánicas.	54
Figura 17. Celda de flotación de gas disuelto.....	56
Figura 18. Unidades de filtración.	60
Figura 19. Cascarilla de nuez.	61
Figura 20. Saturación de la cascarilla de nuez.	62
Figura 21. Fluidización de filtro cáscara de nuez.....	63
Figura 22. Descarga de filtro cáscara de nuez	64
Figura 23. Asentamiento cáscara de nuez	64
Figura 24. Purga del filtro de cáscara de nuez.	65
Figura 25. Filtro Power Clean - Veolia.....	68
Figura 26. Filtro Auto-shell - Siemens.....	70
Figura 27. Esquema filtro Wemco Silver Band - Schlumberger.....	71

Figura 28. Factor de turbulencia y corto-circuito.....	76
Figura 29. Eficiencia de separación vs diferencial de gravedad específica	81
Figura 30. Cantidad de liners necesarios vs flujo de entrada al hidrociclón.	81
Figura 31. Relación de rechazo vs PDR.....	82
Figura 32. Eficiencia de remoción de aceite vs relación de rechazo.	83
Figura 33. Vista superior del filtro.	93
Figura 34. Vista lateral filtro Wemco Silver Band.....	94
Figura 35. Interfaz principal del software WATER-TREATMENT.	96
Figura 36. Video filtro Power Clean – Veolia	97
Figura 37. Datos de entrada para el diseño del separador API.	98
Figura 38. Datos de entrada par diseño del CPI.....	98
Figura 39. Datos de entrada para diseño de hidrociclón.	99
Figura 40. Datos de entrada para diseño de skim vessel horizontal.....	100
Figura 41. Datos de entrada diseño celda de flotación Quadricell.....	101
Figura 42. Datos de entrada para diseño del filtro Power Clean – Veolia.....	102
Figura 43. Diseño del sistema de tratamiento en ambiente onshore.....	102
Figura 44. Diseño del sistema de tratamiento en ambientes offshore.	103

LISTA DE ANEXOS

Anexo A. Manual de usuario.....	113
---------------------------------	-----

RESUMEN

TÍTULO: DESARROLLO DE UN SOFTWARE PEDAGÓGICO PARA EL DISEÑO DE SISTEMAS DE TRATAMIENTO CONVENCIONAL DE AGUA DE PRODUCCIÓN EN AMBIENTES “ONSHORE” Y “OFFSHORE”*

**AUTOR: LUIS MIGUEL CORREDOR RODRÍGUEZ
JUAN CARLOS SAAVEDRA BOHÓRQUEZ****

PALABRAS CLAVES: Agua de producción, offshore, onshore, aceite disperso, gravedad, flotación, filtración.

DESCRIPCIÓN:

En este trabajo se presenta un software desarrollado para el diseño de equipos implicados en los sistemas de tratamiento convencional de agua de producción, tanto en ambientes de continente como en costa afuera, para el uso de los estudiantes de la escuela de ingeniería de petróleos. Este software cuenta con una interfaz amigable y de fácil comprensión, donde el usuario puede diseñar el equipo que desee, a partir de diferentes módulos, entre los que se encuentran: separador API, CPI, tanque desnatador, skim vessel, hidrociclón, celdas de flotación, filtro de arena, filtro de cáscara de nuez y dos más para sistemas completos de tratamiento de agua, uno para ambientes onshore y el otro para ambientes offshore. De este modo, facilita a los estudiantes el análisis de los resultados obtenidos mediante el paso a paso de los cálculos necesarios para realizar el diseño final de cada módulo, así como la comprensión de los fenómenos involucrados en el tratamiento del agua de producción a mediante la incorporación de imágenes, gráficos bidimensionales y videos ilustrativos referentes a cada unidad trabajada.

Este software pedagógico es una herramienta importante al momento de aplicarlo a las clases de la asignatura facilidades de superficie, puesto que es el complemento de la teoría del tema en mención. Así mismo, se mejora la metodología de enseñanza del curso estando a la vanguardia de la educación global, brindando al futuro ingeniero de petróleos un aprendizaje integral para su vida laboral.

* Trabajo de grado

** Escuela de Ingeniería de Petróleos. Facultad de Ingeniería Físicoquímicas. Director: Manuel Enrique Cabarcas Simancas, MSc en Ingeniería Química.

ABSTRACT

TITLE: DEVELOPMENT OF A PEDAGOGICAL SOFTWARE FOR THE DESIGN OF CONVENTIONAL PRODUCED WATER TREATMENT SYSTEMS FOR ONSHORE AND OFFSHORE ENVIRONMENTS*

**AUTHOR: LUIS MIGUEL CORREDOR RODRÍGUEZ
JUAN CARLOS SAAVEDRA BOHÓRQUEZ****

KEYWORDS: Produced water, offshore, onshore, dispersed oil, gravity, flotation, filtration.

DESCRIPTION:

This paper presents a software developed for the design of equipment involved in conventional production water treatment systems, both in onshore and offshore environments, for use by students of the School of Petroleum Engineering. This software has a friendly and easy to understand interface, where the user can design the equipment he wants, from different modules, among which are: API separator, CPI, skimmer tank, skim vessel, hydrocyclone, flotation cells, sand filter, nut shell filter and two more for complete water treatment systems, one for onshore environments and the other for offshore environments. In this way, it facilitates students the analysis of the results obtained by means of the step-by-step calculations necessary to carry out the final design of each module, as well as the understanding of the phenomena involved in the treatment of production water through the incorporation of images, two-dimensional graphics and illustrative videos referring to each unit worked on.

This pedagogical software is an important tool when applying it to the classes of the subject surface facilities, since it is the complement of the theory of the subject in mention. Likewise, it improves the teaching methodology of the course being at the forefront of global education, providing the future oil engineer an integral learning for his working life.

* Bachelor thesis

** School of Petroleum Engineering. Faculty of Physicochemical Engineering. Director: Manuel Enrique Cabarcas Simancas, MSc in Chemical Engineering.

INTRODUCCIÓN

La tecnología ha sido de gran ayuda en múltiples ámbitos y es inevitable que se encuentre ligada también al ámbito educativo, en donde por medio de softwares se busca mejorar el modelo de aprendizaje que hoy en día se tienen en las instituciones educativas.

Estos softwares han tenido gran aceptación ya que el conocimiento obtenido por el estudiante es mayor y mucho más rápido, facilitando así el trabajo de los educadores y brindándole al estudiante una manera diferente de aprendizaje. En la industria del petróleo y gas es común encontrar todo tipo de software ya sean de simulación o de diseño, por lo cual es importante brindar al estudiante un conocimiento previo, para que a la hora de utilizar estos softwares comerciales no sea tan complicado.

A continuación, se mostrará un software pedagógico, que realiza el diseño de sistemas de tratamiento convencionales de agua de producción en ambientes “onshore” y “offshore”, en el cual se evidenciarán los diferentes equipos, además de tener un diseño muy práctico donde se facilitará su uso debido a su interfaz, permitiéndole al estudiante y al educador aprovechar el tiempo al máximo, donde el estudiante podrá aprender por medio de la teoría y de la práctica a la vez. El software watertreatment cuenta con metodología sencilla de aprender, cuenta con una interfaz gráfica que es de gran ayuda durante el proceso de aprendizaje en donde el estudiante podrá identificar, analizar y comprobar los diseños dados por el educador.

Es por eso, que el software watertreatment será una herramienta fundamental para que los futuros ingenieros de petróleos durante su formación adquieran los conocimientos de manera interactiva, permitiéndoles comprender el adecuado

funcionamiento y diseño de los sistemas de tratamiento del agua de producción, a partir de las propiedades de una corriente de agua determinada, así como identificar los equipos por medio de ilustraciones gráficas. Además, Watertreatment cuenta con los dos ambientes de operación (onshore y offshore) lo cual genera un conocimiento más completo al estudiante donde podrá identificar los equipos que se utilizan.

1. GENERALIDADES

Cuando los hidrocarburos (aceite, condensado y gas natural) son producidos, la corriente de flujo que proviene del pozo usualmente contiene agua de producción asociada a estos hidrocarburos. La calidad del agua de producción a menudo suele ser salmuera, salobre o salada, pero en raras ocasiones puede ser cercanamente fresca. El agua debe ser separada de los hidrocarburos y dispuesta de manera que no viole las regulaciones ambientales¹. El agua de producción es la corriente de desecho más grande proveniente de la explotación de crudo y gas. Aproximadamente más de 300 millones de barriles de agua se producen diariamente a nivel mundial². En la figura 1 se puede apreciar el aumento de la producción anual de agua tanto en tierra como costa afuera.

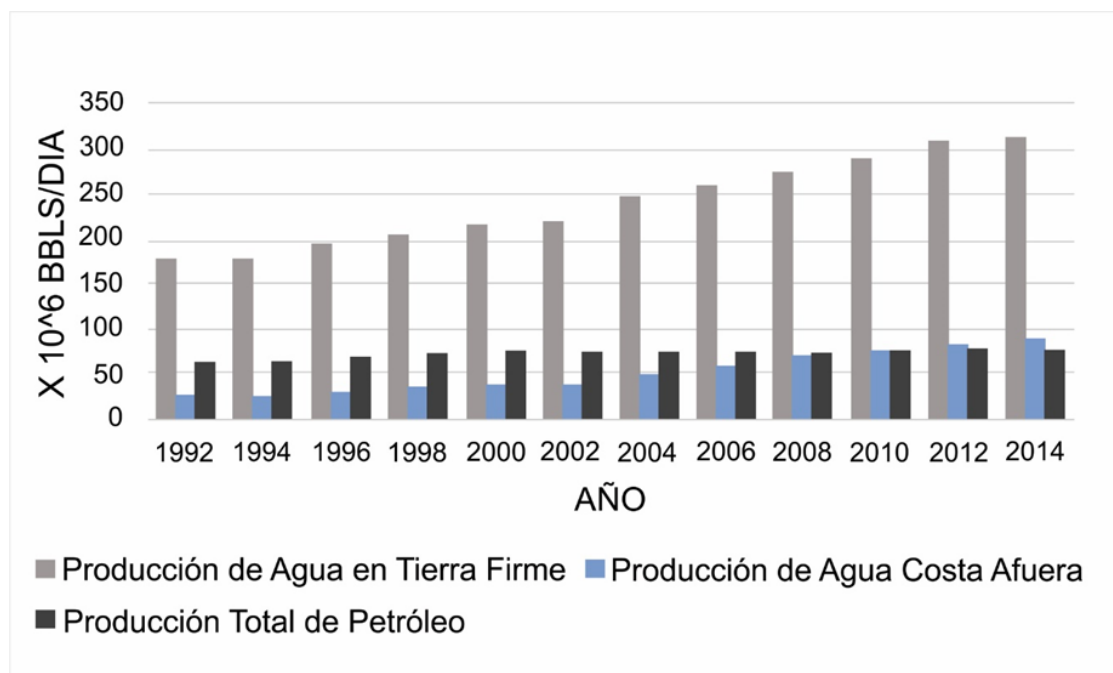
El agua producida representa más del 80% de los residuos y en los campos maduros este porcentaje alcanza un 95%. La producción mundial promedio de petróleo en el año 2014 fue de 80 millones de barriles por día (bbls/d), comparado con 315 millones de bbls/d de agua. Según estas cifras, se producen de 3 a 5 barriles de agua con cada barril de petróleo, aunque en ciertos yacimientos maduros esta cifra puede ser de 10 a 14. Para el año 2014 Colombia produjo 12.45 barriles de agua por cada barril de crudo, cifra que equivale a una producción diaria de 11.5 millones de bbls de agua. De estos volúmenes de agua, el 65% se destinó para proyectos de inyección y el 35% restante en vertimientos y otros usos. La gestión o manejo del agua producida se ha convertido en un reto, ya que las opciones son cada vez más limitadas, las regulaciones más estrictas y las fuentes de agua más

¹ ARNOLD, Ken; STEWART Maurice. Produced Water Treatment Systems. En: Emulsions and Oil Treating Equipment: Selection, Sizing and Troubleshooting. [En línea]. Gulf Professional Publishing Elsevier, Houston, Texas: Diciembre, 2008. p. 107-211. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/B978-0-7506-8970-0.X0001-1>

² GARCÍA, Juan; HERRERA, Sergio; CABARCAS, Manuel. Manejo del agua de producción para proyectos de gas en aguas profundas y ultraprofundas del Caribe Colombiano. En: Revista Fuentes: El reventón energético. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander, Julio-diciembre, 2017, Vol. 15, no.2. p. 89-105.

escasas. En vista de estos desafíos, las empresas de exploración y producción son conscientes de que el agua producida puede ser una fuente de valor o un activo³.

Figura 1. Producción anual de agua y crudo desde 1992



Fuente: GARCÍA, Juan; HERRERA, Sergio y CABARCAS, Manuel. (2017). Manejo del agua de producción para proyectos de gas en aguas profundas y ultraprofundas del Caribe Colombiano. Revista Fuentes: El reventón energético, 15 (2), p. 89-105.

1.1. AGUA DE PRODUCCIÓN

El agua producida es agua que se encuentra en las mismas formaciones que el petróleo y el gas. Cuando el petróleo y el gas fluyen hacia la superficie, el agua producida se lleva a la superficie con los hidrocarburos. Este fluido contiene algunas

³ MORALES RINCON, María Camila; REVELO NÚÑEZ, Astrid Carolina. Desempeño técnico y ambiental de las tecnologías convencionales y modernas de tratamiento de agua producida. [En línea]. Trabajo de grado. Bucaramanga. Universidad Industrial de Santander. Facultad de ingenierías fisicoquímicas. Escuela de Ingeniería de Petróleos. 2016. p. 15.

de las características químicas de la formación a partir de la cual se produjo y de los hidrocarburos asociados. Puede originarse como agua natural en las formaciones que contienen petróleo y gas o puede ser agua que se inyectó previamente en ciertas formaciones a través de actividades diseñadas para aumentar la producción de petróleo de las formaciones, como la inyección de agua y la inyección de vapor⁴.

El agua producida puede tener diferentes impactos ambientales dependiendo de su composición, concentración y lugar de descarga⁵. En cuanto a su composición, es una mezcla compleja de sustancias orgánicas e inorgánicas provenientes de formaciones geológicas tales como los metales pesados, sólidos dispersos, sales, bacterias, gases disueltos, ácidos orgánicos, isótopos radioactivos, productos químicos de tratamiento e hidrocarburos dispersos y solubles⁶.

Frecuentemente, los proyectos de petróleo y gas tienen como objetivo un esquema de cero descargas, debido a la vulnerabilidad de los ecosistemas. En países como Noruega, el desarrollo de nuevos proyectos sin cero descargas no está permitido y para el caso de las licencias existentes, se permite la descarga de máximo el 5% del agua producida totalmente tratada. Estas políticas pueden ser ampliadas y desarrolladas como sistemas regulatorios en el futuro, razón por la que se promueven los retos para el tratamiento de agua⁷. En Colombia, el manejo de vertimientos está ligado a la obligación que tiene el Estado de garantizar un ambiente sano a todos los ciudadanos. Cumpliendo sus funciones, el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADS) presentó La Resolución 0631 de 2015. Esta norma establece los parámetros y los valores límites máximos permisibles en

⁴ The Produced Water Society. What is produced water?. [En línea]. 2017. [Consultado el 24 de junio de 2019]. Disponible en: <http://www.producedwatersociety.com/produced-water-101/>

⁵ MORALES RINCON, María Camila; REVELO NÚÑEZ, Astrid Carolina. Op Cit.

⁶ GARCÍA, Juan; HERRERA, Sergio; CABARCAS, Manuel. Op Cit.

⁷ MORALES RINCON, María Camila; REVELO NÚÑEZ, Astrid Carolina. Op Cit.

los vertimientos puntuales a cuerpos de aguas superficiales y a los sistemas de alcantarillado público⁸.

Es por eso que, para cumplir con las regulaciones nacionales e internacionales, las compañías de petróleo y gas deben diseñar un apropiado sistema de tratamiento de agua de producción que permita obtener una corriente residual óptima para realizar su respectiva disposición final. En el capítulo 2 se profundizará en los sistemas de tratamiento convencional de agua de producción utilizados por la industria petrolera.

⁸ *Ibíd.*, p. 16.

2. SISTEMAS DE TRATAMIENTO CONVENCIONAL DE AGUA DE PRODUCCIÓN

Los sistemas de tratamiento de agua de producción están conformados por una serie de equipos que tienen una función en común, la cual es remover el aceite y demás contaminantes presentes en la corriente proveniente de los pozos de producción de una manera eficiente y económica. Así, se garantiza la integridad de la biodiversidad de la zona del ambiente de trabajo, así mismo se evita inconvenientes con las regulaciones ambientales. Por esta razón el tratamiento del agua de producción es una necesidad antes de que la mayoría de las aguas producidas convencionales puedan aplicarse a otros usos. Los objetivos generales para los operadores cuando planifican el tratamiento del agua producida son⁹:

- Desengrase: eliminación de aceite y grasa libres y dispersos presentes en el agua producida.
- Eliminación de sustancias orgánicas solubles - Eliminación de sustancias orgánicas disueltas.
- Desinfección: eliminación de bacterias, microorganismos, algas, etc.
- Eliminación de sólidos en suspensión: eliminación de partículas en suspensión, arena, turbidez, etc.
- Eliminación de gases disueltos - Eliminación de gases ligeros de hidrocarburos, dióxido de carbono, sulfuro de hidrógeno, etc.
- Desalinización o desmineralización: eliminación de sales disueltas, sulfatos, nitratos, contaminantes, agentes desincrustantes, etc.
- Ablandamiento: eliminación del exceso de dureza del agua.

⁹ ARTHUR, J. Daniel; LANGHUS, Bruce G.; PATEL, Chirag. Technical summary of oil & gas produced water treatment technologies. Tulsa, 2005.

- Ajuste de la relación de adsorción de sodio (SAR): adición de iones de calcio o magnesio en el agua producida para ajustar los niveles de sodicidad antes de la irrigación.
- Varios - Eliminación de materiales radiactivos naturales (NORM).

El tratamiento convencional del agua producida consta de tres etapas¹⁰, donde cada una emplea un principio de separación diferente utilizando una serie de equipos que se seleccionan de acuerdo a las condiciones de operación y los requerimientos de calidad de la corriente final de agua tratada. Los principios básicos de funcionamiento que se usan en el tratamiento del agua de producción son la separación gravitacional, coalescencia, flotación, extracción y filtración¹¹. Sin embargo, los sistemas de tratamiento de agua de producción en aplicaciones costa afuera cuentan con una serie de limitantes que determinan la disponibilidad de los equipos de tratamiento. Dentro de estas limitantes figura la proximidad de las instalaciones a la costa, disposición de líneas de flujo, peso y tamaño de las plataformas. Es por esto que los equipos que emplean la filtración como mecanismo de remoción no son muy utilizados en operaciones costa fuera debido a su gran tamaño y alto mantenimiento requerido ¹². En la tabla 1 se muestra una clasificación de los equipos utilizados en cada etapa del sistema de tratamiento de agua dependiendo el ambiente de operación.

Tabla 1. Clasificación de los equipos involucrados en los sistemas de tratamiento convencional de agua de producción.

Ambiente de operación	Sistema de tratamiento	Equipos utilizados
Onshore	Primario	-Separador API -CPI

¹⁰ MORALES RINCON, María Camila; REVELO NÚÑEZ, Astrid Carolina. Op Cit.

¹¹ GARCÍA, Juan; HERRERA, Sergio; CABARCAS, Manuel. Op Cit.

¹² Ibíd., p. 97.

Ambiente de operación	Sistema de tratamiento	Equipos utilizados
		-Tanque desnatador -Skim vessel -Hidrociclón
	Secundario	Celdas de flotación y tanques de
	Terciario	-Filtro cáscara de nuez -Filtro de arena
Offshore	Primario	-CPI -Tanque desnatador -Skim vessel -Hidrociclón
	Secundario	Celdas de flotación
	Terciario	No utiliza

2.1. SISTEMA DE TRATAMIENTO PRIMARIO

Los sistemas primarios se basan en la separación del aceite libre y disperso a través de la diferencia de densidades, empleando la gravedad como mecanismo de separación¹³. Las gotas de aceite, al ser más livianas que el volumen de agua que desplazan, tienen una fuerza flotante sobre ella. Esta es resistida por una fuerza de arrastre causada por su movimiento vertical a través del agua. Cuando las dos fuerzas son iguales, se alcanza una velocidad constante, que se puede calcular a partir de la ley de Stokes¹⁴.

$$V_0 = \frac{1.78 \times 10^{-6} (\Delta SG) (d_m)^2}{\mu_w} \quad (\text{Ecuación 1})$$

¹³ *Ibíd.*, p. 97.

¹⁴ ARNOLD, Ken; STEWART Maurice. Op Cit.

A esta etapa de separación también pertenecen equipos tales como los interceptores de placas corrugadas (CPI), los cuales basan su principio de separación en la coalescencia. De igual manera los hidrociclones forman parte de este grupo, estos usan la fuerza centrífuga para efectuar la separación del aceite del agua. A continuación, se describe el funcionamiento y el diseño de los equipos que hacen parte del sistema primario de tratamiento de agua de producción y que se han tomado de guía para la realización de este trabajo.

2.1.1. Separador API Muchas plantas de procesos químicos, en particular las refinerías de petróleo y las plantas petroquímicas, emplean separadores API como su primera etapa de tratamiento de aguas residuales, y posiblemente la más importante, para la separación primaria de petróleo / sólidos. Al emplear el asentamiento por gravedad, los separadores eliminan las grandes cantidades de aceite y sólidos suspendidos de las aguas residuales de la planta antes de los procesos subsiguientes de tratamiento de aguas residuales. Por esta razón su funcionamiento está regido bajo el principio de la ley de Stokes¹⁵. Mientras los glóbulos de aceite subirán debido a las fuerzas boyantes para formar una capa de aceite sobre la superficie del agua, los sólidos aceitosos con una gravedad específica mayor a 1.0 se depositarán en el fondo del separador¹⁶.

Una vez el fluido ingresa al equipo y este se llena durante un tiempo determinado, las partículas de sólidos que se han asentado y el aceite que se encuentra en la superficie, son retirados de la unidad mediante el sistema de raspador/skimmer, así se mantiene la capacidad óptima del separador. El sistema raspador/skimmer consiste en un colector que transporta los sólidos sedimentados en una tolva de lodo en el extremo de la entrada de la unidad y el aceite flotante a un skimmer en el

¹⁵ SCHULTZ, Thomas E. Get the most API out of API separators. Siemens. Estados Unidos, 2005.

¹⁶ MORALES RINCON, María Camila; REVELO NÚÑEZ, Astrid Carolina. Op Cit.

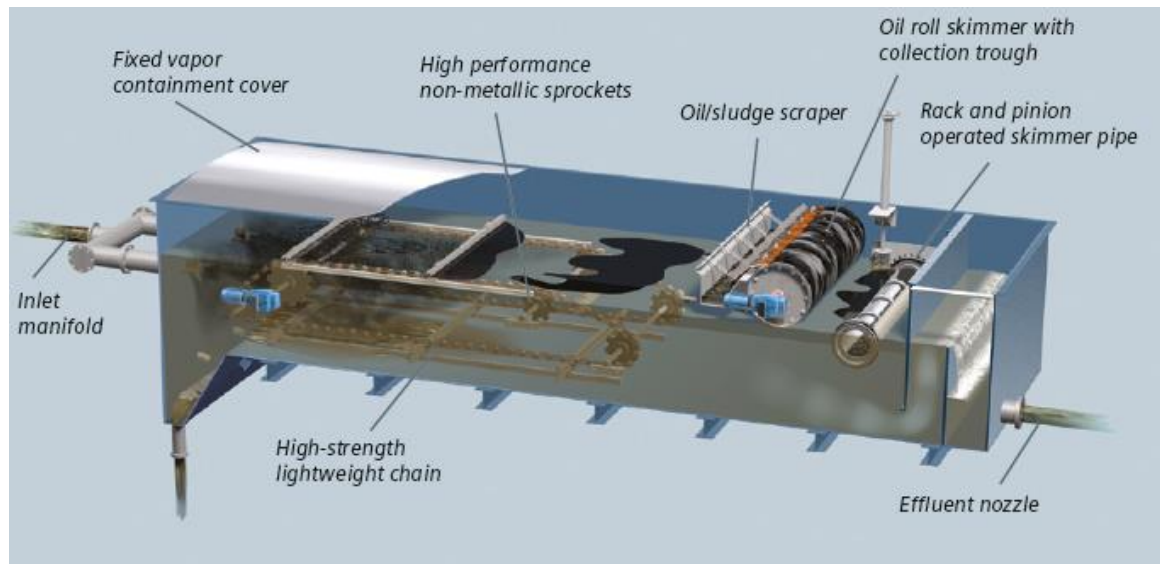
extremo de la salida de la unidad. Allí es retirado de la corriente de agua mediante un tubo giratorio o rodillo. La figura 2 muestra el esquema de un separador API, con sus respectivas partes.

Este equipo además presenta otro tipo de ventajas entre las cuales se puede apreciar¹⁷:

- Habilidad procesos de agua de desecho con altas concentraciones de TSS, superiores a 20000 ppm.
- Los componentes de los recolectores no son metálicos, por lo que resisten a la corrosión y son fáciles de instalar.
- Remoción concentrada de aceite.

Sin embargo, presentan un par de dificultades debido a que requieren una gran área para ser instalados y son costosos¹⁸.

Figura 2. Esquema de un separador API



Fuente: SIEMENS. API Oil/Water Separators -A Total Approach. Erlangen, Germany, 2013.

¹⁷ SCHULTZ, Thomas E. Industrial Oily Wastewater pretreatment. Siemens. 2005.

¹⁸ *Ibíd.*, p. 10.

2.1.2. Interceptor de placas corrugadas (CPI) Este tipo de separadores aplicados a la separación de aceite-agua se originaron a partir los tanques de separación API desarrollados por el Instituto Americano del Petróleo. Este tanque de separación puede ser categorizado como un dispositivo de separación por gravedad de aceite-agua, y tiene ciertas ventajas incluyendo una estructura simple, fácil mantenimiento y alta eficiencia de remoción de aceite¹⁹.

Estos equipos son la forma más común de los interceptores de placas paralelas (PPI) usados en operaciones de producción al ocupar menor área de trabajo para la misma eliminación de partículas, facilita el manejo de sólidos y tiene el beneficio adicional de ser más barato que un PPI²⁰. Las placas paralelas son corrugadas con el eje de las ondulaciones paralelas en la dirección del flujo. En la figura 4 se puede observar un paquete de placas donde este está inclinado en un ángulo de 45° y la mayor parte del flujo de agua es forzado hacia abajo. El aceite se eleva para contrarrestar el flujo de agua y se concentra en la parte superior de cada ondulación. Cuando el aceite alcanza el final del paquete de placas, se recoge en un canal y se lleva a la interface aceite-agua²¹.

En la figura 4 se puede apreciar el patrón de flujo de un diseño típico de un CPI con flujo descendente. El agua entra en la boquilla de entrada (1), donde los sólidos fluyen hacia abajo y se asientan en la caja de recolección primaria (2). El agua y el aceite fluyen hacia arriba y a través de una placa deflectora de distribución perforada (3). El paquete del CPI (4) recibe el agua aceitosa. El aceite sale de la trayectoria de flujo hacia la parte inferior de la cresta y se une en una película que se mueve hacia arriba opuesta al flujo de agua. Se permite que una capa gruesa de aceite se acumule hasta que fluya sobre un vertedero ajustable (5) en una caja de recolección

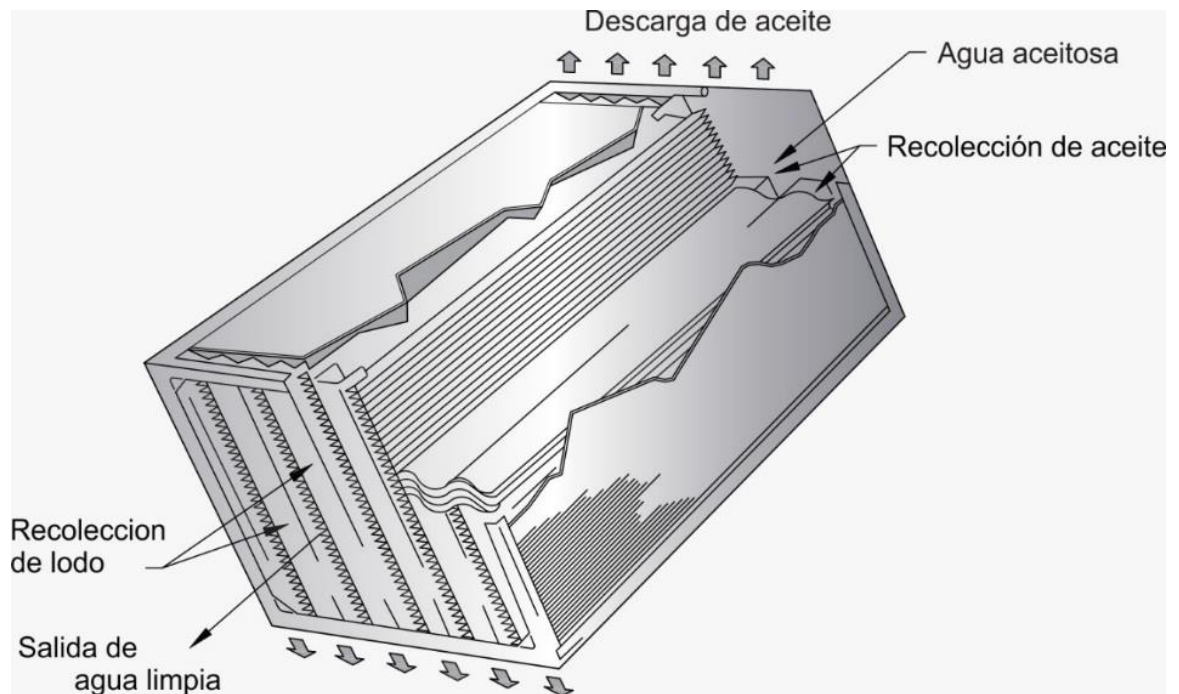
¹⁹ HAN, Yunrui, et al. A review of the recent advances in design of corrugated plate packs applied for oil–water separation. En: Journal of Industrial and Engineering Chemistry. [En línea]. China, Elsevier, Abril, 2017, vol. 53, p. 37-50. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jiec.2017.04.029>

²⁰ ARNOLD, Ken; STEWART Maurice. Op Cit.

²¹ MORALES RINCON, María Camila; REVELO NÚÑEZ, Astrid Carolina. Op Cit.

de aceite hasta su eliminación. La separación de ligeros y lodos es simultáneamente realizada y cae en la superficie de la placa inferior a lo largo de los canales y se acumula en la parte inferior (6), donde se retira. Después de salir del paquete de CPI, el agua se mueve hacia arriba y fluye sobre una presa ajustable (7) hacia la caja de recolección de extracción de agua. Una salida de extracción de aceite secundaria (8) está ubicada sobre la salida de agua. Una tapa con junta (9) permite el funcionamiento de la manta de gas. También se suministra con una boquilla de ventilación de tamaño adecuado (10)²².

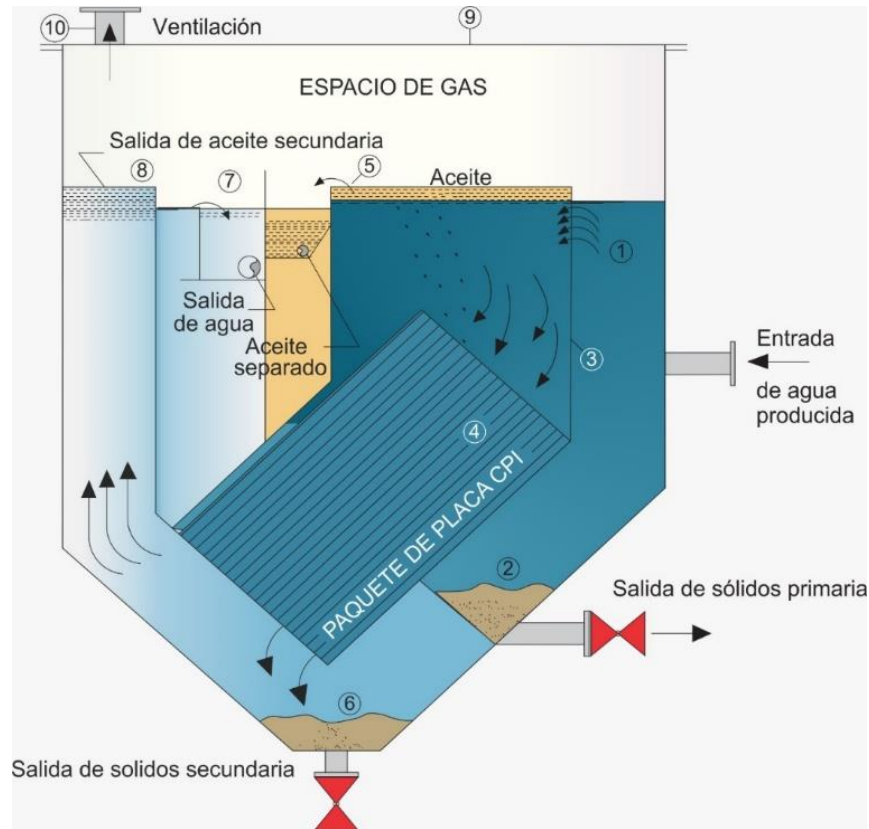
Figura 3. Paquete de platos de un CPI



Fuente: ARNOLD, Ken; STEWART Maurice. Emulsions and Oil Treating Equipment: Selection, Sizing and Troubleshooting. [En línea]. Gulf Professional Publishing Elsevier, Houston, Texas: Diciembre, 2008. p. 144. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/B978-0-7506-8970-0.X0001-1>

²² ARNOLD, Ken & STEWART Maurice. Op Cit.

Figura 4. Esquema de un CPI de flujo descendente

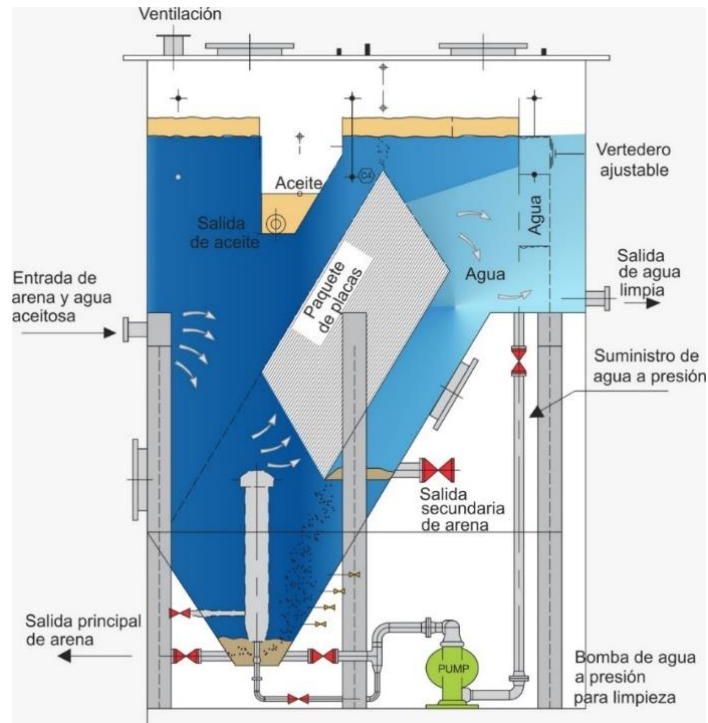


Fuente: ARNOLD, Ken; STEWART Maurice. Emulsions and Oil Treating Equipment: Selection, Sizing and Troubleshooting. [En línea]. Gulf Professional Publishing Elsevier, Houston, Texas: Diciembre, 2008. p. 144. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/B978-0-7506-8970-0.X0001-1>

La experiencia ha mostrado que la arena mojada de aceite se puede adherir a una pendiente de 45°. Por lo tanto, la arena se puede adherirse y obstruir los platos. Además, los canales de recolección de arena instalados al final del paquete de platos causan turbulencia que afecta el proceso de tratamiento y están ellos mismos expuestos a taponamiento de arena. Para eliminar los problemas anteriores, puede ser usado una unidad de CPI de flujo ascendente, empleando platos corrugados, espaciados a mínimo 1 pulgada (2.5 cm) con un ángulo de inclinación de 60°²³. La figura 5 muestra un esquema típico de un CPI de flujo ascendente.

²³ *Ibíd.*, p. 145.

Figura 5. Esquema de un CPI de flujo Ascendente



Fuente: ARNOLD, Ken; STEWART, Maurice. Emulsions and Oil Treating Equipment: Selection, Sizing and Troubleshooting. [En línea]. Gulf Professional Publishing Elsevier, Houston, Texas: Diciembre, 2008. p. 145. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/B978-0-7506-8970-0.X0001-1>

A la hora de escoger un tipo de unidad de CPI para realizar su respectivo diseño, se debe tener en cuenta las siguientes consideraciones con respecto a la dirección de flujo²⁴:

- **Flujo descendente:** Para la eficiencia de remoción de aceite esta configuración es preferida. En este caso el paquete de platos es inclinado en un ángulo de 45°, con tal que el contenido de sólidos no sea significativo.

²⁴ *Ibíd.*, p. 149.

- **Flujo ascendente:** Si la corriente de producción contiene una significativa cantidad de partículas sólidas, estos tipos de CPI con los paquetes inclinados a 60° a lo horizontal son los preferidos. La inclinación más alta de platos brinda alrededor de 25% mayor fuerza de separación y un 30% menor tasa de erosión que la inclinación de platos estándar de 45° de inclinación.

Los separadores interceptores de placas corrugadas tienen otras ventajas además de las mencionadas durante el desarrollo de esta sección. Entre ellas se puede identificar las siguientes²⁵:

- Pueden aceptar medianamente altas concentraciones de aceite o sólidos en alimentación de entrada. El flujo de entrada de aceite puede tener una concentración de hasta 3000 mg/l, mientras el contenido de sólidos hasta 110 ppm.
- Pueden separar gotas de aceite de hasta 30 µm.
- Tiene una tasa de remoción de arena de 10:1; si una unidad CPI captura gotas de aceite de 50 µm, también capturará partículas sólidas tan pequeñas como 5 µm.
- Son totalmente cerrados, de ese modo se elimina las pérdidas de vapor y se reduce los peligros de incendios.
- No tienen partes móviles y no requieren energía.
- Son fáciles de cubrir, debido a su pequeño tamaño, y retienen vapores de hidrocarburos.
- Son fáciles de instalar en un recipiente a presión, lo cual ayuda a retener vapores de hidrocarburos y protege contra la sobrepresión debido a fallas de una válvula de control de nivel aguas arriba.

²⁵ *Ibíd.*, p. 149.

2.1.3. Hidrociclón Los ciclones son dispositivos simples utilizados para separar una fase dispersa de una fase continua basada en la fuerza centrífuga. Cuando la fase primaria es un líquido, el dispositivo se llama hidrociclón²⁶. Los hidrociclones de separación de aceite se utilizan ampliamente en la producción de petróleo en alta mar para el tratamiento eficiente de grandes volúmenes de agua producida. Basado en la física de la separación por gravedad mejorada y la acción de vórtice libre, el hidrociclón tiene una entrada cilíndrica seguida de un tubo cónico con los líquidos que entran a través de las entradas tangenciales. Estas fuerzas, combinadas con las presiones diferenciales establecidas en el hidrociclón, permiten que la fase pesada salga en el flujo inferior mientras que la fase más ligera cae en flujo inverso y sale del desbordamiento en el extremo opuesto²⁷. El mecanismo de separación dentro de un hidrociclón se rige por La ley de Stokes. Sin embargo, en un hidrociclón, la fuerza gravitacional es de órdenes de magnitud (entre 1000–2000 gs) más alta que la disponible en equipos convencionales de separación por gravedad²⁸.

El hidrociclón (liner) se compone de las siguientes cuatro secciones: una cámara de remolino cilíndrica, una sección reductora concéntrica, una sección cónica fina y una sección de cola cilíndrica. Estos se encuentran contenidos dentro de un recipiente a una determinada presión o dentro de una coraza. El agua aceitosa ingresa a la cámara cilíndrica del remolino a través de una boquilla de entrada tangencial, creando un vórtice de alta velocidad con un núcleo central de flujo inverso. El fluido se acelera a medida que fluye a través de la sección reductora concéntrica y la sección cónica fina. El fluido luego continúa a una velocidad constante a través de la sección cilíndrica de la cola. Las gotas de aceite más

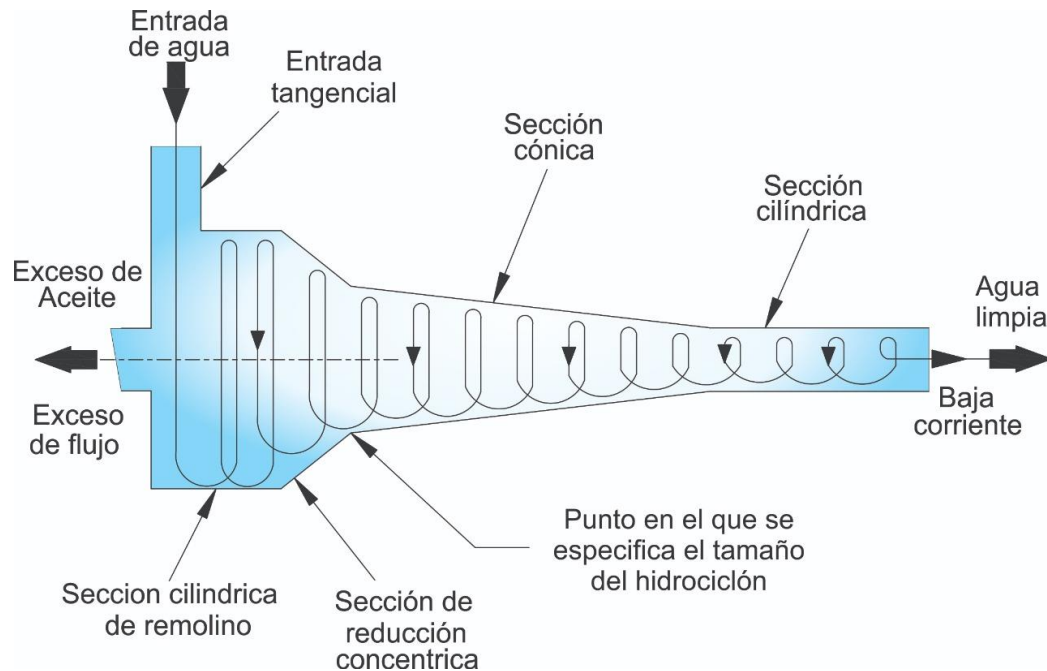
²⁶ Kharoua N.; Khezzar L.; Nemouchi Z. Hydrocyclones for Deoiling Applications—A Review. En: Petroleum Science and Technology. [En línea]. Abu Dhabi: 2010, Vol. 28, no.7. p. 738-755. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1080/10916460902804721>

²⁷ CAMERON. VORTOIL Deoiling Hydrocyclones Proven efficient separation systems. [En línea]. USA, 2010. Disponible en: <https://www.slb.com/-/media/files/osf/product-sheet/vortoil-ps.ashx>

²⁸ ARNOLD, Ken; STEWART, Maurice. Op Cit.

grandes se separan del fluido en la sección cónica fina, mientras que las gotas más pequeñas se eliminan en la sección de la cola. Las fuerzas centrípetas hacen que las gotas de densidad más ligera se muevan hacia el núcleo central de baja presión, donde se produce el flujo axial inverso. El aceite se elimina a través de un puerto de rechazo de diámetro pequeño ubicado en la cabeza del hidrociclón. El agua limpia se elimina a través de la salida aguas abajo²⁹. En la figura 7 se identifica las secciones del hidrociclón, mientras que en la figura 8 muestra un recipiente que contiene un conjunto de liners.

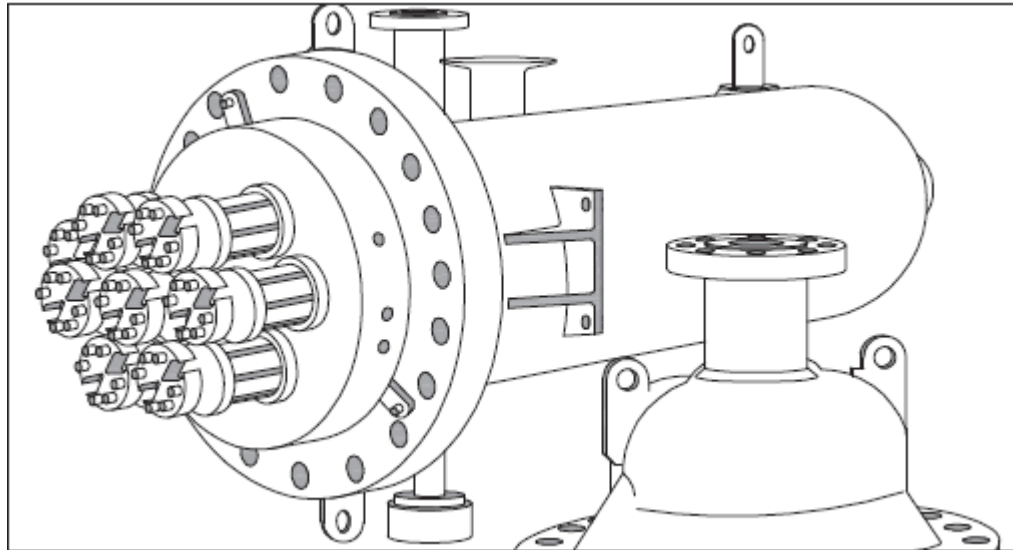
Figura 6. Partes de un hidrociclón



Fuente: ARNOLD, Ken; STEWART, Maurice. Emulsions and Oil Treating Equipment: Selection, Sizing and Troubleshooting. [En línea]. Gulf Professional Publishing Elsevier, Houston, Texas: Diciembre, 2008. p. 145. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/B978-0-7506-8970-0.X0001-1>

²⁹ *Ibíd.*, p. 184.

Figura 7. Recipiente con liners.



Fuente: ARNOLD, Ken; STEWART, Maurice. Emulsions and Oil Treating Equipment: Selection, Sizing and Troubleshooting. [En línea]. Gulf Professional Publishing Elsevier, Houston, Texas: Diciembre, 2008. p. 145. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/B978-0-7506-8970-0.X0001-1>

Un hidrociclón puede orientarse horizontal o verticalmente, aunque la orientación horizontal es más común. La orientación horizontal requiere más área del plano, pero es más conveniente para mantenimiento (se requiere un espacio de alrededor de 42 pulgadas para retirar liners del recipiente). La energía requerida para lograr la separación es proporcionada por la presión diferencial a través del ciclón. Un mínimo de 100 psi es generalmente necesario. Las presiones más altas son preferibles. El flujo de rechazo es del orden de 1–3 vol. % de la entrada. Solo alrededor del 10% (por volumen) de la corriente de rechazo es aceite, el resto es agua. El flujo de rechazo puede dirigirse de nuevo al separador a través de una bomba de cavidad progresiva de baja cizalla. Cabe señalar, sin embargo, que en ciertas aplicaciones de campo los productos químicos del campo petrolífero han provocado la hinchazón del estator de goma de estas bombas, lo que lleva a un

rendimiento deficiente. En tales situaciones, una bomba centrífuga de una sola etapa de baja velocidad con un impulsor abierto puede ser adecuada³⁰.

Muchas instalaciones de hidrociclones incluyen típicamente un recipiente de desgasificación aguas abajo de la salida de agua limpia. El recipiente proporciona un corto tiempo de residencia que sirve esencialmente como una sola unidad de flotación de gas. El recipiente también proporciona un volumen de captura de aceite en caso de grandes perturbaciones y tiempo de residencia adicional para productos químicos para el rompimiento de emulsiones³¹.

Los hidrociclones básicamente deben cumplir una serie de requisitos para tener un óptimo desempeño, para ello se debe generar un remolino con bajo efecto de cizallamiento, que mantenga el flujo de remolino durante un tiempo suficiente, minimizando el flujo de salida enriquecido con aceite, minimizando la caída de presión y manteniendo los costos operativos razonables. Así mismo, tienen muchas ventajas en comparación con otros dispositivos de separación; Es decir, tiempo de retención corto (del orden de 1 a 2 s), alta fuerza centrífuga generada (10^2 - 10^3 veces la aceleración de la gravedad), tamaño de gota pequeña separada (igual o superior a 10 μ m), compactos, bajos costos de fabricación y mantenimiento, insensibilidad a la orientación, una forma relativamente modesta y rara vez se necesitan productos químicos, y no hay procesamiento posterior, excepto cuando las normas Las limitaciones no se logran en la salida de desagüe de la hidrociclón³².

El indicador de rendimiento más importante y utilizado es la eficiencia de separación. La definición de la eficiencia de separación, varía según a la obligación de hidrociclones. Para la eliminación de aceite, el interés es minimizar la cantidad

³⁰ *Ibíd.*, p. 186.

³¹ *Ibíd.*, p. 187.

³² Kharoua N.; Khezzar L.; Nemouchi Z. Hydrocyclones for Deoiling Applications—A Review. Op Cit

de petróleo presente en El flujo de agua limpia. Este parámetro se puede expresar de la siguiente manera³³:

$$\epsilon = \frac{Q_o C_o}{Q_i C_i} \quad (\text{Ecuación 2})$$

Aplicando el balance de masa, la expresión eficiencia de separación se expresa:

$$\epsilon = \frac{Q_i C_i - Q_u C_u}{Q_i C_i} = 1 - \frac{Q_u C_u}{Q_i C_i} \quad (\text{Ecuación 3})$$

Donde Q_i , Q_o y Q_u son la tasa de flujo a la entrada, el flujo inverso y el flujo a la salida respectivamente, asumiendo que $Q_o \ll Q_i$ y así $Q_u \approx Q_i$ la expresión de eficiencia de separación puede simplificarse a:

$$\epsilon = 1 - \frac{C_u}{C_i} \quad (\text{Ecuación 4})$$

Las concentraciones de aceite y la distribución del tamaño de las gotas se han medido para calcular la eficiencia de separación. Las mediciones previas de concentración se basan casi totalmente en muestras isocinéticas analizadas mediante dispersión de luz láser, utilizando contador Coulter o analizador basado en infrarrojo. Las distribuciones de tamaño de gota se han miden en línea usando interferometría láser para aceite concentraciones de hasta 5,000 ppm e interferometría ultrasónica para concentraciones más altas³⁴.

La eficiencia de remoción de aceite es función de una serie de variables, las cuales se nombran a continuación³⁵:

³³ *Ibíd.*, p. 742.

³⁴ *Ibíd.*, p. 743.

³⁵ HAYES, J.J; CARROLL, W.C.; FOTHERGILL, DW.J. Hydrocyclones for treating oily water: development and field testing in Bass Strait. [En línea]. Houston, Texas: Mayo, 1985. Disponible en: <https://www.onepetro.org/conference-paper/OTC-5079-MS>

- **Gravedad específica:** La fuerza motriz para la separación de las fases de agua y aceite es la diferencia en sus gravedades específicas. Cuanto mayor sea esta diferencia, más eficiente será el proceso de separación.
- **Tamaño de gota** La velocidad de asentamiento o separación es una función del tamaño de la gota. Grandes gotas de aceite son más fácilmente separadas de la fase de agua y la eficiencia de separación es mayor. Muy pequeñas gotas pueden formar emulsiones aceite en agua y obstaculizar la separación.
- **Temperatura:** La temperatura de la corriente de agua aceitosa determina la viscosidad de las fases de agua y aceite. A altas temperaturas, las viscosidades y velocidad de separación son bajas y por eso la eficiencia de separación se incrementa.
- **Tasa de flujo:** La intensidad de las fuerzas centrífugas inducidas en el hidrociclón es una función del caudal. A bajas tasas de flujo no hay suficiente velocidad de entrada para establecer el vórtice y la eficiencia de separación es baja. Una vez el vórtice es establecido, la eficiencia aumenta lentamente en función de caudal hasta el punto donde la presión en el núcleo se acerca a la atmosférica, lo que dificulta el flujo de aceite de la salida corriente arriba y haciendo que la eficiencia disminuya.
- **Configuración:** Las cámaras de separación pueden ser operadas en paralelo para aumentar la capacidad de una instalación por encima de la limitación de la tasa máxima de flujo de una sola cámara., aumentando la probabilidad de que pequeñas gotas de aceite sean separadas e incrementa la eficiencia global.

- **Relación de rechazo:** se define como la relación del volumen de aceite y agua que se descarga proveniente de aguas arriba o el flujo rechazado al volumen de efluente de agua limpia, expresado como un porcentaje. Para optimizar la eficiencia, la unidad debe ser operada con una relación de rechazo suficientemente alta para maximizar el volumen de aceite eliminado sin arrastrar demasiada agua. Típicamente, la proporción óptima es entre 1% y 3%. La operación por debajo de la relación de rechazo óptima resultará en una baja eficiencia de eliminación de aceite. La operación por encima de la relación de rechazo óptima no afecta la eficiencia de remoción de aceite, pero aumenta la cantidad de líquido que debe ser reticulado. a través de la instalación³⁶.

Otra variable presente y no menos importante que interviene en la eficiencia de separación de aceite es la relación de caída de presión (PDR). Este término se refiere a la relación de la diferencia de presión entre la entrada y la salida de rechazo, y la diferencia de presión entre la entrada y la salida de agua. Un PDR de entre 1.4 y 2.0 suele ser deseado³⁷.

Por otro lado, existe un aspecto relevante cuando se piensa implementar una unidad de estas al sistema de tratamiento de agua producida, dicho punto es la geometría de liner o hidrociclón. Este aspecto varía según el tipo de hidrociclón que se escoja. En la tabla 4 se puede apreciar la relación de las dimensiones según el modelo de hidrociclón y el año en el que se han ido presentado en la historia. En la figura 9 se muestra el esquema con cada una de las dimensiones del hidrociclón.

³⁶ ARNOLD, Ken; STEWART, Maurice. Op Cit.

³⁷ *Ibíd.*, p. 187.

Tabla 2. Dimensiones de los hidrociclones según el modelo

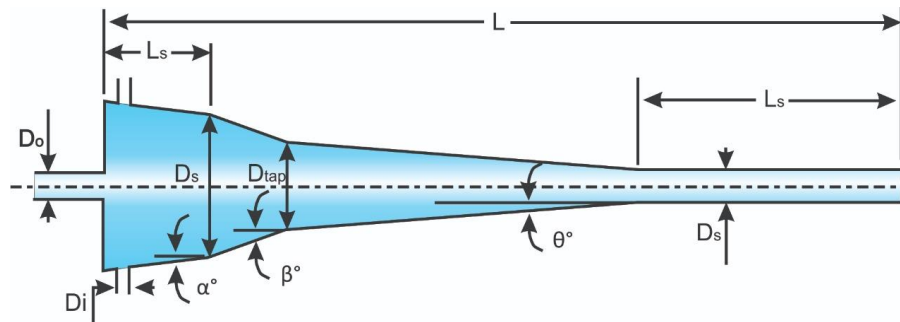
Dimensiones geométricas de los modelos										
D_{tap}	D_o	D_i	D_t	L_s	L_t	L	α	β	Θ	Modelo
0.5	≤ 0.07	0.175	0.25	1	10	~ 22.5	0	10	0.75	Colman & Thew (1983)
0.75	≤ 0.07	$(D_s/12) \times 0.5$	0.25	0.5	10	21	0	10	0.75	Hargreaves & Silvester (1990)
-	0.039	0.25	0.33	0-2	9	-	0	6	-	Young et al (1994)
-	0.24	0.24	0.22	1	13.5	21	0	6	-	Wesson & Petty (1994)
0.75	-	Más largo que el primer diseño	0.375	0.375	10	26-33	0	10	0.75	Thew (2000) única entrada
0.475	0.2-0.6	~ 0.15	~ 0.24	~ 0.36	~ 4.7	~ 13	< 10	10	1	Belaidi & Thew (2003)

Fuente: WALSH, John. Hydrocyclone webinar. [En línea]. Diciembre, 2013. p. 17. Disponible en: <https://docplayer.net/35414869-Hydrocyclone-webinar-john-walsh-phd-cetco-energy-services-dec-2013.html>

Nota: todos los valores fueron normalizados a partir de D_s . El modelo de Colman & Thew usó $D_s=2D_{tap}$ y valores de D_{tap} de 30 a 58 mm (1.18 - 2.28 in)³⁸.

³⁸ WALSH, John. Hydrocyclone webinar. [En línea]. Diciembre, 2013. Disponible en: <https://docplayer.net/35414869-Hydrocyclone-webinar-john-walsh-phd-cetco-energy-services-dec-2013.html>

Figura 8. Esquema de las dimensiones de un hidrociclón.



Fuente: Kharoua N.; Khezzar L.; Nemouchi Z. Hydrocyclones for Deoiling Applications—A Review. En: Petroleum Science and Technology. [En línea]. Abu Dhabi: 2010, Vol. 28, no.7. p. 746. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1080/10916460902804721>

Además, existen algunas consideraciones presentadas por diferentes autores con respecto a las características geométricas del hidrociclón, entre las cuales se incluyen la entrada, la sección cilíndrica, la sección cónica y el tubo de escape. A continuación, se hace una breve descripción de las partes anteriormente mencionadas³⁹:

- **Entrada:** El tamaño y la forma de la entrada tienen un efecto considerable en el comportamiento del campo de flujo. Investigaciones han encontrado que una relación del diámetro de entrada al diámetro de referencia (diámetro de la unión de las dos secciones cónicas) igual a 0.25 fue el óptimo y las proporciones más grandes podrían dar una mejor eficiencia de separación, pero necesitaban mayores tasas de flujo. Esta parte del hidrociclón es conocida por ser una región de alta turbulencia.
- **Sección cilíndrica:** Se necesita una sección cilíndrica para evitar una región de alto cizallamiento aguas abajo de la entrada y para reducir la pérdida de cabeza.

³⁹ Kharoua N.; Khezzar L.; Nemouchi Z. Hydrocyclones for Deoiling Applications—A Review. Op Cit.

- **Secciones cónicas:** Hay dos opciones disponibles; hidrociclones de cono único y bi-cono. Para el cono único el diseño de un valor de 6° fue recomendado como un ángulo de cono óptimo. El hidrociclón bi-cono del grupo Southampton tuvo una primera sección cónica corta y empinada con un ángulo de 20°, que tenía el papel de acelerar el flujo de remolinos, y una segunda sección cónica más larga y fina con un ángulo de 1.5 ° para aumentar el tiempo de residencia.
- **Tubo de escape (sección de cola cilíndrica):** Un tubo de escape prolongado conectado a la última sección cónica permite la separación de gotas más finas que escapan del efecto remolino en las regiones superiores. Sin embargo, un tubo de escape muy largo (más de 40 o 50 veces el diámetro de referencia) afecta la ventaja del hidrociclón de la compacidad.

2.1.4. Skim vessel y tanques desnatadores

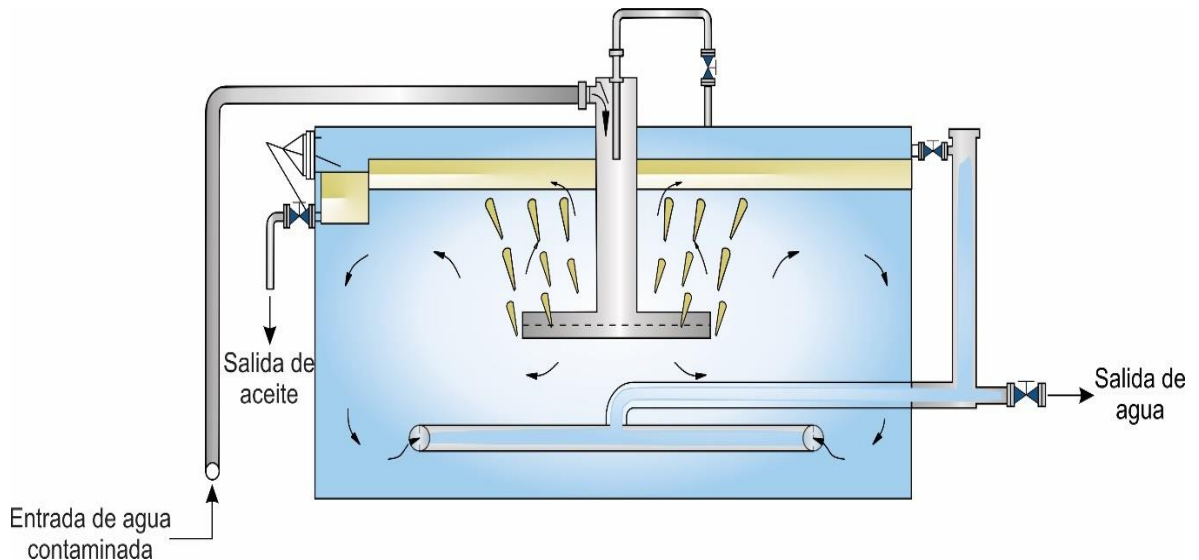
2.1.4.1. Skim Tank (Tanque desnatador) Son los equipos más simples y los más utilizados para remover el aceite que se encuentra disperso en el agua. Son simplemente equipos que proporcionan tiempo de retención para que el aceite libre tenga tiempo de ascender a la superficie donde puede ser eliminado y separado. Los skim tank son usados principalmente para separar gran parte de aceite libre que este disperso en el agua y son usados frecuentemente aguas arriba de otro equipo que remueva también el aceite.⁴⁰

La forma más simple de un equipo de tratamiento primario de agua de producción es un tanque o recipiente desnatador (limpiador). Estos equipos están usualmente diseñados para permitir tiempos de retención extensos, en los cuales la

⁴⁰ PATTON, Charles C. Applied water technology. En: Water processing technology: Suspended oil removed. [En línea]. Campbell Petroleum Series. Dallas, USA: Septiembre, 1995. Disponible en: https://kupdf.net/download/dr-charles-c-patton-applied-water-technology-bookos-org_58f9f333dc0d60c850959eae_pdf

coalescencia y la fuerza de gravedad actúan sobre el fluido permitiendo así la separación de fases en este caso del aceite y el agua. Los tanques desnatadores pueden ser usados como tanques atmosféricos o recipientes de presión.

Figura 9. Esquema de un tanque desnatador



Fuente: ARNOLD, Ken; STEWART, Maurice. Produced Water Treatment Systems. En: Emulsions and Oil Treating Equipment: Selection, Sizing and Troubleshooting. [En línea]. Gulf Professional Publishing Elsevier, Houston, Texas: Diciembre, 2008. p. 107-211. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/B978-0-7506-8970-0.X0001-1>

En la mayoría de los casos la terminología utilizada para describir los diferentes equipos es a menudo una fuente de gran confusión, por ello es importante aclarar las funciones de cada uno de los tanques que se utilizan en el proceso de separación. Un "tanque desnatador" es en la terminología un tanque que se usa para remover el petróleo disperso en otro fluido; por otro lado, es un "tanque de sedimentación", sin embargo, en la terminología es un tanque cuyo propósito principal es remover los sólidos arrastrados y por último, los "tanques de lavado" funcionan como un golpe de ariete o cañón de agua libre y se usan cuando la corriente entrante contiene 10-90% de aceite. Están diseñados para hacer sólo una

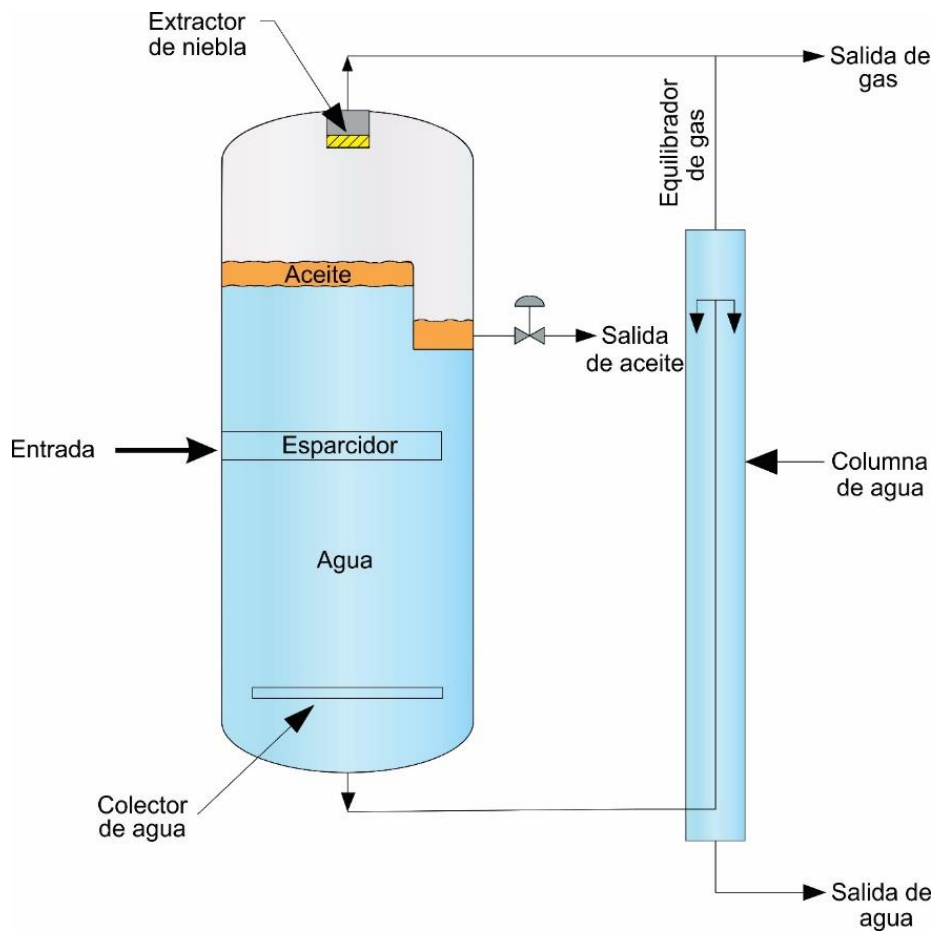
separación aproximada del aceite y el agua. El agua de los tanques de lavado es generalmente enviada a un tanque desnatador u otra unidad para eliminar el aceite restante.

Respecto a los skim vessel (recipientes desnatadores), estos pueden ser de configuración vertical u horizontal.

2.1.4.2. Skim Vessel Vertical: En los skimmers verticales las gotas de aceite deben subir en contracorriente con el flujo descendente del agua. Algunos skimmers verticales tienen separadores de entrada y colectores de salida para ayudar a equilibrar la distribución del flujo, como se muestra en la Figura 10. El aceite, el agua y cualquier gas de combustión ingresan por la parte inferior de la interface aceite-agua donde pequeñas cantidades de gas se liberan del agua ayudan a "flotar" las gotas de aceite. En la zona de reposos entre el esparcidor y el colector de agua, puede producirse cierta coalescencia, y la flotabilidad de las gotitas de aceite hace que se eleven en contra del flujo de agua. El aceite será recogido y desnatado de la superficie.

El grosor de la capa de aceite depende de la altura relativa de la acumulación de aceite, la columna de agua y de la diferencia de gravedad específica de los dos líquidos. A menudo, se utiliza un controlador de nivel de interfaz en lugar de la columna de agua.

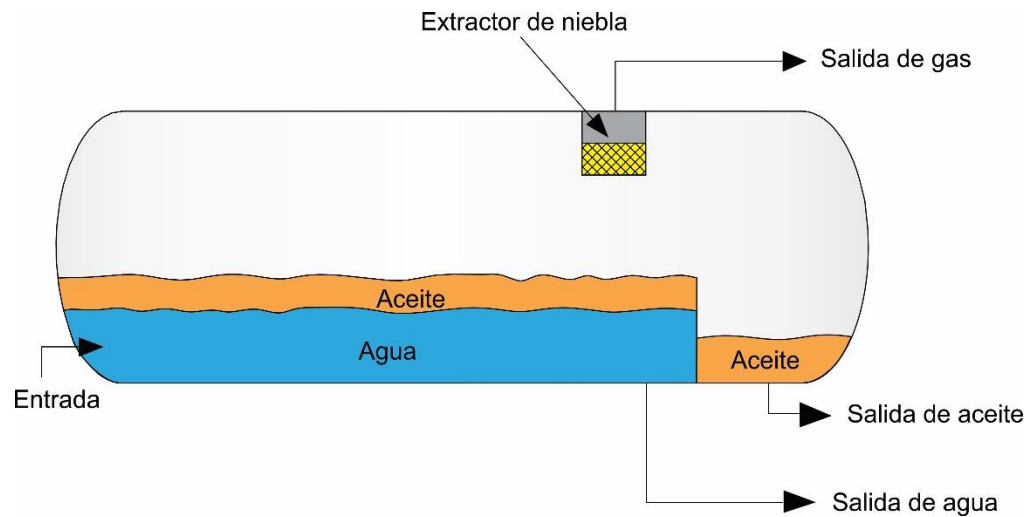
Figura 10. Skim vessel vertical



Fuente: ARNOLD, Ken; STEWART, Maurice. Produced Water Treatment Systems. En: Emulsions and Oil Treating Equipment: Selection, Sizing and Troubleshooting. [En línea]. Gulf Professional Publishing Elsevier, Houston, Texas: Diciembre, 2008. p. 107-211. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/B978-0-7506-8970-0.X0001-1>

2.1.4.3. Skim vessel horizontal En los skimmers horizontales, las gotas de aceite se elevan perpendiculares al caudal del agua, como se muestra en la figura 11. La entrada se encuentra en la sección de agua para que los gases destilados puedan actuar como una unidad de flotación de gas disuelto. El agua fluye horizontalmente durante la mayor parte de la longitud del recipiente.

Figura 11. Skim vessel horizontal.



Fuente: ARNOLD, Ken; STEWART, Maurice. Produced Water Treatment Systems. En: Emulsions and Oil Treating Equipment: Selection, Sizing and Troubleshooting. [En línea]. Gulf Professional Publishing Elsevier, Houston, Texas: Diciembre, 2008. p. 107-211. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/B978-0-7506-8970-0.X0001-1>

Se pueden instalar deflectores para corregir el flujo. Las gotas de aceite se unen en la sección inferior del recipiente y suben a la superficie de agua-aceite, donde son capturadas y eventualmente desnatadas sobre el vertedero de aceite. La altura de la capa de aceite puede ser controlada por un nivel de interface.

Los recipientes horizontales son más eficientes en el tratamiento de agua porque las gotas de aceite no tienen que fluir a contracorriente del flujo de agua. Sin embargo, los desnatadores verticales se utilizan en los casos en que:

1. Se debe manipular la arena y otras partículas sólidas. Esto puede hacerse en recipientes verticales con la salida de agua o con un drenaje de arena en el fondo.
2. Si se espera que haya grandes caudales de líquido, los recipientes verticales son menos susceptibles a la formación de olas internas ya que las sobretensiones que

se dan en los recipientes horizontales pueden disparar un flotador generando un dato de nivel erróneo, aunque el volumen de líquido entre el nivel normal de operación y el apagado por alto nivel sea igual o mayor que el de un recipiente vertical. Esta posibilidad puede ser minimizada a través de la instalación de deflectores en el recipiente. Debe notarse que los recipientes verticales tienen algunas desventajas que no están relacionadas con el proceso y que deben ser consideradas al hacer una selección. Por ejemplo, la válvula de alivio y algunos de los controles pueden ser difíciles de mantener sin plataformas de acceso y escaleras especiales.⁴¹

2.2. SISTEMA DE TRATAMIENTO SECUNDARIO

2.2.1. Sistema de flotación por gas. Las unidades de flotación son los únicos equipos de tratamiento de agua de uso común, que no depende de la separación por gravedad de las gotas de aceite de la fase acuosa. Las unidades de flotación emplean un proceso en el que las finas burbujas de gas se generan y se dispersan en el agua, donde se adhieren a gotas de aceite y/o partículas sólidas. Las burbujas de gas entonces se elevan a la interface vapor-líquido como espuma aceitosa, que luego es desnatada de la interface del agua, recuperando y luego reciclando para más procesamiento.⁴² Sin embargo, en procesos de flotación específicos (por ejemplo, el tratamiento de agua producida), no se prefiere el aire debido a la presencia de oxígeno en el aire que podría conducir a la posible precipitación de metales y a la explosión. El metano se utiliza generalmente en los sistemas de flotación de agua producida debido a su disponibilidad y compatibilidad con la solución. Aparte de estos gases, el nitrógeno y el dióxido de carbono también se utilizan en algunos procesos específicos de flotación por gas. La adhesión de las

⁴¹ ARNOLD, Ken; STEWART, Maurice. Op Cit

⁴² *Ibíd.*, p. 168.

burbujas de gas con partículas finas (por ejemplo, sólidos en suspensión, aceite, etc.) forma aglomerados más ligeros que pueden flotar fácilmente y ser desnatados de la superficie superior. Wang et al (Wang et al., 2010) resumieron los cuatro pasos clave del sistema de flotación de gas:

1. **Generación de burbujas de gas:** El tamaño y volumen de las burbujas de gas generadas con respecto a la concentración de petróleo y el tamaño de las gotas son muy importantes para la formación de una aglomeración estable de burbujas, partículas sólidas y aceite. Las burbujas grandes y el bajo volumen de gas generalmente conducen a una baja eficiencia de remoción.
2. **Contacto entre las burbujas de gas y las gotas de aceite:** se requiere una colisión frecuente entre las burbujas de gas y las gotas de aceite para promover el acoplamiento o adhesión de la gota con la burbuja.
3. **Fijación de las burbujas de gas:** Es importante establecer una fuerte adhesión entre las burbujas de gas y las gotas de aceite para generar la fuerza de flotación requerida. Una adhesión inadecuada o débil conduce a una menor eficiencia en la separación de aceite y agua.
4. **El aumento de los agregados y el desnatado de los lodos.** Los agregados flotantes forman una espuma cargada de contaminantes que debe ser desnatada para asegurar un proceso de separación continuo.

Los sistemas de flotación de gas inducido y disuelto son las dos tecnologías de flotación más utilizadas. Ambos métodos son muy efectivos en la flotación de pequeñas partículas suspendidas, materia orgánica, aceite y grasa. Se ha reportado que partículas tan finas como 3 μm pueden ser removidas con la ayuda de la coagulación. Estos sistemas se utilizan normalmente para tratar los residuos de afluentes que tienen una concentración de aceite inferior a 1000 mg L⁻¹.

Existen dos métodos por el cual se lleva a cabo el sistema de flotación, estos son flotación por gas inducido (IGF) y flotación con gas disuelto (DGF). Los sistemas de flotación de gas inducido y disuelto son las dos tecnologías de flotación más utilizadas. Ambos métodos son muy efectivos en la flotación de pequeñas partículas suspendidas, materia orgánica, aceite y grasa. Se ha reportado que partículas tan finas como 3 μm pueden ser removidas con la ayuda de la coagulación. Estos sistemas se utilizan normalmente para tratar los residuos de afluentes que tienen una concentración de aceite inferior a 1000 mg/L⁴³

2.2.1.1. Sistema de flotación por gas inducido (IGF) La flotación de gas inducido (IGF) o, también conocido como sistema de flotación de gas disperso, opera induciendo y dispersando burbujas de gas en la corriente total,⁴⁴ mediante el uso de un dispositivo inductor hidráulico o mediante un vórtice establecido por rotores mecánicos, Hay muchos diseños patentados de diferentes de unidades de flotación por gas inducido pero todos requieren un medio para generar burbujas de gas de tamaño y distribución favorables en el flujo de la corriente, luego se produce una región donde se mezclan dos fases causando una colisión entre las burbujas de gas y las gotas de aceite, otra región de flotación o separación que permite que las burbujas de gas suban a la superficie, y un medio para sacar la espuma aceitosa de la superficie. Estos procesos y las regiones anteriormente descritas se evidencian en la siguiente imagen donde:

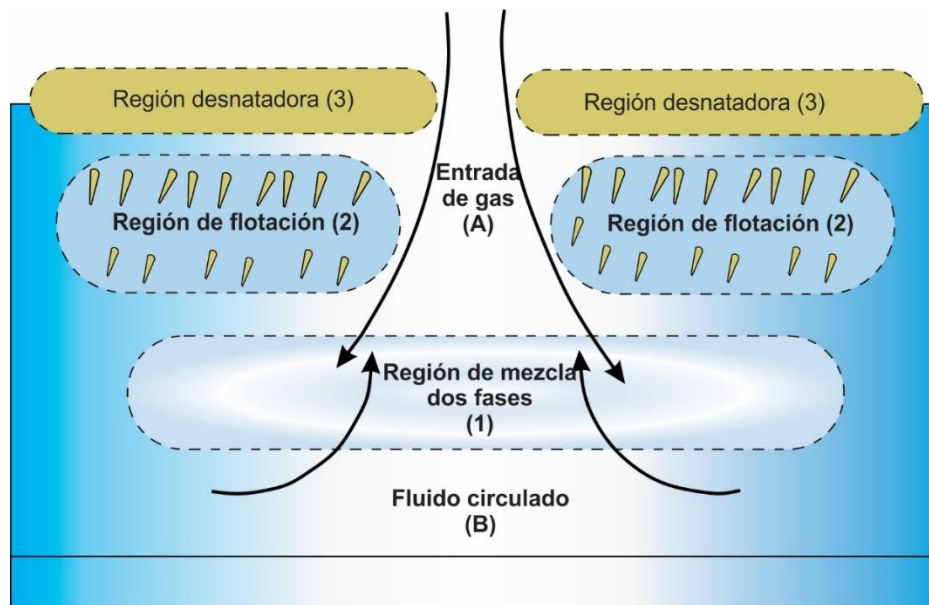
- (A) Vía de circulación del gas y vía de circulación del fluido (B) (generación de burbujas).

⁴³ SATHTHASIVAM, Jayaprakash; LOGANATHAN, Kavithaa; SARP, Sarper. An over view of oil-wáter separation using gas flotation systems. En: Journal Industrial and engineering chemistry. [En línea]. Qatar, Elsevier, 2015, Vol. 144, p. 671-680. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.chemosphere.2015.08.087>

⁴⁴ *Ibíd.*, p. 672.

- (1) Región de mezcla bifásica (fijación de las gotas de aceite a las burbujas),
- (2) Región de flotación (separación) ascenso de las burbujas a la superficie aplicando la ley de Stokes.
- (3) Región de desnatado (colapso de la burbuja y separación del petróleo).⁴⁵

Figura 12. Regiones de la celda de flotación.



Fuente: ARNOLD, Ken; STEWART, Maurice. Produced Water Treatment Systems. En: Emulsions and Oil Treating Equipment: Selection, Sizing and Troubleshooting. [En línea]. Gulf Professional Publishing Elsevier, Houston, Texas: Diciembre, 2008. p. 107-211. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/B978-0-7506-8970-0.X0001-1>

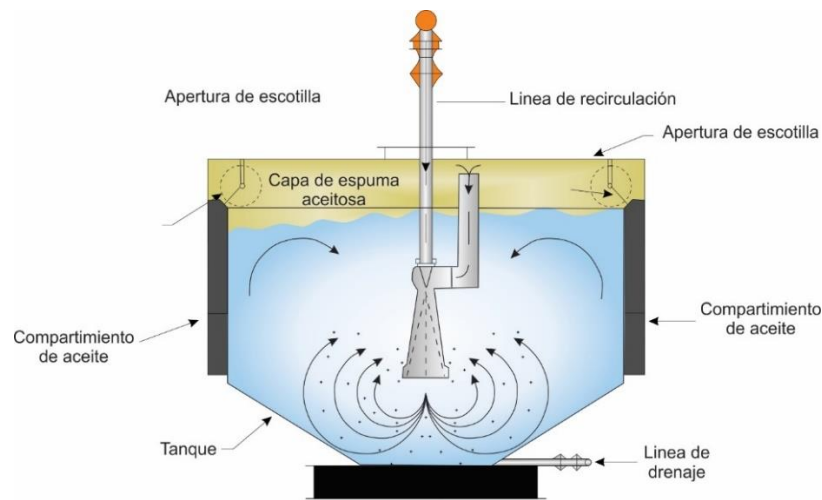
Este sistema de flotación por gas inducido puede ser llevado a cabo de dos maneras distintas, pero con resultados muy similares ya sea con un sistema de flotación hidráulico o con un sistema de flotación mecánico como se muestra a continuación:

⁴⁵ ARNOLD, Ken; STEWART, Maurice. Op Cit.

- Sistema de flotación hidráulico por gas inducido

Este sistema induce burbujas de gas por succión en la zona de baja presión de un tubo de ventilación. La Figura 13 muestra un esquema sección transversal de una unidad de flotación hidráulica inducida, donde agua limpia se bombea a un colector de recirculación que alimenta una serie de eductores Venturi. El agua que fluye a través de los eductores aspiran el gas del espacio de vapor que se libera en la boquilla como un chorro de pequeñas burbujas. Las burbujas se elevan, causando la flotación en la cámara, formando una espuma que es desnatada con una cámara mecánica.

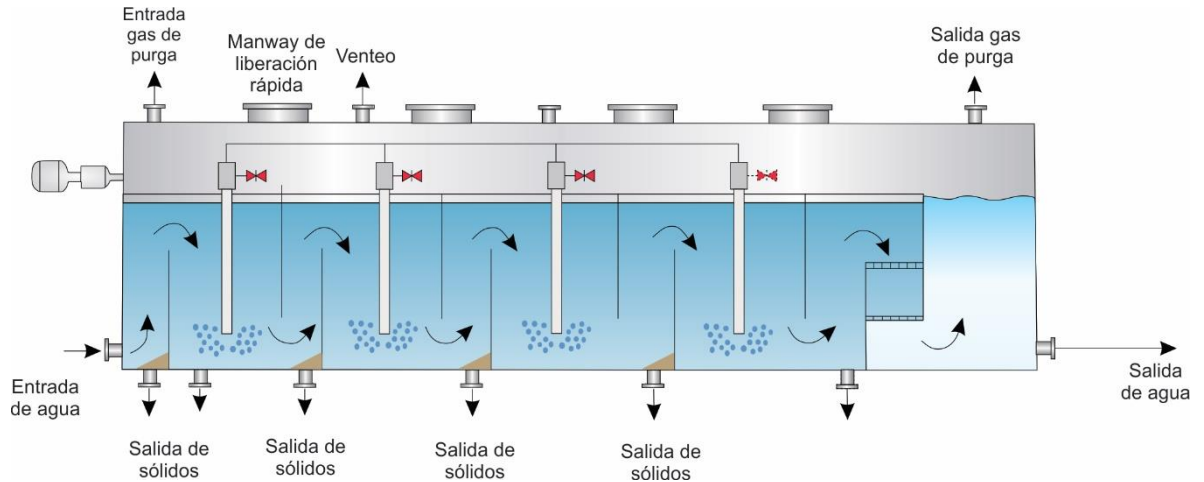
Figura 13. Sección transversal unidad de flotación hidráulica



Fuente: SATHTHASIVAM, Jayaprakash; LOGANATHAN, Kavithaa; SARP, Sarper. An overview of oil-water separation using gas flotation systems. En: Journal Industrial and engineering chemistry. [En línea]. Qatar, Elsevier, 2015, Vol. 144, 671-680. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.chemosphere.2015.08.087>

Las unidades hidráulicas inducidas están disponibles con uno, tres o cuatro celdas. La figura 14 muestra el recorrido del flujo a través de una unidad de tres celdas. Estos dispositivos utilizan menos energía y menos gas que las unidades de rotor mecánico.

Figura 14. Celda de flotación hidráulica



Fuente: ARNOLD, Ken; STEWART, Maurice. Produced Water Treatment Systems. En: Emulsions and Oil Treating Equipment: Selection, Sizing and Troubleshooting. [En línea]. Gulf Professional Publishing Elsevier, Houston, Texas: Diciembre, 2008. p. 107-211. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/B978-0-7506-8970-0.X0001-1>

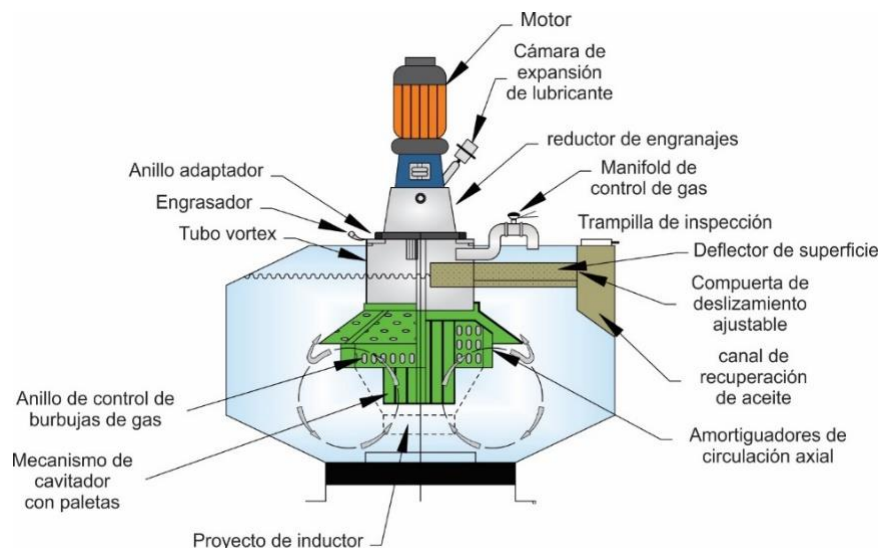
Las unidades hidráulicas inducidas son menos complejas que las unidades mecánicas inducidas, además son capaces de realizar el proceso de flotación por encima de la presión atmosférica. La tasa de reinyección de agua requerida para accionar el eductor varía tanto con la capacidad de diseño de la unidad y entre diferentes fabricantes, pero generalmente es alrededor del 50%. Se debe tener en cuenta que el control del tamaño y distribución de la burbuja es mucho más difícil en este caso comparándolo con las unidades mecánicas y la eficiencia de las etapas para unidades hidráulicas inducidas tienen una tendencia a ser más bajas que los de las unidades mecánicas.⁴⁶

- Sistema de flotación mecánico por gas inducido

⁴⁶ ARNOLD, Ken; STEWART, Maurice. Op Cit.

Esta unidad induce burbujas de gas en el sistema mediante el arrastre de gas en un vórtice generado por una hélice agitada. La Figura 15 muestra una sección transversal de una celda de flotación de gas disperso que utiliza un rotor mecánico. El rotor crea un vórtice y un vacío dentro del tubo del vórtice, las cubiertas aseguran que el gas del vórtice se mezcle y sea arrastrado por el agua; el rotor y el inductor de tiro hacen que el agua fluya como lo indican las flechas en este plano mientras que también crean un movimiento de remolino. Un deflector en la parte superior dirige la espuma a una bandeja de desnatadora como resultado de este movimiento de remolino.

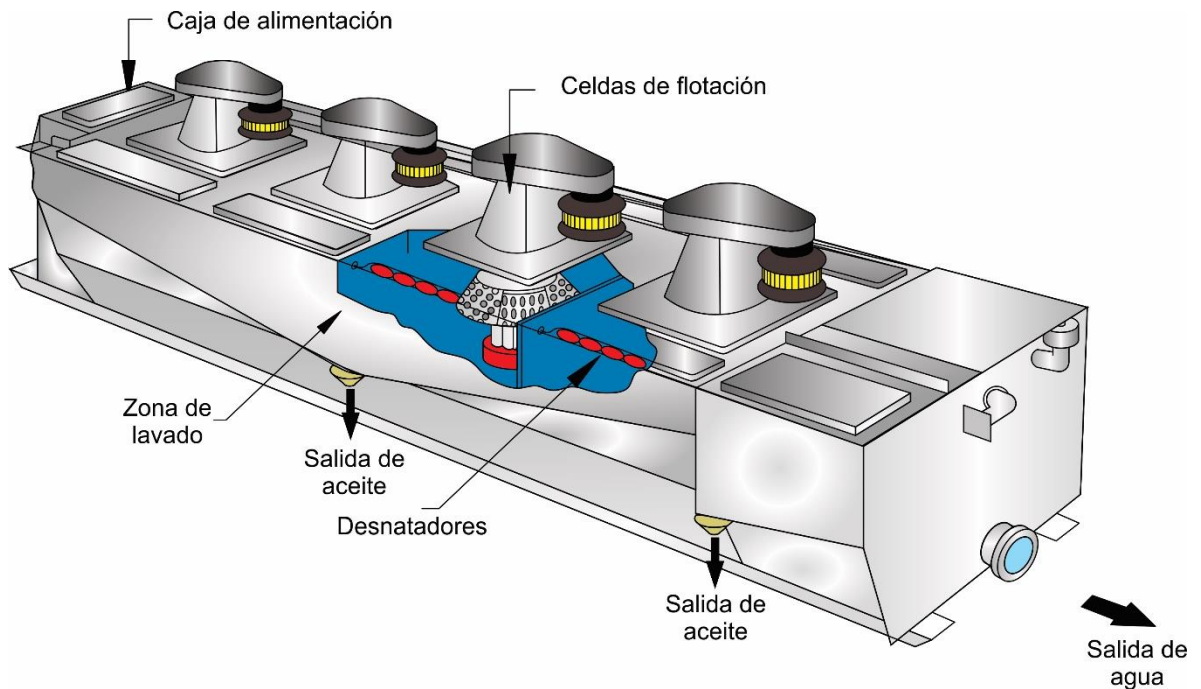
Figura 15. Sección transversal de la unidad mecánica



Fuente: ARNOLD, Ken; STEWART, Maurice. Produced Water Treatment Systems. En: Emulsions and Oil Treating Equipment: Selection, Sizing and Troubleshooting. [En línea]. Gulf Professional Publishing Elsevier, Houston, Texas: Diciembre, 2008. p. 107-211. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/B978-0-7506-8970-0.X0001-1>

La mayoría de las unidades de gas dispersas contienen tres o cuatro celdas. La figura 16 ilustra una unidad de cuatro celdas. El agua con aceite se mueve en serie desde una celda hasta la otra por los deflectores de flujo inferiores.

Figura 16. Celdas de flotación mecánicas.



ARNOLD, Ken; STEWART, Maurice. Produced Water Treatment Systems. En: Emulsions and Oil Treating Equipment: Selection, Sizing and Troubleshooting. [En línea]. Gulf Professional Publishing Elsevier, Houston, Texas: Diciembre, 2008. p. 107-211. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/B978-0-7506-8970-0.X0001-1>

Cada celda contiene un motor y el hardware de generación y distribución de burbujas asociado. Las pruebas de campo han indicado que la alta intensidad de mezcla en cada celda crea el efecto de flujo de tapón del agua con aceite de una celda a la siguiente. Es decir, no hay virtualmente ningún cortocircuito o ruptura de una parte del flujo de entrada a la caja al vertedero de salida.

La complejidad mecánica hace que la flotación mecánica inducida la más intensiva en mantenimiento de todas las configuraciones de flotación de gas. Como resultado de la necesidad de sellos de eje del motor en las penetraciones a la celda, las

unidades de flotación mecánica inducida han operado tradicionalmente muy cerca de la presión atmosférica.⁴⁷

2.2.1.2. Sistema de flotación por gas disuelto (DGF) Mientras que el sistema IGF acelera la velocidad del líquido (por ejemplo, la velocidad radial para el IGF mecánico y la velocidad axial para el IGF hidráulico) para arrastrar y dispersar las burbujas de gas, los sistemas de flotación de gas disuelto (DGF), por otro lado, producen burbujas de gas mediante la manipulación de la presión del fluido. El gas presurizado se disuelve en la fase líquida utilizando⁴⁸ un recipiente "contactor" de alta presión, cuanto más alta sea la presión, más gas puede ser disuelto en el agua. Las burbujas de gas se forman por el flasheo de gas disuelto en el agua producida. Como resultado, las burbujas son mucho más pequeñas (10-100 mm) que para la flotación de gas inducido (100-1000 mm). Por otro lado, los volúmenes de gas están limitados por la solubilidad del gas en el agua y son mucho más bajos que para la flotación de gas disperso.⁴⁹

En cuanto a su funcionamiento el agua saturada de gas se inyecta en la zona de contacto donde se producen colisiones y aglomeraciones de gotas con las burbujas. A continuación, los aglomerados entran en la zona de separación donde tiene lugar la flotación. Se utiliza una espumadera en la superficie del tanque para eliminar la espuma flotante.⁵⁰

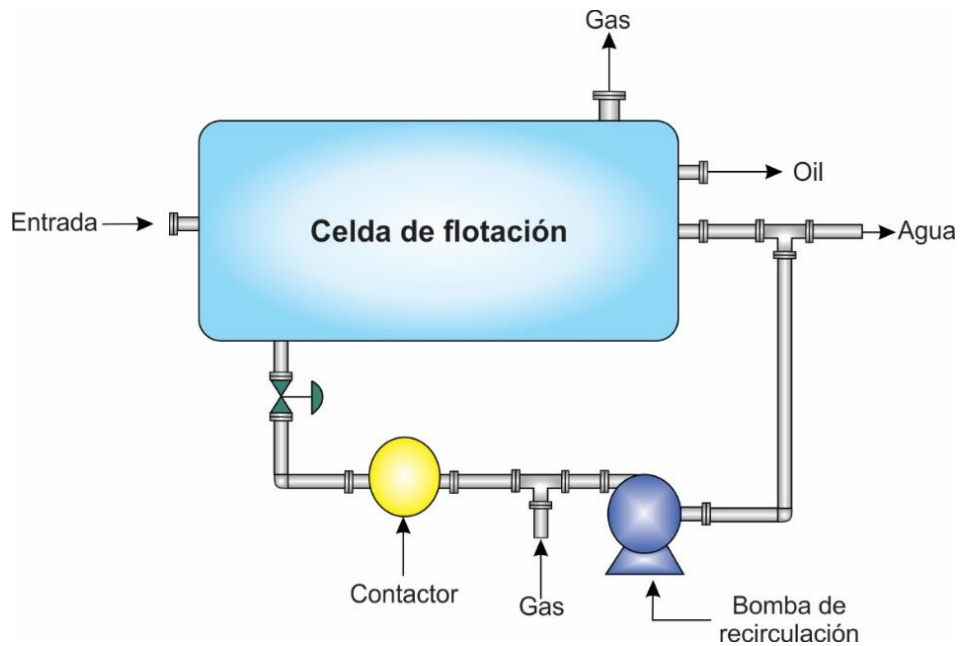
⁴⁷ ARNOLD, Ken; STEWART, Maurice. Op Cit.

⁴⁸ SATHTHASIVAM, Jayaprakash; LOGANATHAN, Kavithaa; SARP Sarper. Op Cit.

⁴⁹ ARNOLD, Ken; STEWART, Maurice. Op Cit.

⁵⁰ SATHTHASIVAM, Jayaprakash; LOGANATHAN, Kavithaa; SARP Sarper. Op Cit.

Figura 17. Celda de flotación de gas disuelto



Fuente: SATHTHASIVAM, Jayaprakash; LOGANATHAN, Kavithaa; SARP, Sarper. An overview of oil-water separation using gas flotation systems. En: Journal Industrial and engineering chemistry. [En línea]. Qatar, Elsevier, 2015, Vol. 144, p. 671-680. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.chemosphere.2015.08.087>

Este tipo de unidad de flotación típicamente no ha funcionado bien en el campo petrolero, pero se han utilizado con éxito en la refinería operaciones en las que el aire puede ser utilizado como gas, donde grandes áreas son disponibles para el equipo, y donde el agua a ser tratada es, para en su mayor parte, agua dulce oxigenada. En el tratamiento del agua producida, para la inyección, es deseable utilizar gas natural para excluir el oxígeno, para evitar la creación de una mezcla explosiva, y para minimizar la corrosión y el crecimiento de las bacterias. Esto requiere la ventilación del gas o la instalación de una unidad de recuperación de vapor. Además, el alto contenido de sólidos disueltos de agua producida ha creado problemas de incrustaciones en estas unidades.⁵¹

⁵¹ ARNOLD, Ken; STEWART, Maurice. Op Cit.

Ventajas:

- Partículas más ligeras y pequeñas que son difíciles de asentar y puede ser fácilmente removido usando la flotación de gas.
- Los sistemas de flotación de gas son compactos y tienen una huella pequeña en comparación con los tanques de sedimentación por gravedad.
- Mejor manejo de sólidos y buen espesamiento del flotador.

Desventajas

- Es difícil de eliminar el aceite disuelto y generalmente requiere pretratamiento químico para eliminar el aceite emulsionado.
- No es rentable producir grandes volúmenes de microburbujas que son más pequeñas que las gotas de aceite.⁵²

Algunas de las tecnologías utilizadas para el sistema de tratamiento secundario se resumen a continuación:

2.2.2. Hydrocell (IGF) – Siemens El separador Hydrocell basado en el principio de inducción de gas por flotación hidráulica, ha sido diseñado para proporcionar el medio más eficaz de eliminar el aceite y los sólidos en suspensión del agua en grandes volúmenes. Combinando un 95 por ciento de eficiencia con un alto rendimiento, estas unidades pueden procesar sólidos y aceites desde 50 ppm hasta varios cientos de ppm, con corrientes de productos que contienen menos de 5 ppm. Como unidades completas y autónomas, estos equipos ocupan un espacio mínimo y pueden ser fácilmente instalados para operaciones tanto fijas como portátiles,

⁵² SATHTHASIVAM, Jayaprakash; LOGANATHAN, Kavithaa; SARP, Sarper. Op Cit.

además funcionan con muy baja energía y sus costos son muy bajos lo que resulta en obtener mayor capacidad de tratamiento por menos cantidad de dinero⁵³.

2.2.3. Quadricell (IGF) – Siemens El separador Quadricell ha sido diseñado para proporcionar el medio más eficaz para eliminar el aceite y las sustancias en suspensión que se encuentran en el agua en grandes volúmenes. Combinando el 95 por ciento de eficiencia con un alto rendimiento de separación, estas unidades pueden procesar sólidos y aceites desde 50 ppm hasta varios cientos de ppm, con corrientes de alimentación que contengan menos de 5 ppm. Como unidades completas y autónomas, estos separadores ocupan espacio mínimo y puede instalarse fácilmente para la instalación fija u operación portátil.

El separador Quadricell funciona con bajos consumos energéticos y bajos costos, su principio de funcionamiento está regido por la inducción mecánica de gas donde un eje rotativo y un impulsor crean un vórtice, que atrae el gas por él tuvo de entrada de este y arrastrar toda el agua rica en gas por toda la celda.

Funciona en procesos don de las corrientes de alimento se caracterizan por la presencia de grandes cantidades de aceite libre y de sólidos no disueltos⁵⁴.

2.2.4. Veirsep (DGF) – Siemens: El sistema VEIRSEP ofrece la mayor eficiencia de remoción de contaminantes que cualquier otra configuración de equipos de flotación debido a los múltiples compartimientos que contiene y al aumento de la superficie de flotación. El aumento de la eficiencia del sistema VEIRSEP da como resultado un menor uso de productos químicos y una garantía de cumplimiento de las normas de descarga ambiental.

⁵³ SIEMENS. Hydrocell Induced Gas Flotation Separators, En: Siemens AG [En línea]. USA, SIEMENS, 2013, Disponible en: siemens.com/energy/water-solutions.

⁵⁴ SIEMENS. Quadricell Induced Gas Flotation Separators, En: Siemens AG [En línea]. USA, SIEMENS, 2013, Disponible en: siemens.com/energy/water-solutions.

El sistema VEIRSEP contiene en la entrada una celda que recibirá la corriente de agua contaminada la cual se encuentra equipada con una unidad SPIRALSEP™ que se utiliza principalmente como un dispositivo de coalescencia; La segunda celda contiene una sección de paquetes coalescentes opcionales, donde las pequeñas gotas de aceite se unen (fenómeno de coalescencia) con partículas más grandes, las cuatro celdas de flotación centrales reciben una inyección de fluido cargado gas que se adhiere a las partículas de aceite para llevar la mezcla de aceite/gas a la superficie. Las burbujas de gas son generadas por una unidad llamada Brise, sistema de bombeo para crear microburbujas finas. Este sistema utiliza un impulsor de doble sentido que desplaza tanto el agua como el gas en la bomba, donde se disuelve en la en la corriente y las burbujas finas se descargan en un tanque a un ritmo acelerado.

La última celda permite que cualquier cantidad de gas restante sea liberado, lo que resulta en agua tratada lista para ser descargada. Los sistemas automáticos de control de nivel mantienen la cantidad correcta de agua en la unidad en todo momento para garantizar un desnatado óptimo. Cada celda está equipada con una válvula ajustable para el aceite desnatado y un desagüe de fondo para la eliminación de sólidos⁵⁵.

2.3. SISTEMA DE TRATAMIENTO TERCIARIO

El sistema de tratamiento terciario es la etapa final del proceso convencional de tratamiento de aguas de producción, el cual emplea la filtración como mecanismo de separación. Estas unidades pueden remover casi en su totalidad las partículas sólidas y las trazas de aceite que no fueron removidas aguas arriba del proceso. Sin

⁵⁵ SIEMENS. VEIRSEP™ Horizontal Flotation System, En: Siemens AG [En línea]. USA, 2014, Disponible en: siemens.com/energy/water-solutions.

embargo, la aplicación de estos sistemas se ve limitada en ambientes costa afuera debido a su gran tamaño y alto mantenimiento⁵⁶.

El proceso de filtrado se puede lograr mediante el uso de diversos tipos de medios filtrantes, tal como arena, grava, antracita, cáscara de nuez, entre otros. Los filtros de cáscara de nuez son los más comúnmente usados para el tratamiento del agua producida. Este proceso no se ve afectado por la salinidad del agua y se puede aplicar a cualquier tipo de agua. Los medios de filtración son altamente eficientes para la extracción de aceite y grasa, con una eficiencia reportada de más del 90%. La eficiencia puede mejorarse aún más si se añaden coagulantes al agua de alimentación antes de la filtración⁵⁷.

Figura 18. Unidades de filtración.



Fuente: Ecopetrol S.A

⁵⁶ GARCÍA, Juan; HERRERA, Sergio y CABARCAS, Manuel. Op Cit.

⁵⁷ MORALES RINCON, María Camila y REVELO NÚÑEZ, Astrid Carolina. Op Cit.

2.3.1. Filtro cáscara de nuez: La filtración de cáscara de nuez es una tecnología de mejora de agua que se utiliza para eliminar los líquidos de hidrocarburos del agua hasta concentraciones muy bajas (en algunos casos <3 ppm)⁵⁸, mediante el uso de un material orgánico.

Figura 19. Cascarilla de nuez.



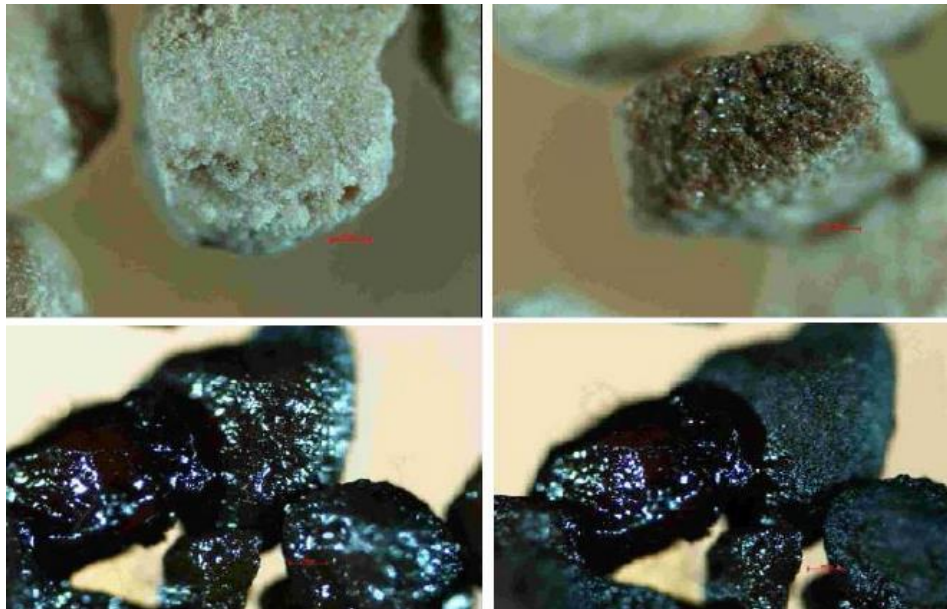
Fuente: Ecopetrol S.A.

El principio de operación de la unidad se basa en dos etapas principales: Filtración y limpieza del lecho filtrante. En la primera etapa se eliminan las partículas de aceite y sólidos presentes en la corriente de agua, pasando a través del lecho filtrante quedando adheridas a la cascarilla de nuez. A medida que transcurre el tiempo de filtrado, el lecho se satura con material removido al agua de tratamiento, debido a esto es posible percibir un aumento en la presión de operación de la unidad. En la figura 20 se puede apreciar cómo se satura el material filtrante durante la etapa de operación principal.

⁵⁸ PROCESS GROUP. Nut Shell filters. [En línea]. 2014. Disponible en: http://www.processgroupintl.com/media/downloads/D05_Nut_Shell_Filters,_rev_4-2014.pdf

La etapa de lavado de la cascarilla de nuez toma lugar cuando se ha alcanzado cierto nivel saturación identificado en el aumento de la presión diferencial, por lo que es adecuado fijar un tiempo específico en cual se deba hacer el realizar la limpieza de la cascarilla.

Figura 20. Saturación de la cascarilla de nuez.



Fuente: SCHULTZ, Thomas E. Industrial Oily Wastewater pretreatment. Siemens. [En línea]. 2005. Disponible en: <http://www.sawea.org/pdf/siemens.pdf>

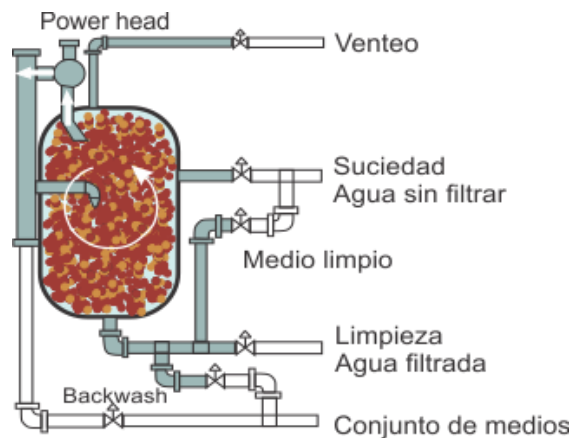
En la fase de limpieza del lecho es posible notar las siguientes fases que dejarán al material nuevamente apto para operar eficientemente⁵⁹:

- **Fluidización:** Se cierra las válvulas "E" y "F". Después de diez segundos, la válvula "A" se cierra y la válvula "B" se abre y se enciende el cabezal motor superior. El fluido en el recipiente pasa a través del cabezal de potencia de

⁵⁹ VEOLIA. Power Clean Nutshel Filters. En: Siemens AG [En línea]. USA, 2014, Disponible en: <http://www.veoliawatertech.com/whittierfiltration/ressources/files/1/24209,PowerClean-Current.pdf>

fluidización, el conjunto del depurador y vuelve al recipiente a través de la boquilla de fluidización. El fluido es impulsado a través de la boquilla y hacia el lecho filtrante, creando una mezcla homogénea de agua, sólidos, hidrocarburos y medio. Esta mezcla se hace circular a través del cabezal de potencia de fluidización causando una acción de cizallamiento que elimina el aceite y los contaminantes del medio. El lecho entero se fluidifica en unos pocos segundos.

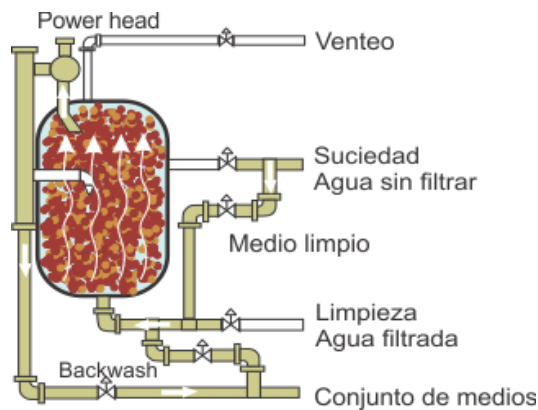
Figura 21. Fluidización de filtro cáscara de nuez.



Fuente: VEOLIA. Power Clean Nutshel Filters [En línea]. USA, 2014, Disponible en: <http://www.veoliawatertech.com/whittierfiltration/ressources/files/1/24209,PowerClean-Current.pdf>

- **Descarga:** Una vez que el lecho se fluidifica, la válvula "C" se abre, permitiendo que el agua sucia pase a través de la malla del depurador y a la línea de descarga. Esta agua se reemplaza con agua de entrada a través de la válvula "B" y sube por las rejillas inferiores. La mezcla agua-medio continúa pasando por el cabezal de potencia de fluidización, bajando por el exterior de la malla del depurador y regresando al recipiente. El agua sucia pasa a través del tamiz de la línea de descarga y a través de la válvula "C". Después de que el nivel de contaminación en el recipiente se ha reducido en aproximadamente 75%, la descarga se completa y la válvula "C" se cierra. Diez segundos más tarde se apaga el cabezal de potencia.

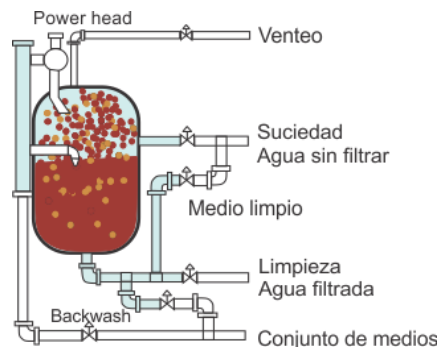
Figura 22. Descarga de filtro cáscara de nuez



Fuente: VEOLIA. Power Clean Nutshel Filters. [En línea]. USA, 2014, Disponible en: <http://www.veoliawatertech.com/whittierfiltration/ressources/files/1/24209,PowerClean-Current.pdf>

- **Asentamiento:** El siguiente paso en la regeneración es un ciclo, que permite que las partículas del medio se asienten. El cabezal de potencia de fluidización se apaga, permitiendo que el medio se asiente por la gravedad. Transcurridos treinta segundos, la válvula "A" se abrirá, la válvula "B" se cerrará y el cabezal de potencia de fluidización se encenderá durante cuatro segundos para limpiar el medio del depurador. Durante los últimos treinta segundos, el medio se asentará por gravedad para completar este ciclo.

Figura 23. Asentamiento cáscara de nuez

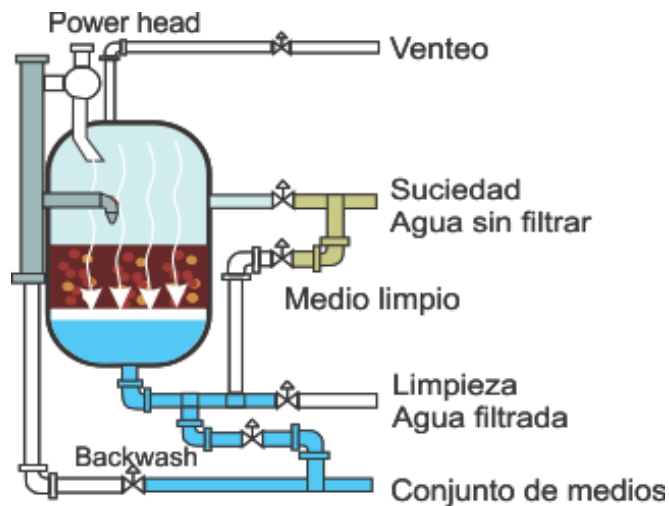


Fuente: VEOLIA. Power Clean Nutshel Filters. [En línea]. USA, 2014, Disponible en: <http://www.veoliawatertech.com/whittierfiltration/ressources/files/1/24209,PowerClean-Current.pdf>

- **Purga:** El último paso en el ciclo de fluidización del medio es purgar las líneas y ajustar el lecho. Es necesario comprimir el lecho hasta su configuración de filtrado y eliminar el fluido sucio y los contaminantes pesados que permanecen en el fondo del recipiente. La válvula "D" se abre, permitiendo que el afluente sea limpiado mientras pasa a través del lecho filtrante y forzando a todos los contaminantes a salir hacia el tanque de descarga de desechos.

Una vez completada la regeneración, la unidad está lista para volver al ciclo de filtración. Esto se hace abriendo las válvulas "E" y "F" y cerrando la válvula "D".

Figura 24. Purga del filtro de cáscara de nuez.



Fuente: VEOLIA. Power Clean Nutshel Filters. [En línea]. USA, 2014, Disponible en: <http://www.veoliawatertech.com/whittierfiltration/ressources/files/1/24209,PowerClean-Current.pdf>

2.3.2. Filtro de arena: Los filtros de arena utilizan arena graduada (de fina a gruesa o heterogénea) o arena gruesa monograda (de tamaño uniforme u homogéneo). Ninguna especificación de medio filtrante (tamaño y profundidad) puede aplicarse universalmente para todas las aguas; la elección depende de la calidad del agua y

de los procesos aguas arriba, de los objetivos de calidad del agua filtrada, del método de limpieza, de la tasa de filtración y de la longitud de los recorridos del filtro⁶⁰.

En el proceso el flujo pasa a través del medio filtrante quedando atrapadas las partículas de material sólido y algunas de aceite que han quedado remanentes del tratamiento aguas arriba. Una vez los filtros se saturan, es decir, el paso por el medio se hace más complicado, se procede a realizar la limpieza de este mediante el proceso conocido como retro lavado.

El retrolavado consiste en la aplicación separada de aire y agua a través del lecho en la dirección inversa; el agua de lavado usada se elimina mediante un canal de recogida de agua de lavado. Después de poner el filtro fuera de servicio, se deja que el filtro se drene hasta que el agua se encuentre unos centímetros por encima de la parte superior del lecho. A continuación, se introduce aire a través del sistema colector. El aire rompe la escoria superficial y la suciedad se desprende de la superficie de los granos de arena. A esto le sigue un flujo ascendente de agua a una velocidad cuidadosamente seleccionada para expandir y fluidificar el lecho. Bajo esta condición, los vacíos entre los granos de arena se incrementan y la resultante rotación de los granos y el consecuente desgaste entre los granos produce una acción de lavado para remover los depósitos adheridos. Incrementar demasiado la tasa de retrolavado contraproducente porque a medida que la distancia entre los granos de arena aumenta, la acción de lavado se reduce. Altas tasas de retrolavado pueden resultar en pérdida de arena y desperdicio de agua y energía⁶¹.

⁶⁰ BRANDT M., et al. Water Filtration. Twort's Water Supply. En: Water filtration. [En línea]. 7 ed. Butterworth-Heineman, 2017. p. 367–406. Disponible en: doi:10.1016/b978-0-08-100025-0.00009-0

⁶¹ *Ibíd.*, p. 375.

La forma más eficiente de clasificación de medios para la máxima remoción de sólidos en un filtro gravitacional es hacer que la arena disminuya de tamaño en la dirección del flujo. Esto no es posible con un medio de arena porque la recalificación hidráulica se lleva a cabo durante el retrolavado, de manera que la arena más fina se acumula en la superficie del lecho. Esto puede ser contrarrestado usando capas separadas de materiales filtrantes que tienen diferente densidad y tamaño de grano, los materiales más densos están en el fondo del lecho y los menos densos en la parte superior. Un tipo de lecho filtrante multicapa de uso generalizado es el filtro de dos capas que utiliza antracita sobre arena. Se ha encontrado que la calidad del filtrado de antracita y arena puede ser tan buena como la de la filtración convencional de arena solamente⁶².

Algunas de las tecnologías utilizadas a nivel mundial para el proceso de filtración se resumen a continuación:

2.3.2.1. Power Clean Filter – Veolia Este equipo contiene como medio filtrante la cascarilla de nuez. Posee una alta eficiencia (cerca del 98%) en la remoción de sólidos en suspensión y trazas de hidrocarburos en el agua de producción. Además de su excelente eficiencia esta unidad al no ser afectada por crudo pesado el medio es fácilmente limpiado y raramente necesita ser reabastecido, normalmente se pierde el 5% de cascarilla al año. Por otro lado, este proceso elimina la necesidad de utilizar productos químicos durante la filtración. El tiempo de lavado del medio toma tan solo 12 minutos.

⁶² *Ibíd.*, p. 369.

Figura 25. Filtro Power Clean - Veolia



Fuente: VEOLIA. Power Clean Nutshel Filters. [En línea]. USA, 2014, Disponible en: <http://www.veoliawatertech.com/whittierfiltration/ressources/files/1/24209,PowerClean-Current.pdf>

Este equipo tiene ciertas características que lo diferencian de los demás y favorece a su frecuente implementación. Una de ellas es que el material no se ajusta a la fuerza después de la limpieza, lo que elimina el potencial de daños y el taponamiento de las rejillas inferiores. La malla se limpia durante cada ciclo de regeneración antes de que el material se asiente de nuevo.

Finalmente, la característica más notoria a simple vista es que posee la rejilla de lavado de medios externamente permitiendo fácilmente su limpieza sin necesidad de que entre el recipiente. La malla se puede retirar tanto de la parte superior como de la inferior de la carcasa de fregado. El retiro desde la parte inferior requiere

menos espacio de arriba y elimina la necesidad de una grúa de techo. El resultado es una menor altura⁶³.

2.3.2.2. Auto-shell filter – Siemens Los filtros Auto-Shell ofrecen una tecnología mejorada en la filtración de cáscara de nuez. El diseño de filtro patentado elimina la necesidad de mallas de retención de medios planos y utiliza una bomba de depuración de medios para múltiples celdas de filtrado.

Los filtros de Auto-Shell utilizan agua de proceso para el lavado a contracorriente, eliminando la necesidad de utilizar filtros de reserva y tanques de almacenamiento adicionales. El filtro opera al doble de la tasa de flujo de los filtros convencionales en la misma aplicación, y puede remover más del triple de la cantidad de sólidos antes de necesitar ser limpiado.

Después de 24 horas de filtración, el agua de proceso sucia es redirigida al fondo del recipiente para fluidificar el lecho del medio filtrante. Un corto paso de ventilación de aproximadamente 30 segundos libera el filtro de cualquier acumulación de aceite y gas libre en la parte superior del recipiente. Luego se enciende la bomba de lavado de medios, haciendo que los infiernos de nuez salgan del recipiente y circulen a través de la bomba y el recipiente de lavado de medios. El recipiente de lavado de medios puede ser usado efectivamente como una unidad de lavado de medios comunes para hasta cuatro filtros a la vez⁶⁴.

⁶³ VEOLIA. Power Clean Nutshel Filters. [En línea]. USA, 2014, Disponible en: <http://www.veoliawatertech.com/whittierfiltration/ressources/files/1/24209,PowerClean-Current.pdf>

⁶⁴ SIEMENS. Auto-Shell Filter: Walnut Shell. En: Siemens AG [En línea]. USA, 2014, Disponible en [Filtrationhttps://www.oilandgasonline.com/doc/auto-shell-filters-0001](https://www.oilandgasonline.com/doc/auto-shell-filters-0001).

Figura 26. Filtro Auto-shell - Siemens



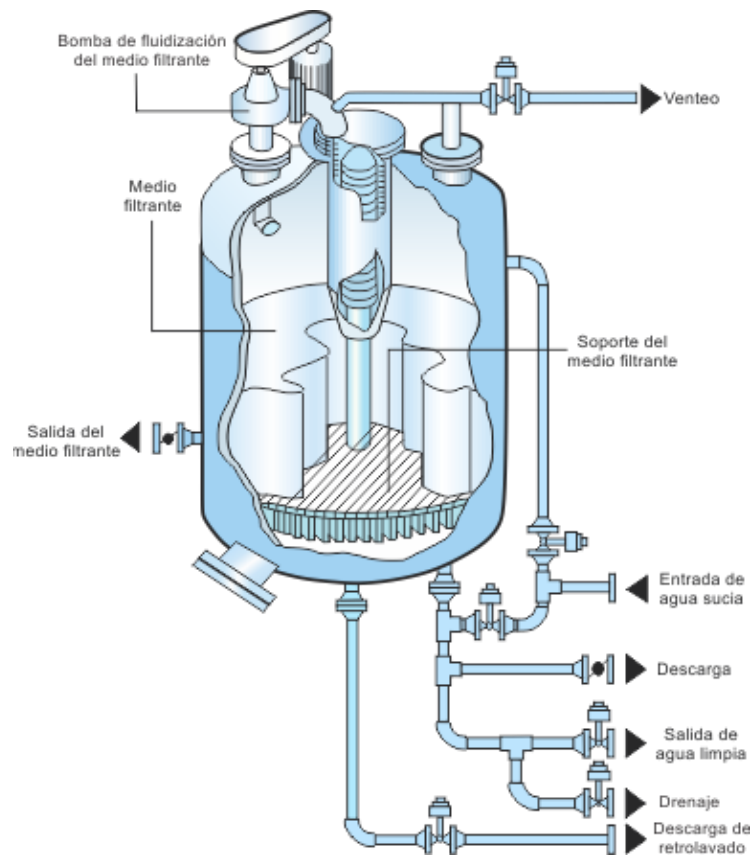
Fuente: SIEMENS. Auto-Shell Filter: Walnut Shell. En: Siemens AG [En línea]. USA, 2014, Disponible en Filtration <https://www.oilandgasonline.com/doc/auto-shell-filters-0001>

2.3.2.3. Wemco silver band – Schlumberger Es un filtro de alto rendimiento y de flujo descendente. Típicamente puede eliminar el 98% de los sólidos en suspensión y los hidrocarburos insolubles en la mayoría de las aplicaciones. Utilizando un proceso exclusivo de fluidización que elimina el aceite y los contaminantes del medio filtrante, con este filtro se elimina la necesidad de gas y aceite de lavado, surfactantes y altos volúmenes de agua de retrolavado.

En este filtro, un tamiz de soporte de medios de acero inoxidable está situado en soportes cerca del fondo del recipiente. Una boquilla de fluidificación ubicada en el centro superior del filtro se extiende hasta la parte superior del medio filtrante. En el interior de la boquilla de fluidización se encuentra el filtro de acero inoxidable, la rejilla del depurador, que permite que el fluido sucio salga del recipiente mientras retiene el material⁶⁵.

⁶⁵ SCHLUMBERGER. Wemco silver band separator. [En línea]. 2016. Disponible en: <https://www.slb.com/-/media/files/osf/product-sheet/wemco-silver-band-ps.ashx>

Figura 27. Esquema filtro Wemco Silver Band - Schlumberger.



Fuente: SCHLUMBERGER. Wemco silver band separator. [En línea]. 2016. Disponible en: <https://www.slb.com/-/media/files/osf/product-sheet/wemco-silver-band-ps.ashx>

Por otro lado, Los filtros utilizan el agua del proceso para su regeneración, eliminando la necesidad de tanques de almacenamiento de agua limpia a contracorriente. Cada filtro contiene su propia bomba para la fluidización del retrolavado, eliminando la necesidad de grandes bombas auxiliares de retrolavado, la tubería asociada y el control. Los químicos, el aire o el gas típicamente no son requeridos para mejorar la eficiencia de remoción o la limpieza de los medios durante la filtración o regeneración. La rápida y efectiva regeneración de los medios realiza una limpieza positiva de los medios en un promedio de 14 minutos, con una interrupción del flujo ascendente de 1 a 2 minutos.

En cuanto al medio de filtración utilizado, sus desarrolladores afirman que es durable y fácil de limpiar, por lo que elimina la necesidad de reemplazar todo el sistema, pero sólo un promedio de 5% a 10% de reposición por año (basado en la operación de retrolavado recomendada)⁶⁶.

⁶⁶ *Ibíd.*, p. 2.

3. METODOLOGÍA DE DISEÑO

3.1. DISEÑO DEL SEPARADOR API

Para fines de realizar un adecuado diseño que garantice el mejor desempeño de este equipo, se debe tener en cuenta ciertos criterios que se encuentran estandarizados en la publicación 421 del American Petroleum Institute. A continuación, se muestra el procedimiento y los cálculos necesarios para realizar el dimensionamiento de este dispositivo, basado en dicha publicación.

Inicialmente se debe conocer el valor de algunas variables de operación tales como la temperatura del agua a tratar, la viscosidad de la fase continua (el agua de producción), la gravedad API del aceite, la concentración de aceite y de sólidos. Posteriormente se debe fijar el tamaño del diámetro de la gota de aceite que se va a separar. Este valor debe ser mayor o igual a 150 micrones (μm), debido a que partículas más pequeñas normalmente saldrán del separador junto con el agua y necesitarán ser removidos por el sistema de tratamiento aguas abajo⁶⁷.

- **Velocidad vertical**, es el primer cálculo que se procede a ejecutar, este valor es la razón a la cual sube una gota de aceite por la fase continua, es decir a través del agua.

$$V_t = \left(\frac{g}{18\mu}\right)(\rho_w - \rho_o)D^2 \quad (\text{Ecuación 5})$$

Cuando el diámetro de la gota de aceite es fijado en 150 micrones, la ecuación 2 puede reducirse a la siguiente manera⁶⁸:

⁶⁷ SCHULTZ, Thomas E. Get the most API out of API separators. Op Cit.

⁶⁸ AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE. Monographs on Refinery Environmental Control-Management of Water Discharges: Design and Operation of Oil-Water Separators. Washington, D.C., 1990.

$$V_t = 0.0241 \frac{S_w - S_o}{\mu} \quad (\text{Ecuación 6})$$

- **Velocidad Horizontal:** Con el valor de la velocidad vertical hallado anteriormente, se calcula la velocidad horizontal. Este valor no debe exceder los 3 pies por segundo (3ft/s), para minimizar la turbulencia y por ende la interferencia con la separación aceite/agua⁶⁹.

$$v_H = 15V_t \leq 3 \quad (\text{Ecuación 7})$$

- **Mínima área transversal vertical del separador:** Con el resultado obtenido en la ecuación 4 y con el dato del caudal de agua que entra al separador, se calcula esta operación.

$$A_c = Q_m / V_H \quad (\text{Ecuación 8})$$

En este caso el resultado de A_c se debe expresar en pies cuadrado (ft²)

- **Número de canales requeridos por el separador:** La instalación más económica es aquella en la que se utiliza la menor cantidad de canales, sin embargo, se recomienda que la cantidad mínima de canales del separador sea dos unidades. Para minimizar el número de canales el área transversal debería ser maximizada. Típicamente la máxima sección transversal recomendada para un solo canal es 20 pies de ancho y 8 pies de profundidad⁷⁰.

$$n = \frac{A_c}{160} \quad (\text{Ecuación 9})$$

⁶⁹ SCHULTZ, Thomas E. Get the most API out of API separators. Op Cit.

⁷⁰ AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE. Op. Cit.

- **Profundidad y ancho del canal:** Calculados el área transversal y la cantidad de canales, se procede a calcular la profundidad del canal, para ello se debe seleccionar un ancho del canal entre 6 ft y 20 ft y reemplazar todo en la ecuación

$$d = A_c / Bn \quad (\text{Ecuación 10})$$

La profundidad del canal debe estar en el rango entre 3 ft y 8 ft y a su vez la relación entre la profundidad y el ancho de este debe pertenecer al rango entre 0.3 – 0.5. Si no se cumple alguna de las anteriores condiciones, se debe intentar con otro valor de ancho del canal hasta que haya uno que satisfaga todas las condiciones mencionadas⁷¹.

- **Longitud del separador:** Para culminar con los datos de dimensionamiento se procede a realizar el siguiente cálculo.

$$L = F(V_H/V_t)d \quad (\text{Ecuación 11})$$

Donde F, es el factor de turbulencia y corto-circuito que se obtiene de la gráfica 28 y tabla 3. Después de hallar el valor de L, se debe corroborar que la relación $L/B \geq 5$ se cumpla.

Tabla 3. Valores recomendados del factor de turbulencia y corto-circuito.

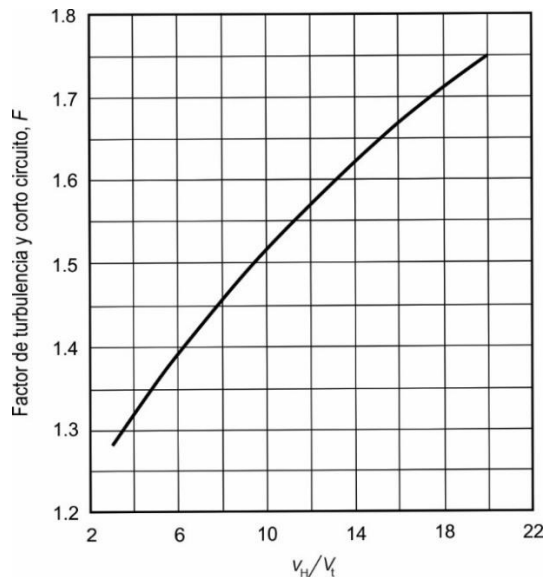
V_H/V_t	Factor de turbulencia F_t	$F=1.2(F_t)$
20	1.45	1.74
15	1.37	1.64
10	1.27	1.52

⁷¹ *Ibíd.*, p. 9.

V_H/V_t	Factor de turbulencia F_t	$F=1.2(F_t)$
6	1.14	1.37
2	1.07	1.28

Fuente: AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE. Monographs on Refinery Environmental Control-Management of Water Discharges: Design and Operation of Oil-Water Separators. Washington, D.C., 1990.

Figura 28. Factor de turbulencia y corto-circuito



Fuente: AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE. Monographs on Refinery Environmental Control-Management of Water Discharges: Design and Operation of Oil-Water Separators. Washington, D.C., 1990.

- **Mínima área Horizontal:** Finalmente solo queda por calcular este valor para el separador teniendo en cuenta el valor hallado del factor F .

$$A_H = F \left(\frac{Q_m}{V_t} \right) \quad (\text{Ecuación 12})$$

- **Concentración de aceite a la salida del separador:** Luego de haber realizado el diseño del dimensionamiento del separador queda por realizar este paso.

Para esto es necesario conocer o asumir si es el caso, un tamaño máximo de la gota de aceite a la entrada del separador.

$$\frac{d_m}{d_{max}} = \frac{C_{out}}{C_{in}} \quad (\text{Ecuación 13})$$

De la cual se despeja la concentración de aceite a la salida del separador.

$$C_{out} = \frac{d_m C_{in}}{d_{max}} \quad (\text{Ecuación 14})$$

3.2. DISEÑO DEL CPI

Para desarrollar el dimensionamiento de este equipo se basa en la cantidad de paquetes de platos necesarios para separar determinado tamaño de gota presente en el flujo de entrada al separador.

- **Ecuación general de dimensionamiento:** para un coalescedor con flujo ya sea paralelo o perpendicular a la inclinación de platos para la remoción de un tamaño de gota es necesario calcular el espacio necesario ocupado por el equipo de separación. De esta ecuación se derivan los demás cálculos empleados más abajo.

$$HWL = \frac{4.8Q_w h \mu_w}{\text{Cos}\theta (d_m)^2 (\Delta SG)} \quad (\text{Ecuación 15})$$

- **HW mínimo:** Experimentos han indicado que el número de Reynolds para el régimen de flujo no puede exceder 1600 con cuatro veces el radio hidráulico como característica de dimensión. Basado en esta correlación el mínimo producto entre HW (alto y ancho de la sección de platos) para un caudal de

agua (Q_w) puede ser determinado de la siguiente manera, asumiendo un factor de surgencia de 2^{72} .

$$HW = 14 \times 10^{-4} \frac{Q_w h(SG)_w}{\mu_w} \quad (\text{Ecuación 16})$$

- **Número de paquetes de platos:** Para calcular el número de platos necesarios para que el separador pueda realizar su tarea eficiente se debe tener en cuenta ciertos parámetros. Por lo general para los CPIs, los paquetes de platos vienen en tamaños estándar, ancho 3.25 ft, altura 3.25 ft y de longitud=5.75 ft. El tamaño de los CPI es determinado por el número de paquetes de platos instalados. Para aquella configuración de platos donde están inclinados 45° el número de paquetes de platos viene dado por:

$$\text{Número de paquetes} = 0.077 \frac{Q_w \mu}{(\Delta SG)(d_m)^2} \quad (\text{Ecuación 17})$$

Para asegurar que la condición del número de Reynolds se cumpla, el flujo a través de cada paquete debería estar limitado a aproximadamente 20000 bwpd. Cuando se necesita diseñar un CPI con platos inclinado 60° para aliviar el problema de taponamiento de sólidos, es necesario incrementar el número de paquetes 40%⁷³, por lo que ecuación queda de la siguiente manera:

$$\text{Número de paquetes} = 0.11 \frac{Q_w \mu}{(\Delta SG)(d_m)^2} \quad (\text{Ecuación 18})$$

⁷² ARNOLD, Ken; STEWART Maurice. Op Cit.

⁷³ *Ibíd.*, p. 154.

Debido a que el número de platos es un número entero, el resultado obtenido anteriormente, se debe aproximar al entero siguiente mayor.

- **Concentración de aceite a la salida del CPI:** Para estimar la concentración final de aceite después de salir del separador es necesario conocer la distribución del tamaño de las gotas de aceite a la entrada de la unidad. En la tabla 4 se muestra un ejemplo de la distribución de las gotas de aceite de una muestra de agua.

Tabla 4. Distribución del tamaño de las gotas de aceite

Micrones	<40	40-60	60-80	80-100	100-120	>120
Vol%	9	14	30	35	10	2

Fuente: ARNOLD, Ken; STEWART, Maurice. Emulsions and Oil Treating Equipment: Selection, Sizing and Troubleshooting. [En línea]. Gulf Professional Publishing Elsevier, Houston, Texas: Diciembre, 2008. p. 156. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/B978-0-7506-8970-0.X0001-1>

En seguida con el tamaño de gota establecido para separar se halla el porcentaje de aceite removido

$$\text{Aceite removido} = \left(\frac{d_{m\ i+1} - d_m}{d_{m\ i+1} - d_{m\ i-1}} \right) V_i + V_{i+1} + V_{i+2} + \dots + V_n \quad (\text{Ecuación 19})$$

Donde:

d_m : Es el tamaño de la gota fijado a separar

$d_{m\ i-1}$: Tamaño de gota del límite inferior del intervalo entre el que se encuentra d_m

$d_{m\ i+1}$ Tamaño de gota del límite superior del intervalo entre el que se encuentra d_m

V_i : Concentración en porcentaje de tamaño de gotas en cada intervalo.

Finalmente queda por calcular la concentración de aceite a la salida del separador con el dato anteriormente calculado.

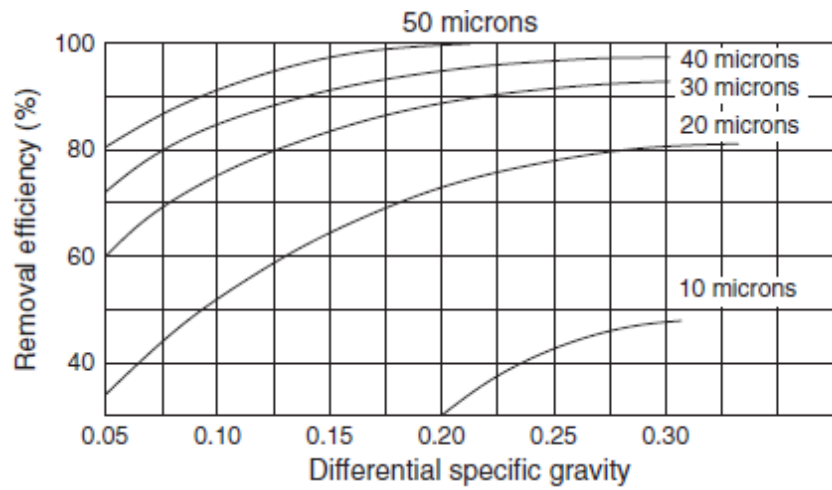
$$C_{out} = C_{in}(100\% - \text{Aceite removido}\%) \quad (\text{Ecuación 20})$$

3.3. DISEÑO DEL HIDROCICLÓN

Para realizar este procedimiento es necesario tener en cuenta todas las consideraciones mencionadas anteriormente en esta sección. De este modo se garantiza un diseño óptimo de esta unidad, asegurando el mejor desempeño de trabajo.

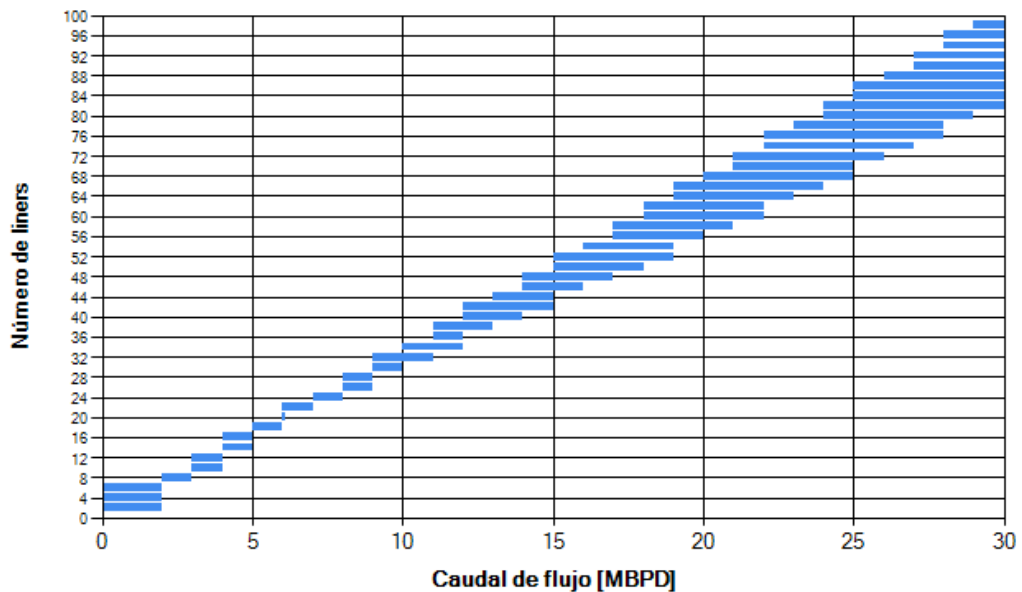
- **Eficiencia de separación a la gota a separar:** este primer paso una vez fijado el tamaño de gota de aceite a separar, se debe calcular el diferencial de gravedades específicas y a partir de la figura 29 se halla dicho valor, entrando en la gráfica por diferencial de gravedad hasta la curva de tamaño de gota para finalmente leer el dato de la eficiencia de separación.
- **Cantidad de liners necesarios:** Es necesario saber la cantidad de liners que pueden realizar la separación de fases de manera óptima. Este paso es posible a partir de la figura 30 en la cual se calcula esta con base en la razón de flujo de agua que entra al hidrociclón. Para este caso la unidad tiene una capacidad de 30000 BWPD.

Figura 29. Eficiencia de separación vs diferencial de gravedad específica



Fuente: ARNOLD, Ken; STEWART, Maurice. Emulsions and Oil Treating Equipment: Selection, Sizing and Troubleshooting. [En línea]. Gulf Professional Publishing Elsevier, Houston, Texas: Diciembre, 2008. p. 192. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/B978-0-7506-8970-0.X0001-1>

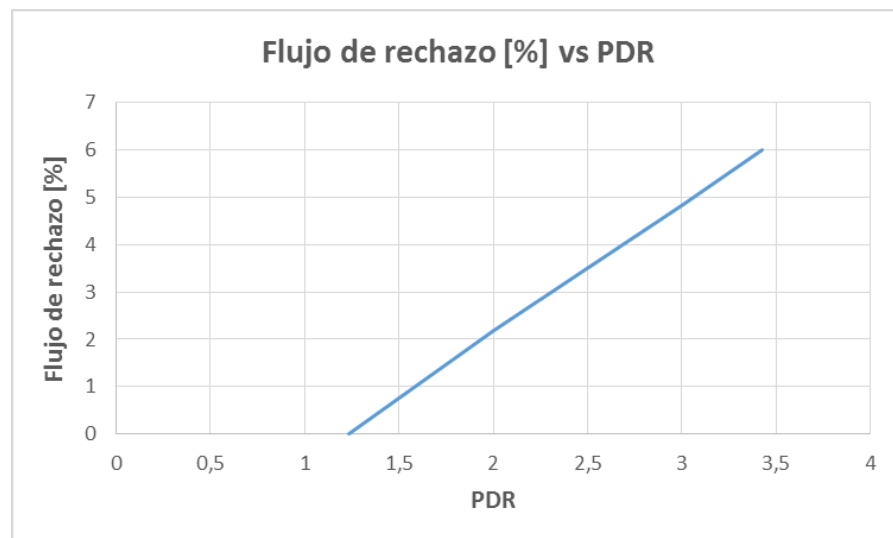
Figura 30. Cantidad de liners necesarios vs flujo de entrada al hidrociclón.



Fuente: WALSH, John. Hydrocyclone webinar. [En línea]. Diciembre, 2013. p. 17. Disponible en: <https://docplayer.net/35414869-Hydrocyclone-webinar-john-walsh-phd-cetco-energy-services-dec-2013.html>

- **Relación de flujo de rechazo:** Con el valor de la relación de caída de presión (PDR) establecida se puede calcular finalmente la relación de flujo que sale rechazado por la parte superior de la unidad (overflow), es decir cuánto fluido se separa de la corriente inicial que entra a la unidad. Para es necesario guiarse de la gráfica 31.

Figura 31. Relación de rechazo vs PDR



Fuente: WALSH, John. Hydrocyclone webinar. [En línea]. Diciembre, 2013. p. 17. Disponible en: <https://docplayer.net/35414869-Hydrocyclone-webinar-john-walsh-phd-cetco-energy-services-dec-2013.html>

- **Eficiencia remoción debida a la relación de flujo de rechazo:** Con el valor de obtenido en el paso anterior es posible calcular la eficiencia de remoción de aceite en función de la relación de rechazo, con base en la figura 32.
- **Aceite removido y eficiencia total de remoción:** Mediante una tabla como la tabla 3 se establece la distribución en porcentaje en volumen del tamaño de las gotas de aceite para luego calcular la cantidad de aceite en la salida del hidrociclón, teniendo en cuenta las tres eficiencias halladas en los dos primeros

pasos y en el paso anterior de este proceso, las cuales se multiplicarán el valor del aceite removido.

$$Aceite\ removido_i = \left(\frac{d_{m\ i+1} - d_m}{d_{m\ i+1} - d_{m\ i-1}} \right) V_i + V_{i+1} + V_{i+2} + \dots + V_n$$

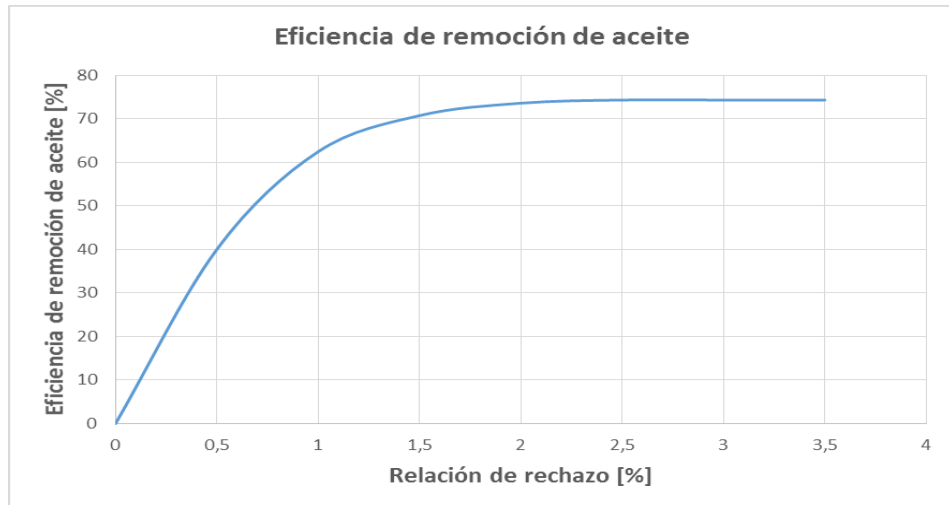
$$Aceite\ removido = Aceite\ removido_i * \epsilon_{Flujo} * \epsilon_{\Delta SG} * \epsilon_{rechazo}$$

Posteriormente se calcula la concentración a la salida de la unidad, para finalmente encontrar el valor de la eficiencia total del proceso.

$$C_{out} = C_{in}(100\% - Aceite\ removido\%)$$

$$\epsilon_{Total} = 1 - \frac{C_{out}}{C_{in}}$$

Figura 32. Eficiencia de remoción de aceite vs relación de rechazo.



Fuente: WALSH, John. Hydrocyclone webinar. [En línea]. Diciembre, 2013. p. 17. Disponible en: <https://docplayer.net/35414869-Hydrocyclone-webinar-john-walsh-phd-cetco-energy-services-dec-2013.html>

De este modo se da por terminado los diseños de los utilizados en los sistemas de tratamiento de primario de aguas de producción. Después de recurrir a algún equipo de esta sección lo más probable sea necesario continuar con otro sistema de tratamiento aguas abajo para conseguir que las condiciones del agua cumpla con las condiciones de disposición final y planeadas. La siguiente sección trata sobre el sistema de tratamiento secundario cuyo principio físico de funcionamiento se basa en la flotación de partículas.

3.4. DISEÑO DEL SKIM VESSEL

3.4.1. Skim vessel vertical Inicialmente se busca determinar el diámetro mínimo requerido para el skim vessel vertical esto por medio de la siguiente formula:

$$d = 140 \frac{Q_w * \mu_w}{(\Delta SG)d_m^2}$$

Una vez hallado el diámetro requerido (el cual debe estar entre los diámetros comerciales) se puede establecer el valor de la altura del skim vessel, el cual se halla por medio de la siguiente ecuación:

$$H = 0.7 \frac{(t_r) * Q_w}{d^2}$$

Finalmente se obtiene la altura máxima del skim vessel vertical.

3.4.2. Skim vessel horizontal El diámetro requerido y la longitud de un skim horizontal se puede determinar a partir de la ley de Stokes como sigue asumiendo un factor 1,8 para la turbulencia y cortocircuito:

$$dL_{eff} = \frac{1000Q_w\mu_w}{(\Delta SG)(d_m)^2}$$

Con las diferentes configuraciones de diámetros comerciales se busca el valor que satisfaga que el valor de L_{eff} sea menor 7.5. Luego por medio de la siguiente ecuación se busca el diámetro correcto ya teniendo en dato anterior.

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

Por medio de la siguiente ecuación se halla la longitud entre costuras como último cálculo.

$$L_{ss} = \frac{4}{3}L_{eff}$$

3.5. DISEÑO CELDAS DE FLOTACIÓN

Actualmente existen varias tecnologías desarrolladas para el diseño de sistemas de flotación entre ellas se pueden encuentran: Hydrocell, Quadricell y Veirsep desarrolladas por la compañía Siemens. Esta resume sus diseños de acuerdo con el caudal de entrada al equipo en un atabal donde establecen ciertas dimensiones de las celdas para poder lograr la eficiencia de remoción promedio de cada tecnología.

3.5.1. Hydrocell (IGF) – Siemens: Los modelos de separadores Hydrocell se adaptan a aplicaciones de hasta 100.000 BPD, y están disponibles a partir de diseños presurizados de forma rectangular o cilíndrica. El diseño cilíndrico ofrece un impulso posterior y es el único método de desnatado, es decir, elimina la necesidad de equipos desnatadores y minimiza el número de piezas móviles.⁷⁴

⁷⁴ SIEMENS. Hydrocell Induced Gas Flotation Separators, En: Siemens AG [En línea]. USA, SIEMENS, 2013, Disponible en: siemens.com/energy/water-solutions.

Actualmente estas unidades vienen estandarizadas según el modelo que depende del caudal de entrada, a continuación, en la tabla 5 se resumen las dimensiones según el modelo que corresponda:

Tabla 5. Dimensiones de los modelos de la unidad de flotación Hydrocell-Siemens

Capacidad de diseño			Dimensionamiento			Peso	
Modelo	GPM (LPM)	B/D	Longitud Ft.-in. (m)	Ancho Ft.-in. (m)	Altura Ft.-in. (m)	Seco lbs. (kg)	Operación lbs. (kg)
H-3 1/2D	102 (386)	3500	12'-10" (3.9)	7'-0" (2.1)	5'-6" (1.7)	4100 (1,860)	8200 (3,719)
H-5D	146 (553)	5000	16'-0" (4.9)	7'-0" (2.1)	4'-7" (1.4)	5700 (2,585)	11300 (5,126)
H-7 1/2D	219 (829)	7500	16'-2" (4.9)	7'-0" (2.1)	5'-8" (1.7)	6500 (2,948)	15500 (7,031)
H-10D	292 (1,105)	10000	18'-4" (5.6)	8'-0" (2.4)	7'-0" (2.1)	8,500 (3,856)	19000 (8,618)
H-15D	438 (1,658)	15000	18'-4" (5.6)	8'-0" (2.4)	7'-0" (2.1)	10,000 (4,536)	26100 (11,839)
H-20D	538 (2,037)	20000	22'-0" (6.7)	9'-0" (2.7)	7'-0" (2.1)	13,300 (6,033)	35000 (15,876)
H-30D	875 (3,312)	30000	27'-3" (8.3)	9'-0" (2.7)	7'-0" (2.2)	16,300 (7,394)	39400 (17,872)
H-35D	1021 (3,865)	35000	32'-0" (9.5)	9'-5" (2.9)	8'-0" (2.4)	17,300 (7,847)	41600 (18,869)
H-40D	1167 (4,418)	40000	32'-0" (9.5)	10'-3" (3.2)	7'-0" (2.1)	21,300 (9,662)	66800 (30,300)
H-50D	1458 (5,519)	50000	32'-0" (9.5)	10'-4" (3.2)	8'-0" (2.4)	23,350 (10,591)	80000 (36,287)
H-70D	2042 (7,730)	70000	37'-6" (11.4)	11'-0" (3.4)	8'-0" (2.4)	27,300 (12,383)	97200 (44,089)
H-1000D	2917 (11,042)	100000	42'-0" (12.8)	11'-6" (3.5)	9'-1" (2.8)	37,100 (16,828)	130000 (58,967)

Fuente: SIEMENS. Hydrocell Induced Gas Flotation Separators, En: Siemens AG [En línea]. USA, SIEMENS, 2013, Disponible en: siemens.com/energy/water-solutions.

3.5.2. Quadrycell (IGF) Siemens: En cuanto a su diseño, el separador Quadricell utiliza cuatro celdas en serie para un máxima contacto líquido/gas donde las celdas son ajustables individualmente para una máxima eficiencia de separación y una entrada óptima de gas para cualquier conjunto de condiciones. El separador está

diseñado para proporcionar una mayor capacidad de rendimiento para el tratamiento de corrientes de grandes caudales que requieren una aireación intensiva para caudales de hasta 5.000 gpm.⁷⁵

Para lograr las condiciones de operación, características de equipo se han resumido las condiciones específicas para la unidad de flotación dependiendo de su flujo de agua a tratar; a continuación, se muestra en la tabla 6 las especificaciones para cada modelo:

Tabla 6. Dimensiones de los modelos de la unidad de flotación Quadrycell Siemens.

Capacidad de diseño			Dimensionamiento			Peso	
Modelo	GPM (LPM)	BPD	Longitud Ft.-in. (m)	Ancho Ft.-in. (m)	Altura Ft.-in. (m)	Seco lbs. (kg)	Operación lbs. (kg)
Q4	40 (151)	1400	13'-0" (4.0)	3'-5" (1.0)	4'-6" (1.4)	2300(1860)	4300 (1950)
Q10	100 (349)	3440	15'-8" (4.0)	4'-9" (1.4)	5'-2" (1.6)	6300 (2585)	10000 (4536)
Q21	210 (795)	7200	18'-6" (4.0)	5'-4" (1,6)	6'-1" (1.9)	9000 (2948)	17000 (7711)
Q-32	320 (1211)	11000	21'-3" (4.0)	6'-0" (1.8)	6'-3" (1.9)	12000 (3856)	23800 (10796)
Q-50	500 (1893)	17000	26'-0" (4.0)	6'-11" (2.1)	6'-6" (1.9)	15000 (4536)	35000 (15876)
Q-75	750 (2839)	25700	30'-0" (4.0)	8'-0" (2.4)	6'-8" (2.0)	20000 (6033)	50000 (22680)
Q-110	1100 (4164)	38000	31'-0" (4.0)	8'-1" (2.5)	8'-7" (2.6)	24 500 (7394)	67000 (30391)
Q-160	1600 (6057)	55000	35'-6" (4.0)	9'-3" (2.8)	8'-5" (2.6)	28100 (7847)	86300 (39145)
Q-230	2300 (8706)	7900	40'-0" (4.0)	10'-0" (3.0)	9'-10" (3.0)	41000 (9662)	41000 (9662)
Q-340	3400 (12870)	116500	47'-6" (4.0)	11'-8" (3.6)	10'-1" (3.1)	57000 (10,591)	57000 (10591)

⁷⁵ SIEMENS. Quadricell Induced Gas Flotation Separators, En: Siemens AG [En línea]. USA, SIEMENS, 2013, Disponible en: siemens.com/energy/water-solutions.

Q-500	5000 (18927)	171500	55'-0" (4.0)	13'-6" (4.1)	10'-4" (3.2)	69000 (12,383)	69000 (12383)
-------	-----------------	--------	-----------------	-----------------	-----------------	----------------	---------------

Fuente: SIEMENS. Quadricell Induced Gas Flotation Separators, En: Siemens AG [En línea]. USA, SIEMENS, 2013, Disponible en: siemens.com/energy/water-solutions.

3.5.3. Veirsep (DGF) -Siemens: En cuanto a su diseño se manejan dos clases de equipos cada uno con sus propios modelos dichos equipos son el sistema VEIRSEP y el sistema VEIRSEP-P cuya diferencia es que el primero es un sistema presurizado y el segundo es un sistema a presión atmosférica.⁷⁶

En la siguiente tabla se encuentran los diferentes modelos para cada uno de los sistemas anteriormente mencionados donde dependiendo las necesidades del comprador podrá seleccionar el que más se ajuste a estas:

Tabla 7. Dimensiones de los modelos de la unidad de flotación VEIRSEP Siemens.

Modelo	Caudal		Peso del equipo		Agua		VEIRSEP			
	GPM	BPD	Seco lbs/Kg	Operación n lbs/Kg	Entrada in/cm	Salida in/cm	Salida in/cm	Altura ft- in/cm	Ancho ft- in/cm	Longitud ft-in/cm
1MV	30	1M	9260/ 4200	11380/ 5162	4/122	4/122	2/61	5'6"/ 168	5'0"/ 152	14'0"/ 427
3MV	90	3M	10340/ 4690	20300/ 9208	4/122	4/122	2/61	6'6"/ 198	7'0"/ 213	14'0"/ 427
5MV	150	5M	11000/ 4990	24625/ 11170	6/183	6/183	3/91	7'6"/ 229	7'6"/ 290	16'0"/ 488
7.5MV	220	7.5 M	22325/ 10127	38986/ 17684	6/183	6/183	4/122	8'11"/ 272	9'6"/ 305	20'6"/ 625
10MV	300	10M	22500/ 10206	42350/ 19210	8/244	8/244	4/122	9'6"/ 290	10'0"/ 305	23'1"/ 704
15MV	440	15M	23600/ 10705	65450/ 29688	8/244	8/244	4/122	11'0"/ 335	10'0"/ 305	24'0"/ 732
20MV	580	20M	25250/ 11453	73150/ 33181	8/244	8/244	4/122	12'0"/ 366	10'6"/ 320	26'0"/ 792

⁷⁶ SIEMENS. VEIRSEP™ Horizontal Flotation System, En: Siemens AG [En línea]. USA, SIEMENS, 2014, Disponible en: siemens.com/energy/water-solutions.

Modelo	Caudal		Peso del equipo		Agua		VEIRSEP			
	GPM	BPD	Seco lbs/Kg	Operación lbs/Kg	Entrada in/cm	Salida in/cm	Salida in/cm	Altura ft-in/cm	Ancho ft-in/cm	Longitud ft-in/cm
25MV	750	25M	30480/13826	79380/36007	8/244	8/244	4/122	12'6"/381	10'6"/320	27'0"/823
30MV	880	30M	34820/15794	100340/45514	10/305	10/305	6/183	13'0"/396	10'6"/320	33'0"/1006
40MV	1200	40M	45515/20645	140550/63753	10/305	10/305	6/183	14'0"/427	13'1"/399	36'4"/1107
50MV	1500	50M	47800/21682	149400/67767	10/305	10/305	6/183	14'6"/442	14'0"/427	38'0"/1158
75MV	2200	75M	59500/26989	165950/75274	10/305	10/305	6/183	14'6"/442	14'0"/427	46'0"/1402
100MV	2900	100M	70400/31933	210266/95376	12/366	12/366	8/244	14'1"/429	15'0"/457	48'0"/1463
150MV	4400	150M	100540/45605	264520/119986	12/366	12/366	8/244	16'6"/503	16'0"/488	54'0"/1646

Fuente: SIEMENS. Quadricell Induced Gas Flotation Separator, En: Siemens AG [En línea]. USA, SIEMENS, 2013, Disponible en: siemens.com/energy/water-solutions

Tabla 8. Dimensiones de los modelos de la unidad de flotación VEIRSEP-P Siemens.

Modelo	Flujo (tasa) al equipo		Peso del equipo		Agua		Aceite	VEIRSEP-P		
	GPM	BPD	Seco lbs/Kg	Operac. lbs/Kg	Entrada In/cm	Salida In/cm	salida In/cm	Altura ft-cm	Ancho ft-cm	Longitud ft-cm
5MV	150	5M	21220/9625	31520/14297	6/183	6/183	3/91	9'8"/295	9'6"/290	20'7"/627
7.5MV	220	7.5M	23000/10433	46000/20865	6/183	6/183	4/122	10'0"/305	9'6"/290	22'6"/686
10MV	300	10M	25000/11340	57200/25946	8/244	8/244	4/122	10'6"/320	9'6"/290	25'0"/762
15MV	440	15M	26200/11884	66340/30092	8/244	8/244	4/122	12'4"/376	10'0"/305	27'0"/823
20MV	580	20M	31800/14424	76780/34827	8/244	8/244	4/122	13'0"/396	11'6"/351	28'0"/853
25MV	750	25M	37850/17169	83500/37875	8/244	8/244	4/122	13'6"/411	11'6"/351	29'0"/884
30MV	880	30M	43560/19759	89600/40642	10/305	10/305	6/183	13'6"/411	11'0"/335	30'0"/914
40MV	1200	40M	48750/22113	135000/61236	10/305	10/305	6/183	13'8"/417	11'0"/335	37'0"/1128
50MV	1500	50M	53340/24195	195120/88506	10/305	10/305	6/183	16'10"/513	13'0"/396	42'6"/1295
75MV	2200	75M	54250/24608	218750/99224	10/305	10/305	6/183	17'7"/536	13'0"/396	45'0"/1372
100MV	2900	100M	75120/34074	245375/111301	12/366	12/366	8/244	13'9"/419	16'6"/503	49'6"/1509

Modelo	Flujo (tasa) al equipo		Peso del equipo		Agua		Aceite	VEIRSEP-P		
	GPM	BPD	Seco lbs/Kg	Operac. lbs/Kg	Entrada In/cm	Salida In/cm	salida In/cm	Altura ft-cm	Ancho ft-cm	Longitud ft-cm
150MV	4400	150M	110500/ 50122	275000/ 124738	12/366	12/366	8/244	15'0"/457	19'0"/579	70'0"/2134

Fuente: SIEMENS. Quadricell Induced Gas Flotation Separator, En: Siemens AG [En línea]. USA, SIEMENS, 2013, Disponible en: siemens.com/energy/water-solutions

3.6. DISEÑO DEL SISTEMA DE FILTRACIÓN

El diseño de un filtro como se ha mencionado antes depende especialmente del tipo de medio de filtrado, por lo que es importante asegurar un dimensionamiento óptimo para que el proceso de filtrado y limpieza del lecho se lleven a cabo de la manera más eficientemente posible. Actualmente existen diversas unidades que han sido desarrolladas con el fin optimizar el proceso. Estas han estandarizado unos modelos los cuales a partir de la cantidad de flujo a tratar se fijan ciertas dimensiones con el fin de lograr la máxima eficiencia de filtrado y de lavado, así, preservando en el mejor estado posible el material filtrante. Los diseños las tecnologías mencionadas anteriormente se resumen a continuación:

3.6.1. Power Clean – Veolia El diseño de estos equipos es posible realizarlo de manera más rápida debido a que se cuenta con la siguiente tabla que resume las características de la unidad necesarias para operar y lograr los resultados y condiciones mencionados en el capítulo dos. Esta tabla se puede decir que es función del flujo a ser filtrado.

Tabla 9. Condiciones de diseño del filtro Power Clean.

Modelo No.	Diámetro del recipiente (ft)	Área de filtración efectiva (ft ²)	Máximo flujo (BPD)	Potencia HP
PC25	2.5	4.9	2200	7.5
PC30	3	7	3200	10
PC40	4	12.6	5750	15

Modelo No.	Diámetro del recipiente (ft)	Área de filtración efectiva (ft2)	Máximo flujo (BPD)	Potencia HP
PC50	5	19.6	8960	20
PC60	6	28.3	12900	30
PC70	7	38.5	17600	30
PC80	8	50.2	22900	40
PC90	9	63.6	29000	440
PC100	10	78.5	35800	50
PC110	11	95	43400	60
PC120	12	113	51600	75
PC130	13	132	60570	100
PC140	14	153.9	70200	100
PC150	15	176.6	80600	100

Fuente: VEOLIA. Power Clean Nutshel Filters. [En línea]. USA, 2014, Disponible en: <http://www.veoliawatertech.com/whittierfiltration/ressources/files/1/24209,PowerClean-Current.pdf>

3.6.2. Auto- Shell Filter Estos filtros han estandarizado ciertas dimensiones para cada modelo desarrollado en función de la cantidad de flujo a ser tratado. En la tabla 10 se resumen los diámetros de la unidad para cada modelo, de manera que pueda cumplir con las especificaciones técnicas propuestas por sus desarrolladores.

Tabla 10. Dimensiones del filtro Auto-shell - Siemens

Flujo		Diámetro del filtro	Número modelo
BWPD	GPM		
1500	43	2'-0"	AWS-24
3250	95	3'-0"	AWS-36
5800	170	4'-0"	AWS-48
9000	265	5'-0"	AWS-60
13000	380	6'-0"	AWS-72
18000	525	7'-0"	AWS-84
23500	685	8'-0"	AWS-96
29500	860	9'-0"	AWS-108
36000	1050	10'-0"	AWS-120
44000	1283	11'-0"	AWS-132
52500	1530	12'-0"	AWS-144
61500	1793	14'-0"	AWS-156

Flujo		Diámetro del filtro	Número modelo
BWPD	GPM		
71250	2079	14'-0"	AWS-168

Fuente: SIEMENS. Auto-Shell Filter: Walnut Shell. En: Siemens AG [En línea]. USA, 2014, Disponible en Filtration <https://www.oilandgasonline.com/doc/auto-shell-filters-0001>

3.6.3. Wemco Silver Band – Schlumberger En la tabla 11 se destacan las características de diseño específicas para cada modelo desarrollado, dependiendo de su capacidad máxima de trabajo. Este diseño está gobernado por caudal de entrada a la unidad.

Tabla 11. Características de los modelos del filtro Wemco Silver Band - Schlumberger.

Modelo	Flujo [BPD]	Peso de la unidad [lbm]		Diámetros tubería [in]				Dimensiones [ft]	
		Vacía	En operación	Entrada filtro	Salida filtro	Descarga retrolavado	Normalización	Diámetro del filtro	Longitud del filtro
SB18	820	2300	3200	1	1	1	1	1 1/2	8
SB49	2300	6500	9500	2	2	2	2	2 1/2	8
SB70	3300	7500	11500	2	2	2	2	3	8
SB126	5800	10500	18500	3	3	3	3	4	8
SB196	9100	14000	27000	3	3	3	3	5	8
SB283	13100	16000	35500	4	4	3	3	6	8
SB385	17800	19500	46000	6	6	4	4	7	8
SB502	23300	21500	57500	6	6	4	4	8	8
SB636	29500	23000	70000	6	6	4	4	9	8
SB785	36400	26000	86000	8	8	6	6	10	8
SB950	44000	28500	104000	8	8	6	6	11	8
SB1130	52400	33500	124000	8	8	6	6	12	8
SB1327	61400	33900	154900	8	8	6	6	13	8
SB1539	71250	42500	204000	10	10	8	8	14	8

Fuente: SCHLUMBERGER. Wemco silver band separator. [En línea]. 2016. Disponible en: <https://www.slb.com/-/media/files/osf/product-sheet/wemco-silver-band-ps.ashx>

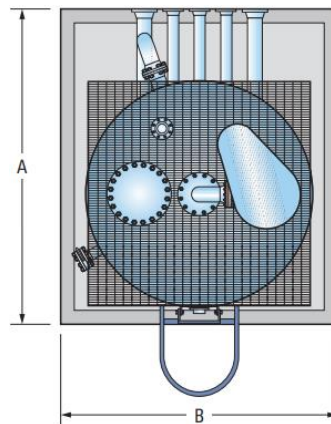
En la tabla 12 por su parte se puede ver las dimensiones generales mostradas en las figuras 33 y 34 que conforman el conjunto de recipiente y ensamblajes de todo el equipo.

Tabla 12. Dimensiones del filtro Wemo Silver Band - Schlumberger.

Modelo	Dimensiones [ft]			
	A	B	C	D
SB18	4	4	13 1/2	1
SB49	7	7	14 2/3	1
SB70	7	6	15	1 1/2
SB126	8 2/3	7	15 1/2	1 1/2
SB196	9	8	17 1/6	1 1/2
SB283	9 5/6	9 5/6	18 1/3	1 1/2
SB385	10	10	18 11/12	2
SB502	11 2/3	10	19 1/3	2
SB636	12	10	20 5/6	2
SB785	15	12	23 2/3	2
SB950	16	12	24	2 1/2
SB1130	18	12	24 5/6	2 5/6
SB1327	18	13	25 1/6	2 5/6
SB1539	18	14	26 1/2	2 5/6

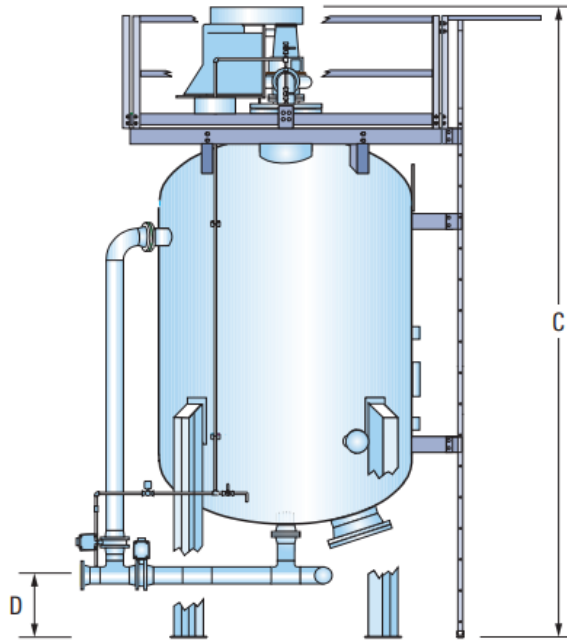
Fuente: SCHLUMBERGER. Wemco silver band separator. [En línea]. 2016. Disponible en: <https://www.slb.com/-/media/files/osf/product-sheet/wemco-silver-band-ps.ashx>

Figura 33. Vista superior del filtro.



Fuente: SCHLUMBERGER. Wemco silver band separator. [En línea]. 2016. Disponible en: <https://www.slb.com/-/media/files/osf/product-sheet/wemco-silver-band-ps.ashx>

Figura 34. Vista lateral filtro Wemco Silver Band



Fuente: SCHLUMBERGER. Wemco silver band separator. [En línea]. 2016. Disponible en: <https://www.slb.com/-/media/files/osf/product-sheet/wemco-silver-band-ps.ashx>

4. SOFTWARE PEDAGÓGICO “WATER-TREATMENT”

El software WATER-TREATMENT es una herramienta que permite el diseño de los equipos que intervienen en el tratamiento convencional de aguas de producción que se utilizan en ambientes de tierra firme (onshore) y ambientes costa afuera (offshore). Este podrá ser de gran apoyo en la asignatura facilidades de superficie del programa de ingeniería de petróleos de la Universidad Industrial de Santander. De esta manera, le permite al estudiante comprender de manera más sencilla la temática referente al tratamiento de agua de producción, tanto el principio de operación de los equipos como su adecuado diseño, basados en los métodos recopilados en el capítulo 3.

Introducción

WATER-TREATMENT fue desarrollado en el lenguaje de programación Visual Basic propiedad de la compañía Microsoft. Este lenguaje está orientado a la programación dirigida a objetos y eventos. Además, cuenta con una interfaz de fácil acceso y comprensión sencilla, permitiendo al usuario crear aplicaciones mediante diferentes recursos tales como menús, formularios, controles, archivos multimedia, bases de datos, entre otros.

El software WATER-TREATMENT desarrolló una interfaz de entrada donde se integran todos los módulos de trabajo de la herramienta. Organizada de tal manera que el usuario pueda identificar a simple vista los equipos que intervienen en el sistema de tratamiento de agua de producción. Estos se encuentran en la pantalla principal en la parte superior. Como se muestra en figura 35 hay 7 módulos cada uno con su respectivo ícono, correspondiente al diseño individual de cada uno y uno que integra el montaje de varios equipos. Estos son: Separador API, CPI, Hidrociclón, Skim vessel, celda de flotación, sistema de filtración y el sistema de tratamiento completo.

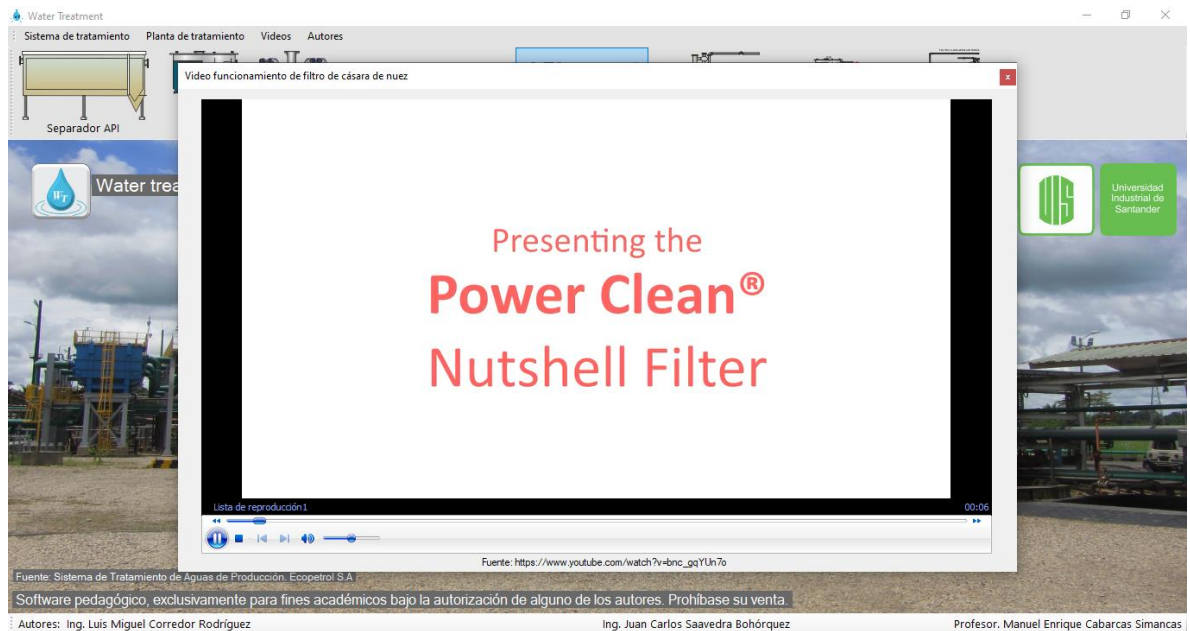
Figura 35. Interfaz principal del software WATER-TREATMENT.



En la pantalla principal es posible observar un menú desplegable en el que se agrupan los módulos de diseño según la etapa de tratamiento del equipo. Además de contar con el menú para diseñar un sistema completo para un ambiente de operación determinado (onshore u offshore). Además, cuenta material fotográfico de imágenes reales de los equipos y videos en los cuales se explica el concepto técnico de operación de cada unidad. En la figura 36 se muestra la interfaz de uno de los videos que contiene el software WATER-TREATMENT.

Algunos equipos son diseñados mediante modelos matemáticos encontrados en la literatura, para los cuales aparece el procedimiento paso por paso con su respectiva fórmula, mientras que otros su diseño es tomado de modelos estándar desarrollados por compañías reconocidas en el tratamiento químico del agua de producción a nivel mundial.

Figura 36. Video filtro Power Clean – Veolia



Para el diseño del primer equipo el cual es un separador API, es necesario introducir ciertas propiedades del fluido a tratar, tales como: el flujo de agua, la temperatura del fluido, la gravedad API del aceite a separar, la densidad del agua y su viscosidad, el diámetro de la gota a separar, el diámetro de la gota de aceite más grande y la concentración de este (ver figura 37). De esta manera será posible calcular las dimensiones del separador como el número de canales, el ancho, longitud, profundidad y una aproximación a la concentración de aceite a la salida del equipo.

Del mismo modo, para el diseño del separador CPI es necesario ingresar las propiedades del flujo a tratar (agua y crudo) y también se inscribe ciertas condiciones de operación a las cuales operará la unidad tales como el patrón de flujo (ascendente o descendente), la distancia entre placas y el ángulo de estas con el eje horizontal (45° o 60°). (ver imagen 38).

Figura 37. Datos de entrada para el diseño del separador API.

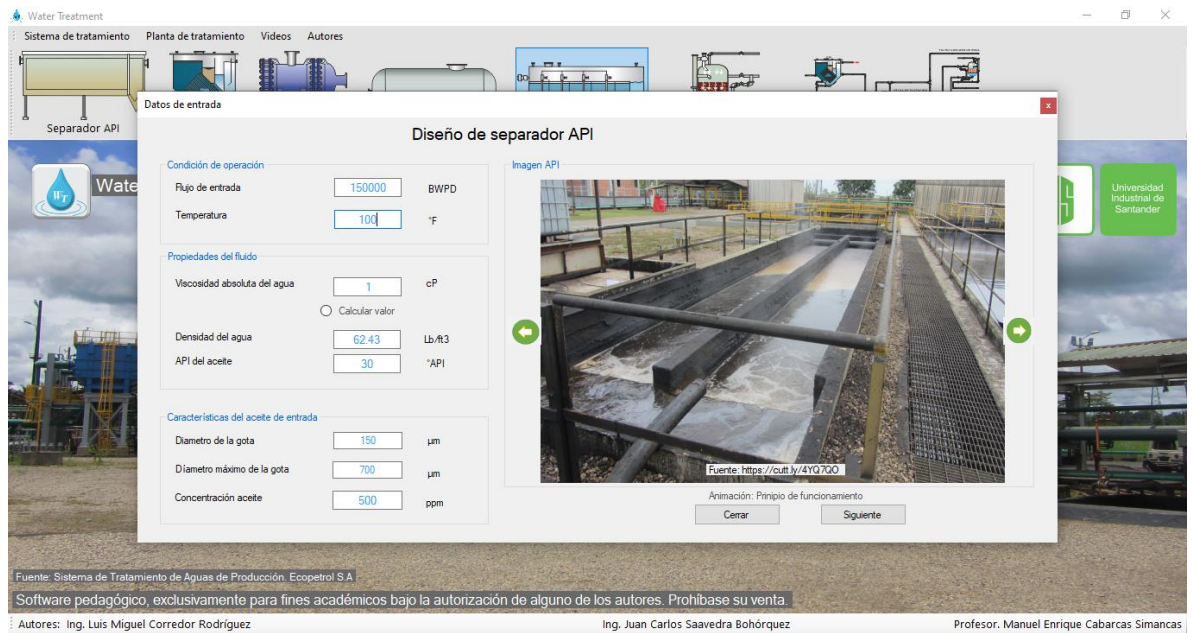
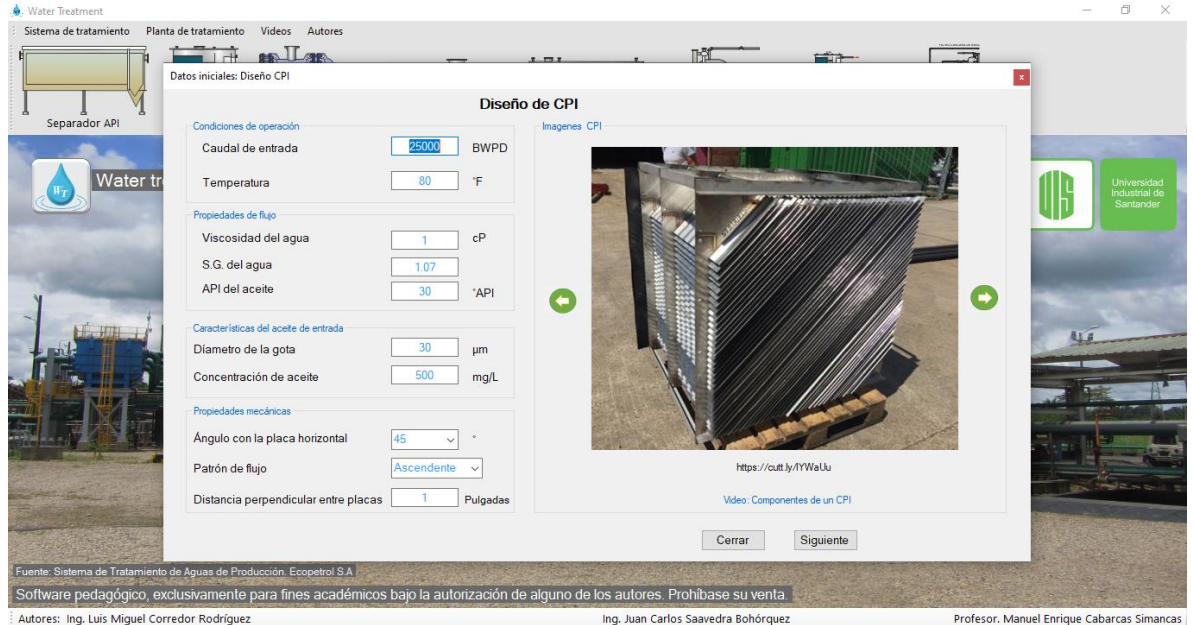


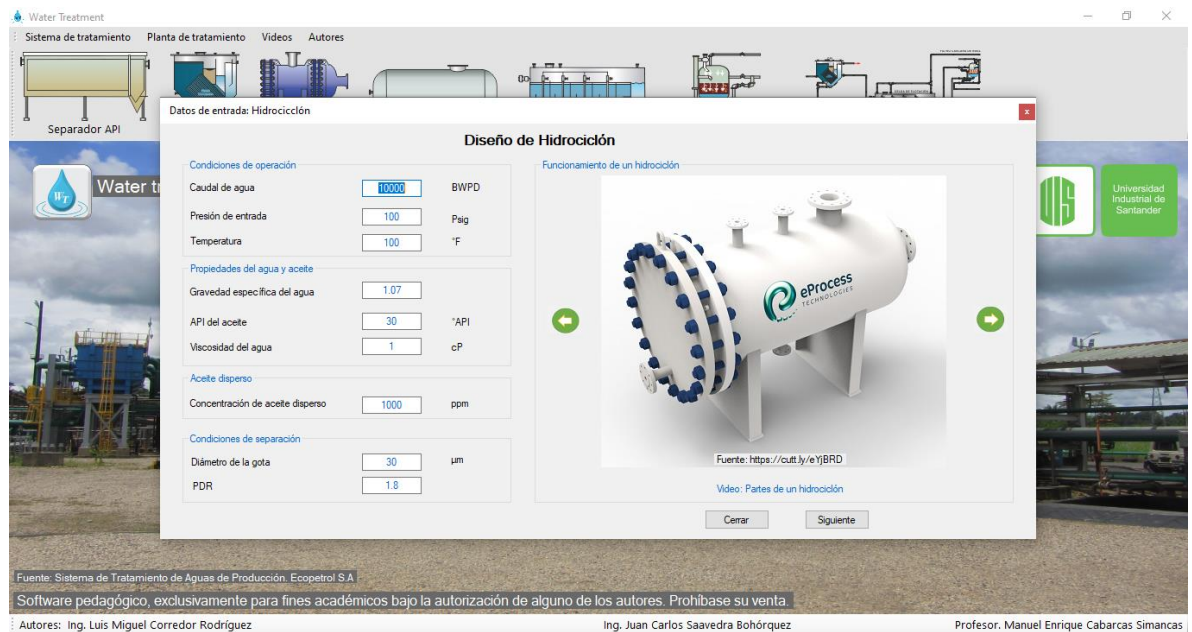
Figura 38. Datos de entrada par diseño del CPI



El tercer módulo de diseño corresponde al hidrociclón, en este módulo es necesario introducir además de las caracterpisticas del fluido la relación entre las caídas de

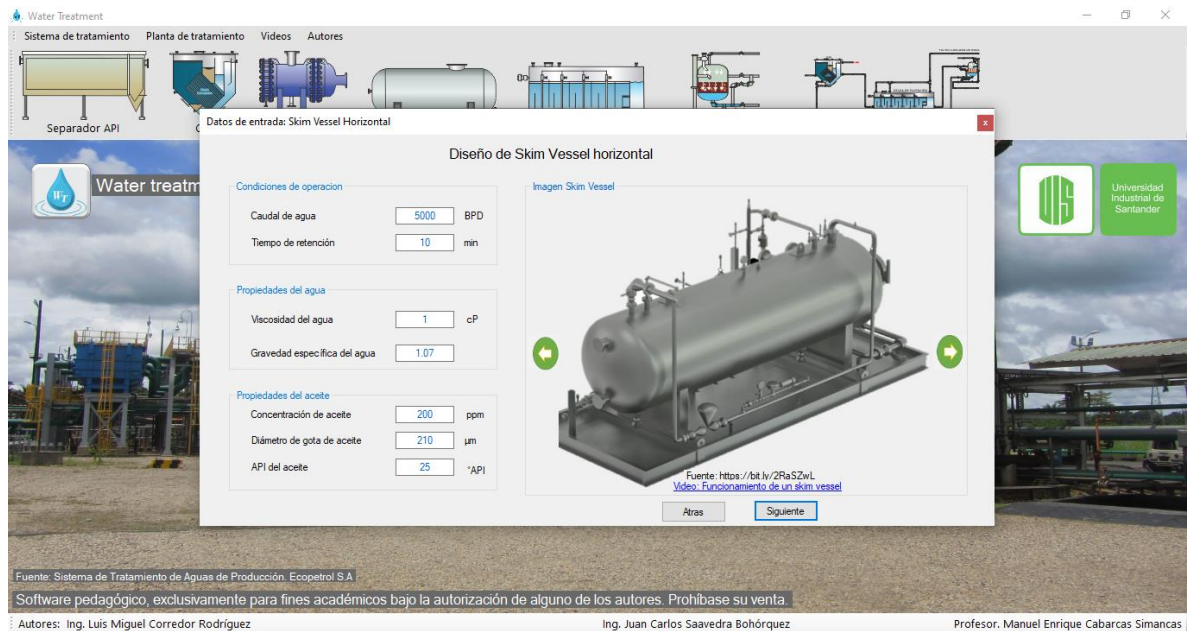
presión entre el overflow y el underflow lo cual es necesario para el caculo de una de las eficiencias. Este valor es sugerido por el software y tendrá un rango del cual no es posible salir y que la herramienta valida antes de realizar los cálculos. Ver figura 39.

Figura 39. Datos de entrada para diseño de hidrociclón.



El cuarto módulo por su parte pertenece al diseño de los skim vessel, de entrada, el usuario debe escoger la configuración que va a utilizar en el diseño ya horizontal o verticalmente, posteriormente debe introducir las propiedades del fluido a tratar y el tiempo de retención del líquido dentro de la unidad de separación. (Ver figura 40). Son estos 4 módulos los encargados del diseño de los equipos de tratamiento primario donde su principal principio es la separación por la fuerza de gravedad, de los cuales todos están diseñados mediante modelos matemáticos registrados en la literatura.

Figura 40. Datos de entrada para diseño de skim vessel horizontal.

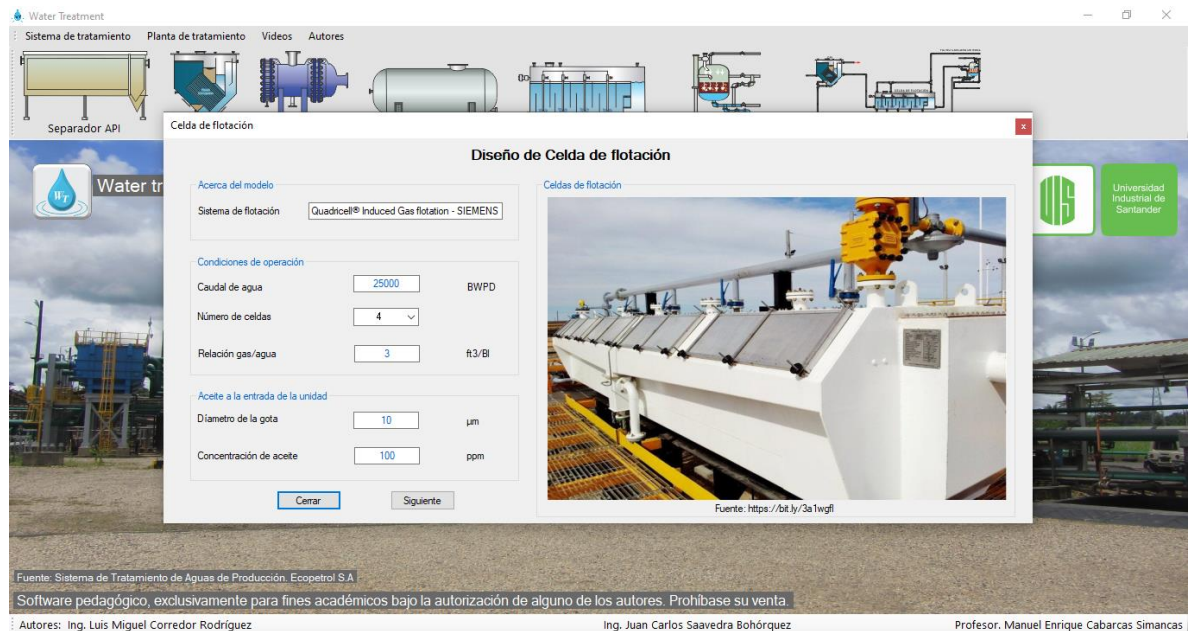


Con respecto al tratamiento secundario donde el principio de operación de los equipos es la separación por flotación con burbujas de gas, se ha creado el quinto módulo donde el usuario podrá seleccionar entre tres tipos de unidades desarrolladas y aplicadas a nivel mundial. El usuario podrá escoger entre dos equipos de flotación por gas inducido, uno de ellos uno por operación mecánica (Quadricell) y otro por operación hidráulica (Hydrocell). Además de un tercer equipo que opera bajo el principio de flotación por gas disuelto (Veirsep). Es importante tener en cuenta que estos equipos tienen diseños estandarizados por lo que su diseño siempre tiene fijo que la cantidad de celdas por unidad es cuatro.

Para el diseño de cada equipo se tiene en cuenta la cantidad de fluido a tratar, la concentración de aceite a la entrada de la unidad y el diámetro de la gota a separar, la relación de gas/agua que se utiliza, la cual varía dependiendo el tipo de unidad que se seleccione (figura 41). Además, será necesario ingresar para la unidad Hydrocell y Veirsep la relación de agua que se reutiliza para su operación. El

programa valida que los valores ingresados se encuentren dentro de la ventana operativa de la unidad correspondiente.

Figura 41. Datos de entrada diseño celda de flotación Quadricell.



El sexto módulo corresponde al diseño de los filtros (ver figura 42). El usuario podrá escoger entre tres tipos de filtros: Auto Shell filter, Wemco Silver Band y Power clean, los cuales poseen características de diseño particulares y que fueron explicadas en el capítulo 3 y también se describen en el software. Todos ellos utilizan cascarilla de nuez como material filtrante.

Finalmente, el módulo 7 (figura 43) corresponde al diseño completo del sistema de tratamiento donde se podrá diseñar para el ambiente en el que se desee trabajar, ya se onshore o también offshore. El usuario podrá seleccionar el equipo que desee para el sistema de tratamiento primario y que cumpla con los parámetros de operación necesarios. Sin embargo, si la elección corresponde a un ambiente de trabajo costa afuera, la cantidad de equipos disponibles se reduce debido a las restricciones que tienen las operaciones allí (ver figura 44). Por esta razón el

sistema de tratamiento terciario no estará disponible, al igual que el separador API del sistema primario.

Figura 42. Datos de entrada para diseño del filtro Power Clean – Veolia.

Water Treatment

Sistema de tratamiento Plantas de tratamiento Videos Autores

Separador API CPI Diseño: filtro de cáscara de nuez

Diseño filtro de cáscara de nuez

Filtro de cáscara de nuez

Condiciones de diseño

Tipo de filtro
Equipo de trabajo: Power Clean nutshell filter - Veolia

Condiciones de operación

Caudal de agua: 20000 BWPD
Tamaño de la gota: 2 µm

Condiciones de operación

Concentración de aceite: 20 ppm
Eficiencia de remoción: 98 %

Cerrar Siguiente

Fuente: Ecopetrol S.A.

Fuente: Sistema de Tratamiento de Aguas de Producción, Ecopetrol S.A.

Software pedagógico, exclusivamente para fines académicos bajo la autorización de alguno de los autores. Prohibase su venta.

Autores: Ing. Luis Miguel Corredor Rodríguez Ing. Juan Carlos Saavedra Bohórquez Profesor. Manuel Enrique Cabarcas Simancas

Figura 43. Diseño del sistema de tratamiento en ambiente onshore.

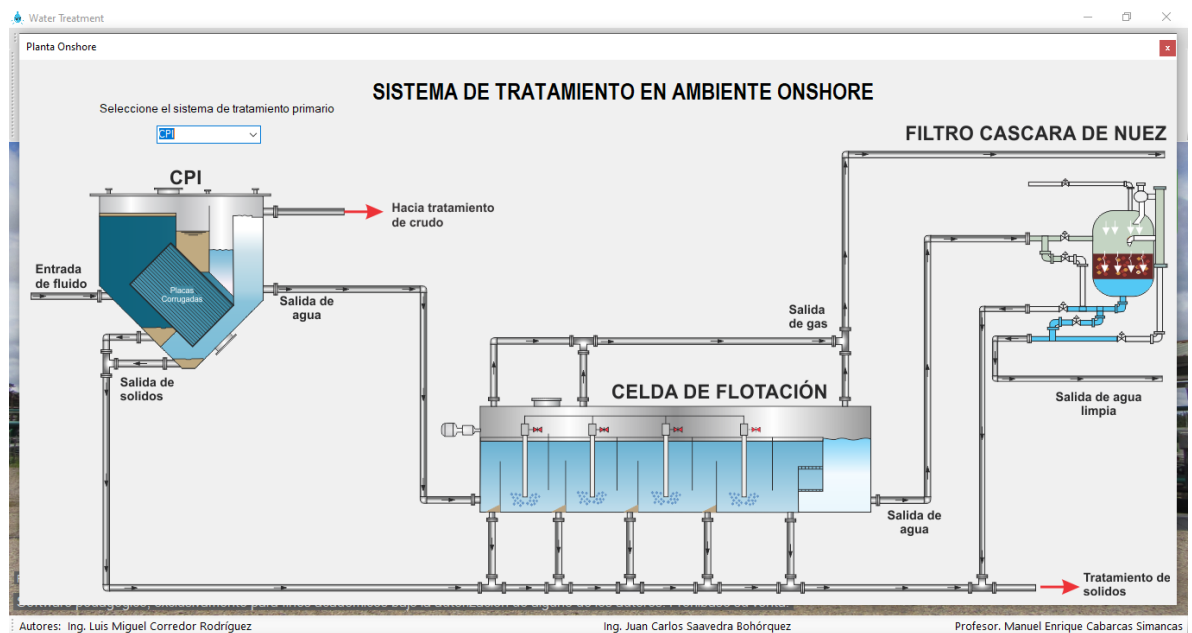
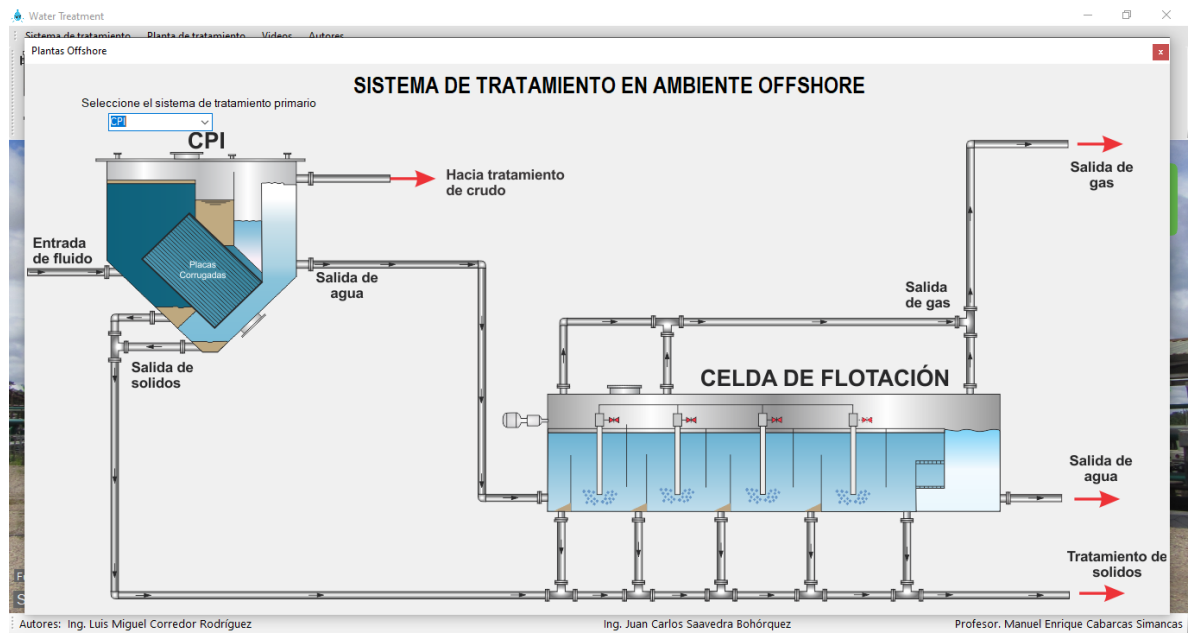


Figura 44. Diseño del sistema de tratamiento en ambientes offshore.



5. VALIDACIÓN DEL SOFTWARE

La validación del software WATER-TREATMENT se realizó para los primeros cuatro módulos de diseño, correspondiente al sistema de tratamiento primario. Estos datos se validaron con información de la literatura. Para el diseño del separador API se utilizó el ejemplo de diseño encontrado en la publicación Monographs on refinery environmental control – Management of water discharges. Design and operation of oil-water separators y en la hoja de cálculo proveída por la compañía Hydro-Flo Technologies Inc para el diseño específico de un separador API. La validación de los demás equipos se realizó con los ejemplos expuestos en el capítulo 3 Produced Water Treatment Systems del libro Emulsions and Oil Treating Equipment Selection, Sizing and Troubleshooting.

Tabla 13. Validación del diseño del separador API

Propiedad	Unidades	Water-Treatment	Literatura	%Error
Cantidad de canales	-	2	2	0.00%
Ancho del canal	Ft	18.26	18	1.44%
Largo del canal	Ft	95	105	9.52%
Profundidad	Ft	5.479	6	8.68%
Velocidad horizontal de flujo	Ft/min	3	3	0.00%
Velocidad de ascenso del aceite	Ft/min	0.267	0.267	0.00%

Tabla 14. Validación del diseño del CPI.

Propiedad	Unidades	Water-Treatment	Literatura	%Error
Número de paquetes de platos	-	2	1	100%
Relación H*W	Ft ²	11.518	10.56	8.32%
Volumen mínimo del equipo	Ft ³	60.891	60.73	0.27%

Con respecto a las dimensiones del hidrociclón se calcularon de acuerdo con la tabla número 4 del capítulo 3. Donde dependiendo el tipo de liner seleccionado sus

dimensiones serán proporcionales al diámetro de la sección cónica digitado. Por lo tanto, estos valores dan exactamente iguales a los valores de la literatura.

Tabla 15. Validación de diseño del hidrociclón.

Propiedad	Unidades	Water-Treatment	Literatura	%Error
Eficiencia de separación por tamaño de gota	%	88.372	88	0.42%
Eficiencia de separación por PDR	%	71.365	75	4.85%
Relación de flujo expulsado	%	1.572	1.6	1.75%

Tabla 16. Validación de diseño de skim vessel vertical

Propiedad	Unidades	Water-Treatment	Literatura	%Error
Diámetro comercial	in	60	60	0.00%
Longitud entre costuras	ft	12.96	12.7	2.05%
Altura de la columna de agua	ft	9.722	11.07	12.18%
Diámetro mínimo requerido	in	55.645	56.22	1.02%

Tabla 17. Validación de diseño de skim vessel horizontal

Propiedad	Unidades	Water-Treatment	Literatura	%Error
Diámetro comercial	ft	96	96	0.00%
Longitud entre costuras	ft	10.13	10.1	0.30%

Finalmente, para la concentración de aceite removido se utilizó la correlación explicada en la sección de diseño (capítulo 3), en la tabla 18. Se puede observar el porcentaje de desviación de este cálculo.

Tabla 18. Validación de remoción de aceite

Propiedad	Unidades	Water-Treatment	Literatura	%Error
Aceite removido	ppm	71.75	71.75	0.00%
Aceite remanente	ppm	183.625	183.6	0.01%

6. CONCLUSIONES

La producción de agua a nivel mundial sigue una tendencia en aumento tanto en operaciones costa afuera como en tierra firme, y a su vez las regulaciones ambientales para la disposición final de este fluido son más estrictas, por lo que el control de los parámetros de calidad del agua producida se ha convertido en un aspecto de suma importancia en las operaciones de producción de un campo. De este modo, la selección del tipo de tecnología a usar en el tratamiento de este fluido es un punto muy importante a la hora de planear la puesta en marcha de nuevos proyectos de producción de hidrocarburos.

A partir de la revisión bibliográfica fue posible concluir que es necesario conocer las características del fluido a tratar y el ambiente de trabajo, para así realizar un diseño óptimo de la tecnología adecuada, de manera que se cumplan los parámetros requeridos en el flujo de agua a la salida de los equipos.

Se ha desarrollado una herramienta informática con una interfaz amigable para el usuario, de fácil manejo y con diversos módulos de cálculos de diseño, que al final los resultados se resumen en diagramas e imágenes de fácil comprensión. Convirtiéndose en un gran apoyo durante el aprendizaje referente al tema en la materia facilidades de superficie.

El software Water Treatment es una herramienta que le brinda al estudiante una ayuda al momento de adquirir conocimientos en el diseño de las unidades de los sistemas de tratamiento de aguas de producción, permitiendo al estudiante centrarse en la comprensión del principio de operación de estos y no en los cálculos de procedimientos repetitivos y mecánicos.

Al desarrollarse la herramienta basada en normas de diseño, parámetros, especificaciones de la literatura y diseños de equipos comerciales, es posible inferir los resultados tiene un error de máximo 12% con respecto a ejemplos aplicados.

7. RECOMENDACIONES

Se recomienda tener en cuenta la dosificación y el efecto del tratamiento químico que se agrega durante el proceso para algunas etapas de tratamiento del agua de producción. De esta manera, cuantificar el efecto de este a la eficiencia de remoción de los equipos.

Implementar un nuevo módulo de cálculo en el que sea posible diseñar equipos para el tratamiento de los sólidos separados del agua de producción, tales como: lechos de secado, decantadores, espesadores, entre otros. Así, el diseño del sistema de tratamiento de aguas de producción sería integral.

Agregar al software el diseño de equipos que permitan el control de la temperatura del agua producida, de manera que esta sea disminuida hasta las condiciones permitidas por la legislación ambiental nacional, cuando la disposición final es el vertimiento a un cuerpo de agua.

Integrar el funcionamiento de las bombas que utilizan algunos de los equipos de tratamiento. Debido a que éstas son factores claves en el desempeño de estos.

BIBLIOGRAFÍA

AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE. Monographs on Refinery Environmental Control- Management of Water Discharges: Design and Operation of Oil-Water Separators. Washington, D.C., 1990.

ARNOLD, Ken; STEWART, Maurice. Produced Water Treatment Systems. En: Emulsions and Oil Treating Equipment: Selection, Sizing and Troubleshooting. [En línea]. Gulf Professional Publishing Elsevier, Houston, Texas: Diciembre, 2008. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/B978-0-7506-8970-0.X0001-1>

ARTHUR, J. Daniel; LANGHUS, Bruce G.; PATEL, Chirag. Technical summary of oil & gas produced water treatment technologies. Tulsa, 2005.

BRANDT M., et al. Water Filtration. Twort's Water Supply. En: Water filtration. [En línea]. 7 ed. Butterworth-Heineman, 2017. p. 367–406. Disponible en: [doi:10.1016/b978-0-08-100025-0.00009-0](https://doi.org/10.1016/b978-0-08-100025-0.00009-0)

CAMERON. VORTOIL Deoiling Hydrocyclones Proven efficient separation systems. [En línea]. USA, 2010. Disponible en: <https://www.slb.com/-/media/files/osf/product-sheet/vortoil-ps.ashx>

GARCÍA, Juan; HERRERA, Sergio; CABARCAS, Manuel. Manejo del agua de producción para proyectos de gas en aguas profundas y ultraprofundas del Caribe Colombiano. En: Revista Fuentes: El reventón energético. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander, Julio-diciembre, 2017, Vol. 15, no.2. p. 89-105

HAN, Yunrui, et al. A review of the recent advances in design of corrugated plate packs applied for oil–water separation. En: Journal of Industrial and Engineering

Chemistry. [En línea]. China, Elsevier, Abril, 2017, vol. 53, p. 37-50. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jiec.2017.04.029>

HAYES, J.J; CARROLL, W.C.; FOTHERGILL, DW.J. Hydrocyclones for treating oily water: development and field testing in Bass Strait. [En línea]. Houston, Texas, Mayo, 1985. Disponible en: [http:// https://www.onepetro.org/conference-paper/OTC-5079-MS](http://https://www.onepetro.org/conference-paper/OTC-5079-MS)

Kharoua N.; Khezzar L.; Nemouchi Z. Hydrocyclones for Deoiling Applications—A Review. En: Petroleum Science and Technology. [En línea]. Abu Dhabi: 2010, Vol. 28, no.7. p. 738-755. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1080/10916460902804721>

MORALES RINCON, María Camila; REVELO NÚÑEZ, Astrid Carolina. Desempeño técnico y ambiental de las tecnologías convencionales y modernas de tratamiento de agua producida. [En línea]. Trabajo de grado. Bucaramanga. Universidad Industrial de Santander. Facultad de ingenierías fisicoquímicas. Escuela de Ingeniería de Petróleos. 2016. Disponible en: <http://hdl.handle.net/123456789/19024>

PATTON, Charles C. Applied water technology. En: Water processing technology: Suspended oil removed. [En línea]. Campbell Petroleum Series. Dallas, USA: Septiembre, 1995. Disponible en: https://kupdf.net/download/dr-charles-c-patton-applied-water-technology-bookos-org_58f9f333dc0d60c850959eae_pdf

PROCESS GROUP. Nut Shell filters. [En línea]. 2014. Disponible en: http://www.processgroupintl.com/media/downloads/D05_Nut_Shell_Filters,_rev_4-2014.pdf

SATHTHASIVAM, Jayaprakash; LOGANATHAN, Kavithaa; SARP, Sarper. An over view of oil–wáter separation using gas flotation systems. En: Journal Industrial and engineering chemistry. [En línea]. Qatar, Elsevier, 2015, Vol. 144, p 671-680. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.chemosphere.2015.08.087>

SCHLUMBERGER. Wemco silver band separator. [En línea]. 2016. Disponible en: <https://www.slb.com/-/media/files/osf/product-sheet/wemco-silver-band-ps.ashx>

SCHULTZ, Thomas E. Get the most API out of API separators. Siemens. Estados Unidos, 2005.

SCHULTZ, Thomas E. Industrial Oily Wastewater pretreatment. Siemens. [En línea]. 2005. Disponible en: <http://www.sawea.org/pdf/siemens.pdf>

SCHULTZ, Thomas E. Industrial Oily Wastewater pretreatment. Siemens. 2005. SIEMENS Auto-Shell Filter: Walnut Shell. En: Siemens AG [En línea]. USA, 2014, Disponible en: <https://www.oilandgasonline.com/doc/auto-shell-filters-0001>

SIEMENS. Hydrocell Induced Gas Flotation Separators, En: Siemens AG [En línea]. USA, SIEMENS, 2013, Disponible en: siemens.com/energy/water-solutions.

SIEMENS. Quadricell Induced Gas Flotation Separators, En: Siemens AG [En línea]. USA, SIEMENS, 2013, Disponible en: siemens.com/energy/water-solutions.

SIEMENS. VEIRSEP™ Horizontal Flotation System, En: Siemens AG [En línea]. USA, 2014, Disponible en: siemens.com/energy/water-solutions.

SIEMENS. VEIRSEP™ Horizontal Flotation System, En: Siemens AG [En línea]. USA, SIEMENS, 2014, Disponible en: siemens.com/energy/water-solutions.

The Produced Water Society. What is produced water?. [En línea]. 2017. [Consultado el 24 de junio de 2019]. Disponible en: <http://www.producedwatersociety.com/produced-water-101/>

VEOLIA. Power Clean Nutshel Filters. En: Siemens AG [En línea]. USA, 2014, Disponible en: <http://www.veoliawatertech.com/whittierfiltration/ressources/files/1/24209,PowerClean-Current.pdf>

WALSH, John. Hydrocyclone webinar. [En línea]. Diciembre, 2013. Disponible en: <https://docplayer.net/35414869-Hydrocyclone-webinar-john-walsh-phd-cetco-energy-services-dec-2013.html>

ANEXOS

Anexo A. Manual de usuario

Guarde la carpeta que contiene el paquete de instalación del software WATER-TREATMENT en su ubicación de interés y ejecute el instalador.

Inicie el software y espere hasta que aparezca la interfaz de entrada donde se encuentran los módulos de diseño.



El usuario tendrá a disposición 7 módulos de diseño para diseñar cada equipo individualmente: Separador API, CPI, hidrociclón, skim vessel, celdas de flotación y filtros. El séptimo corresponde al diseño completo de un sistema completo de tratamiento de agua de producción con dos etapas (offshore) o tres etapas (onshore) según la elección.

Antes de proceder a realizar el diseño tenga en cuenta lo siguiente:

- Para algunos datos de entrada el software contará con información en cuadros flotantes al pasar el puntero sobre los cuadros de texto donde se ingresa estos

valores. La información que aparece le brinda al usuario una referencia de cual es rango óptimo con el que trabaja el equipo que está diseñando.

- Los datos editables, es decir, todos los datos de entrada aparecen escritos en azul oscuro, mientras que los resultados o datos de salida aparecen en color negro.

Diseño del separador API

En este punto el usuario deberá ingresar los datos referentes a las características del flujo a tratar. Entre ellas la viscosidad del agua a tratar, la cual puede ser completada de dos maneras: de manera manual cuando se conoce este dato, o a partir de una correlación que está configurada en software, calcular este valor dependiendo de la temperatura ingresada en la misma ventana.

Una vez realizado el paso anterior los cálculos pertinentes se ejecutarán automáticamente hasta llegar a la ventana donde se deberá escoger el punto adecuado para poder hallar el valor de variable de corto-circuito de la unidad, la cual es necesaria para el cálculo de la longitud de los canales.

The screenshot shows a software window titled "Water Treatment" with a menu bar containing "Sistema de tratamiento", "Planta de tratamiento", "Videos", and "Autores". Below the menu are icons for "Separador API" and "CPI". The main content area features a graph titled "Gráfica factor de turbulencia" and "Factor de Turbulencia y Corto circuito [F]". The graph plots "Factor de turbulencia y corto circuito, F" on the y-axis (ranging from 1.2 to 1.8) against "Relación vH/Vt" on the x-axis (ranging from 0 to 20). A blue line represents the correlation, and a vertical orange line is drawn at x=10.067, intersecting the blue line at y=1.511. Below the graph, the source is cited as "Fuente: Monographs on refinery environmental control-management of water discharges.1990. p. 10".

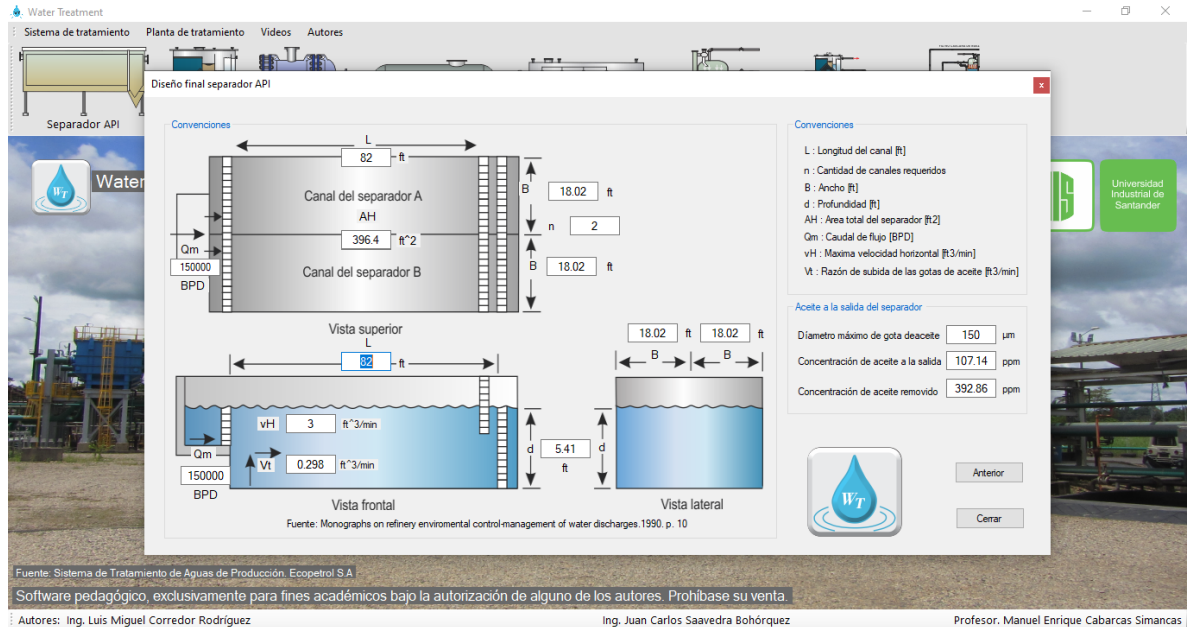
The "Cálculos" section contains the following information:

Relación entre velocidades VH/Vt $X = v_H / V_t$

Factor F $F = -0.0006x^2 + 0.0421x + 1.1535$

At the bottom of the window, there is a footer with the following text: "Fuente: Sistema de Tratamiento de Aguas de Producción. Ecopetrol S.A", "Software pedagógico, exclusivamente para fines académicos bajo la autorización de alguno de los autores. Prohibase su venta.", "Autores: Ing. Luis Miguel Corredor Rodríguez", "Ing. Juan Carlos Saavedra Bohórquez", and "Profesor. Manuel Enrique Cabarcas Simancas".

Posteriormente el usuario podrá visualizar las dimensiones y las condiciones de salida del fluido en la ventana final del dimensionamiento de la unidad.



Diseño del CPI

Para este caso de diseño el usuario deberá ingresar las características del fluido a tratar y deberá especificar unas variables de operación preliminares de la unidad. El usuario deberá especificar las siguientes condiciones de operación:

Patrón de flujo

El usuario deberá seleccionar el tipo de patrón de flujo que entra al equipo. Este dato puede ser igual “vertical” u “horizontal”.

Angulo con la placa horizontal

Este dato corresponde al ángulo que tendrá la placa de coalescencia con respecto al eje horizontal del equipo. Este dato podrá ser 45° o 60°.

Espaciamiento entre placas:

Según el tipo de patrón de flujo seleccionado anteriormente el usuario deberá especificar la distancia entre las placas de coalescencia, cada una tiene un límite de distancia mínimo donde para patrones de flujo ascendente este valor será mínimo de 1 pulgada y para flujo descendente 0.75 pulgadas.

Una vez realizado el paso anterior el usuario podrá visualizar los cálculos realizados automáticamente por el software hasta llegar a la ventana final, donde es necesario ingresar la distribución del tamaño de las gotas de aceite en la corriente de entrada, para el cálculo de la calidad del agua a la salida del separador. En esta ventana se debe completar la tabla donde se digita en la primera columna el tamaño menor de un rango de tamaño de gotas, en la segunda el límite superior de dicho rango, en la tercera la relación de esta distribución en todo el fluido aceitoso. Finalmente, el usuario podrá dar click en calcular para hallar la cantidad de aceite removido en este equipo.

The screenshot displays a software window titled "Water Treatment" with a navigation menu including "Sistema de tratamiento", "Planta de tratamiento", "Videos", and "Autores". The main content area is divided into several sections:

- Concentración final de aceite:** A horizontal bar chart showing the distribution of oil concentration across different treatment stages.
- Distribución del aceite disperso a la entrada del equipo:** A table with the following data:

Tamaño de la gota 1	Tamaño de gota 2	Concentración [%vol]
0	40	9
40	60	14
60	80	30
80	100	35
100	120	10
120	500	2
- Esquema de un CPI de flujo ascendente:** A schematic diagram of a vertical separator showing the flow of oil, water, and sand, with labels for "Entrada de arena y agua aceitosa", "Salida de aceite", "Acuífero", "Ventilación", "Vertedero ajustable", "Salida de agua limpia", "Suministro de agua a presión", "Bomba de agua a presión para limpieza", and "Salida secundaria de arena".
- Concentración de aceite disperso o la salida:** A section with input fields and calculated results:
 - Porcentaje de aceite removido: 93.25 %
 - Concentración de aceite disperso: 33.75 mg/L
 - Concentración total de aceite: 33.75 mg/L

At the bottom of the window, there is a footer with the following text: "Fuente: Sistema de Tratamiento de Aguas de Producción, Ecopetrol S.A. Software pedagógico, exclusivamente para fines académicos bajo la autorización de alguno de los autores. Prohibase su venta. Autores: Ing. Luis Miguel Corredor Rodríguez, Ing. Juan Carlos Saavedra Bohórquez, Profesor. Manuel Enrique Cabarcas Simancas".

Diseño del hidrociclón

Una vez ingresados todos los valores de diseño que pide la ventana inicial de diseño. Una vez realizado este paso en la siguiente ventana se debe completar la tabla de distribución del tamaño de gota, de la misma manera que se realizó en el diseño del CPI. Posteriormente, el Usuario podrá llegar de manera intuitiva a través de las ventanas de cálculos hasta la ventana donde deberá escoger el modelo de liner para el diseño.

Allí podrá escoger entre tres modelos diferentes: Colman-Thew, Hargreave-Silver o Belaidi. Al hacer click en el ícono azul de información, se desplegará una tabla con las relaciones dimensionales utilizadas para el cálculo de las mediadas. Se cuenta con un esquema al costado derecho de la venta, donde se ubica cada sección del liner calculada.

Para realizar el dimensionamiento del liner será necesario especificar la medida del diámetro de la sección que une las dos secciones cónicas (D_{tap}). Este valor debe estar entre 1.1811 pulgadas y 2.28235 pulgadas.

Water Treatment

Sistema de tratamiento Planta de tratamiento Videos Autores

Dimensiones del Hidrociclón

Dimensiones

Seleccione el tipo de hidrociclón: 35 mm Colman-Thew

Dt: 2 in

Dímetro de la unión entre las dos secciones de reducción: Dtap

Dímetro de la entrada: Di: 0.229 in

Dímetro de la salida de aceite: Do: 0.2 in

Dímetro de la salida de agua: Du: 1 in

Dímetro de la sección cónica del hidrociclón: Ds: 4 in

Longitud de la cola: Lt: 5 ft

Longitud sección cónica: Ls: 0.333 ft

Longitud total del hidrociclón: L: 7.333 ft

Swift chamber taper

Primera reducción: α° : 0

Segunda reducción: β° : 10

Condiciones de operación

Cantidad de equipos: 1

PDR: 1.572

Número de Liners necesarios por equipo: 32

Razón de fluido rechazado: 1.572 %

Caudal de salida de agua: 9842.8

Esquema

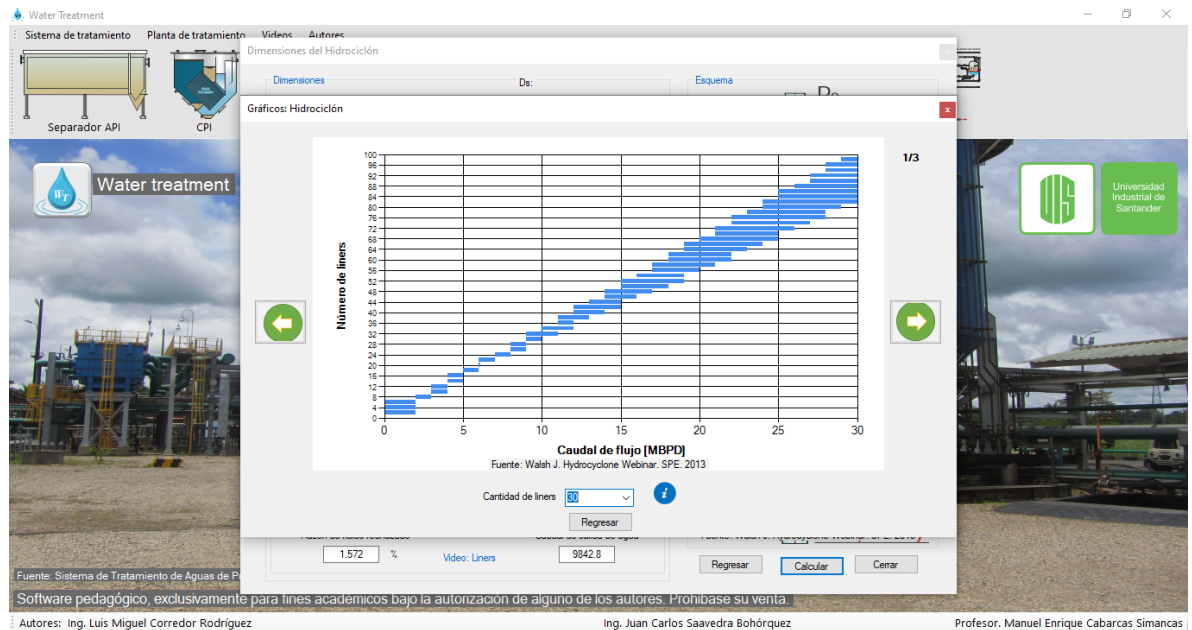
Fuente: Walsh J. Hydrocyclone Webinar. SPE. 2013

Regresar Calcular Cerrar

Software pedagógico, exclusivamente para fines académicos bajo la autorización de alguno de los autores. Prohibase su venta.

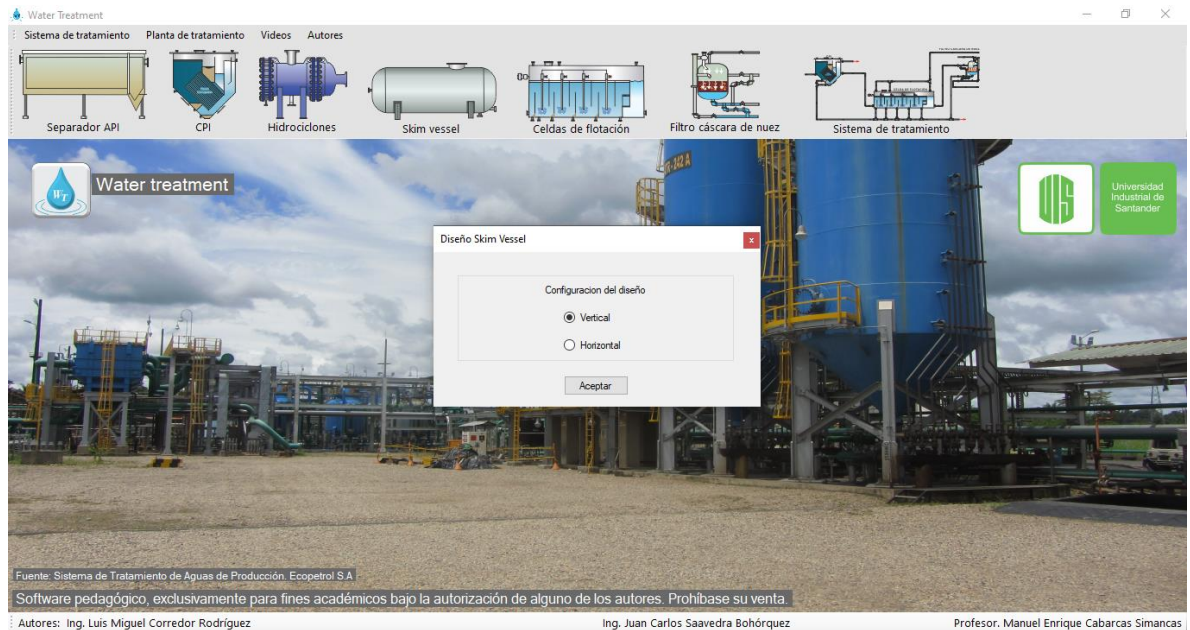
Autores: Ing. Luis Miguel Corredor Rodríguez Ing. Juan Carlos Saavedra Bohórquez Profesor. Manuel Enrique Cabarcas Simancas

Finalmente, para obtener los datos de la cantidad de liners en la unidad, el usuario deberá dar click en el botón calcular y en la ventana emergente seleccionar alguna cifra de cantidad de liners disponibles según el fluido de entrada a la unidad.



Diseño del Skim vessel

El diseño de este equipo puede realizarse de dos maneras diferentes debido a la configuración seleccionada inicialmente, puede ser vertical u horizontal.



Skim vessel vertical

Para el diseño de este equipo, como en los diseños anteriores se debe ingresar las características del flujo y además el tiempo de residencia en la unidad para que se lleve a cabo la separación. Para este caso, el usuario deberá digitar la tabla de distribución del tamaño de las gotas de aceite de la misma manera que en los diseños de equipos anteriormente descritos.

Finalmente, el usuario podrá acceder a los valores de concentración de aceite removido y las dimensiones del equipo como longitud entre costuras y diámetro del recipiente.

Skim vessel horizontal

Para el diseño de este equipo, como en los diseños anteriores se debe ingresar las características del flujo y además el tiempo de residencia en la unidad para que se lleve a cabo la separación. Para este caso, el usuario deberá digitar la tabla de distribución del tamaño de las gotas de acetate de la misma manera que en los diseños de equipos anteriormente descritos.

En la siguiente ventana, el usuario deberá escoger un tipo de diámetro disponible según los cálculos realizados y tomados de las tablas. Al seleccionar un diámetro, se calcula la longitud correspondiente a este.

Water Treatment

Sistema de tratamiento Planta de tratamiento

Separador API CPI

Water treatment

Diametro requerido

Dimensiones mínimas requerido

Diferencia de gravedad específicas

$$\Delta SG = SG_W - SG_o = 0.166$$

Diametro requerido del tanque

$$dL_{eff} = \frac{1000Q_w H_w}{(\Delta SG)(d_m)^2}$$

$dL_{eff} = 683$ in

Dimensiones finales

Diametro final requerido para el tanque

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

$d^2 L_{eff} = 70000$ in

Diametros comerciales

d (in)	Leff (ft)	Longitud real (ft)
18.00	42.69	56.92
20.00	34.15	45.53
24.00	28.46	37.94
30.00	22.77	30.36
36.00	18.97	25.30
42.00	16.26	21.68
48.00	14.23	18.97
54.00	12.65	16.86
60.00	11.38	15.18
72.00	9.49	12.65
84.00	8.13	10.84
96.00	7.11	9.49

Calculador Seleccione diametro: 84

Botones: Atras, Distribución de tamaño de gota, Diseñar

Fuente: Sistema de Tratamiento de Aguas de Pro...
 Software pedagógico, exclusivamente para fines académicos bajo la autorización de alguno de los autores. Prohibase su venta.
 Autores: Ing. Luis Miguel Corredor Rodríguez Ing. Juan Carlos Saavedra Bohórquez Profesor. Manuel Enrique Cabarcas Simancas

Finalmente, las dimensiones calculadas y la concentración de aceite removido y remanente en el efluente se mostrarán en la siguiente ventana.

Water Treatment

Sistema de tratamiento Planta de tratamiento Videos Autores

Separador API CPI Hidrociclones Skim vessel Celdas de flotación Filtro cáscara de nuez Sistema de tratamiento

Water treatment

Diseño final Skim Vessel Horizontal

Dimensiones

Extractor de niebla → Salida de gas

Entrada 5000 Aceite Agua Aceite 0.5 Salida de aceite 4999.5 Salida de agua

Fuente: ARNOLD, Ken y STEWART Maurice. Emulsions and Oil Treating Equipment.

Diametros comerciales

Diametro comercial: 84 in
 Longitud entre costuras [Lsa]: 13 228 ft

Concentración de a la salida

Caudal de entrada: 5000 Bls
 Concentración de aceite: 94.5 ppm
 Caudal de salida: 4999.5 Bls
 Aceite removido: 0.5 Bls

$$Co_{out} [ppm] = \frac{Oil_{out} * 23810}{Liquid_{out}}$$

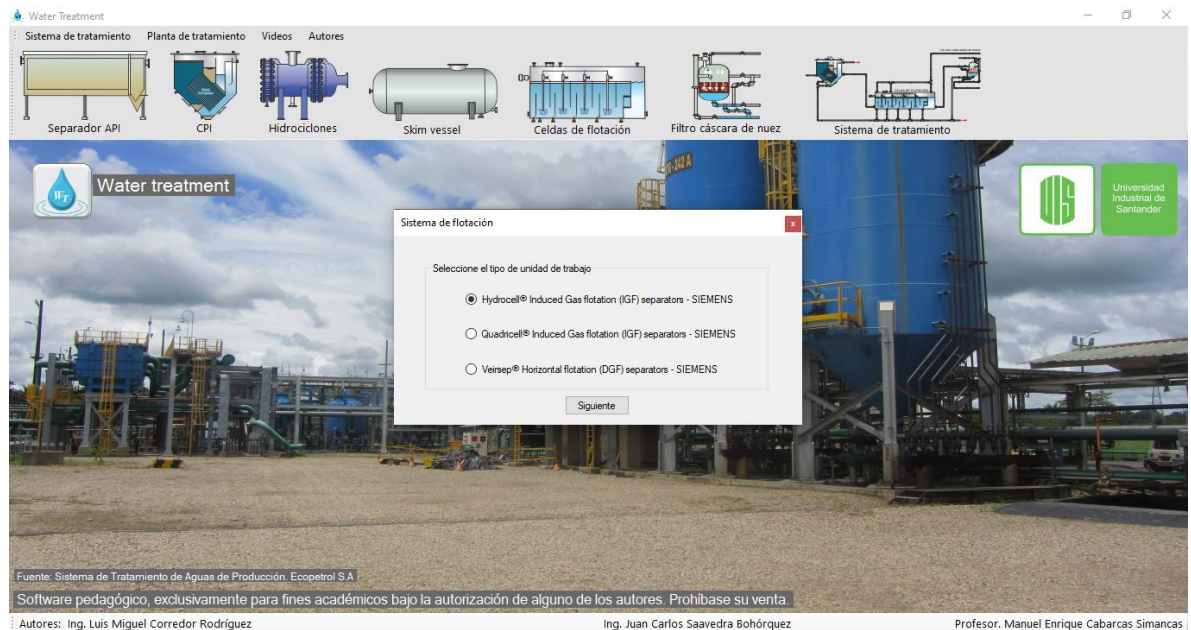
Oil_{out} : Aceite en salida de agua [Gal]
 $Liquid_{out}$: Salida de agua [Bls]

Botones: Regresar, Cerrar

Fuente: Sistema de Tratamiento de Agua...
 Software pedagógico, exclusivamente para fines académicos bajo la autorización de alguno de los autores. Prohibase su venta.
 Autores: Ing. Luis Miguel Corredor Rodríguez Ing. Juan Carlos Saavedra Bohórquez Profesor. Manuel Enrique Cabarcas Simancas

Diseño celdas de flotación

Para el diseño de las celdas de flotación el software cuenta con tres tipos de equipos desarrollados por compañías especializadas. Uno para flotación por gas inducido mecánicamente (Quadricell), otro por gas inducido hidráulicamente (Hydrocell) y otro con gas disuelto (veirsep). El diseño se hará según la elección del usuario:

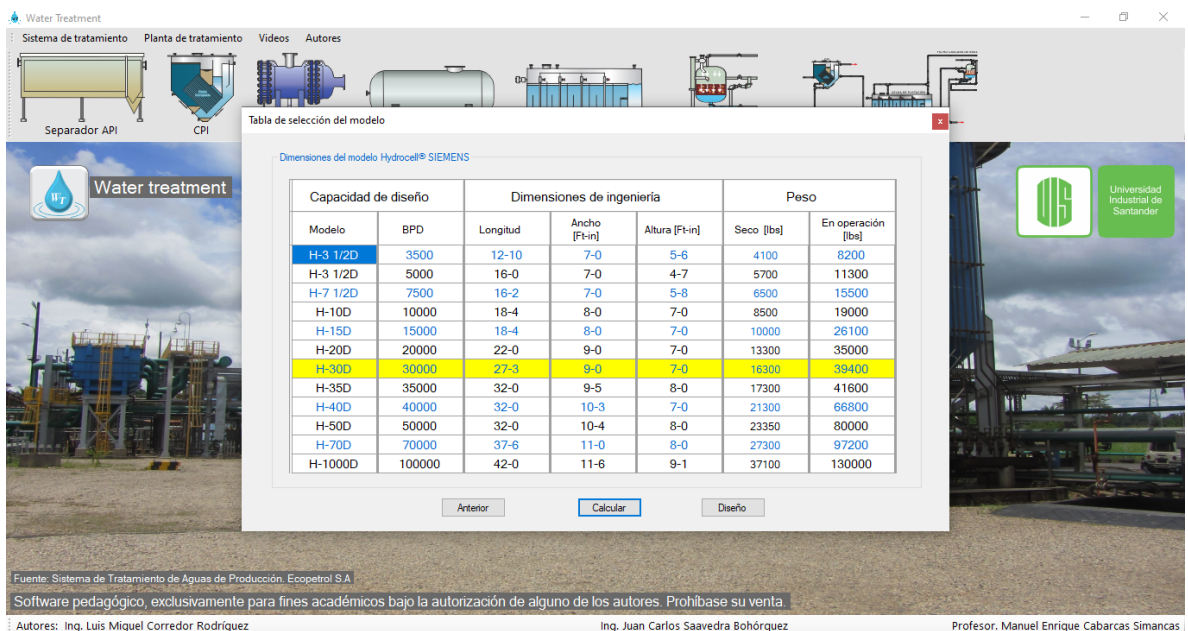


Diseño Hydrocell

Para este equipo los datos de entrada que se deben ingresar son además de las características del fluido, la relación de gas/agua utilizada, de esta manera el usuario podrá calcular el gas utilizado para el proceso.



Una vez realizado este paso el usuario podrá escoger en la siguiente ventana, las dimensiones más adecuadas acordes a la cantidad de flujo a tratar.



Una vez terminado calculadas las dimensiones presentes en la tabla, el usuario podrá observar las dimensiones y demás características en la siguiente ventana emergente.

Water Treatment

Sistema de tratamiento Planta de tratamiento Videos Autores

Separador API CPI

Water treatment

Esquema de diseño 3D Esquema de diseño 2D Sección transversal

Partes de la unidad

1. Entrada
2. Entrada de gas de purga
3. Desnatador primario
4. Eductor de gas de retorno
5. Salida de gas
6. Salida de agua del proceso
7. Boma de suministro al eductor
8. Salida de productos aceitosos
9. Cabezal de suministro de agua
10. Conjunto boquillas del eductor
11. Cabezal de suministro de gas
12. Control de nivel de líquido

Características de la unidad

Modelo	H-30D
Caudal de entrada	25000 BWPD
Capacidad máxima	30000 BWPD
Peso en seco	16300 Lbs
Peso en operación	39400 Lbs

Longitud: 27.3 Ft - in

Altura: 7.0 Ft - in

Ancho: 9.0 Ft - in

Fuente: Schlumberger. Wemco ISF. Hydraulic induced gas flotation system. 2016

Anterior Siguiente

Fuente: Sistema de Tratamiento de Aguas

Software pedagógico, exclusivamente para fines académicos bajo la autorización de alguno de los autores. Prohibase su venta.

Autores: Ing. Luis Miguel Corredor Rodríguez Ing. Juan Carlos Saavedra Bohórquez Profesor. Manuel Enrique Cabarcas Simancas

Diseño Quadricell

Para el diseño de esta unidad será necesario agregar de manera similar los datos de entrada que para el diseño Hydrocell.

Posteriormente deberá escoger las dimensiones adecuadas de la unidad según la tabla presente en la siguiente ventana emergente.

Water Treatment

Sistema de tratamiento Planta de tratamiento Videos Autores

Separador API CPI Hidrociclones Skim vessel Celdas de flotación Filtro cáscara de nuez Sistema de tratamiento

Water treatment

Celda de flotación

Diseño de Celda de flotación

Acerca del modelo

Sistema de flotación: Quadricell® Induced Gas flotation - SIEMENS

Condiciones de operación

Caudal de agua	25000	BWPD
Número de celdas	4	
Relación gas/agua	3	f3/B1

Acete a la entrada de la unidad

Dímetro de la gota	10	µm
Concentración de acete	100	ppm

Cerrar Siguiente

Celdas de flotación

Fuente: <https://bit.ly/3a1wgf1>

Fuente: Sistema de Tratamiento de Aguas

Software pedagógico, exclusivamente para fines académicos bajo la autorización de alguno de los autores. Prohibase su venta.

Autores: Ing. Luis Miguel Corredor Rodríguez Ing. Juan Carlos Saavedra Bohórquez Profesor. Manuel Enrique Cabarcas Simancas

Water Treatment

Sistema de tratamiento Planta de tratamiento Videos Autores

Separador API CPI Hidrociclones Skim vessel Celdas de flotación Filtro cáscara de nuez Sistema de tratamiento

Water treatment

Flotation5

Dimensiones del modelo Quadricel® SIEMENS

Capacidad de diseño		Dimensiones de ingeniería			Peso	
Modelo	BPD	Longitud	Ancho [ft-in]	Altura [ft-in]	Seco [lbs]	En operación [lbs]
Q-4	1400	13-0	3-5	4-6	2300	4300
Q-10	3440	15-8	4-9	5-2	6300	10000
Q-21	7200	18-6	5-4	6-1	9000	17000
Q-32	11000	21-3	6-0	6-3	12000	23800
Q-50	17000	26-0	6-11	6-8	15000	35000
Q-75	25700	30-0	8-0	6-8	20000	50000
Q-110	38000	31-0	8-1	8-7	24500	67000
Q-160	55000	35-6	9-3	8-5	28100	86300
Q-230	79000	40-0	10-0	9-10	41000	128000
Q-340	118500	47-6	11-8	10-1	57000	187000
Q-500	171500	55-0	13-6	10-4	69000	255200

Anterior Calcular Diseño

Fuente: Sistema de Tratamiento de Aguas de Producción. Ecopetrol S.A

Software pedagógico, exclusivamente para fines académicos bajo la autorización de alguno de los autores. Prohibase su venta.

Autores: Ing. Luis Miguel Corredor Rodríguez Ing. Juan Carlos Saavedra Bohórquez Profesor. Manuel Enrique Cabarcas Simancas

De la misma manera las dimensiones calculadas y demás propiedades del equipo podrán ser observadas en la siguiente ventana emergente.

Water Treatment

Sistema de tratamiento Planta de tratamiento Videos Autores

Separador API CPI Hidrociclones Skim vessel Celdas de flotación Filtro cáscara de nuez Sistema de tratamiento

Water treatment

Dimensionamiento: Quadricel® SIEMENS

Esquema de diseño 3D Esquema de diseño 2D Sección transversal

Partes de la unidad

1. Caja de alimentación
2. Celda de flotación
3. Blanqueo
4. Paleta desnatadora
5. Salida de agua
6. Salida de productos acetosos

Características de la unidad

Modelo: Q-75

Caudal de entrada: 25000 BWPD

Capacidad máxima: 25700 BWPD

Peso en seco: 20000 Lbs

Peso en operación: 50000 Lbs

Longitud: 30-0 ft-in

Altura: 6-8 ft-in

Ancho: 8-0 ft-in

Fuente: ARNOLD, Ken y STEWART Maurice. Emulsions and Oil Treating Equipment.

Anterior Siguiente

Fuente: Sistema de Tratamiento de Aguas de Producción. Ecopetrol S.A

Software pedagógico, exclusivamente para fines académicos bajo la autorización de alguno de los autores. Prohibase su venta.

Autores: Ing. Luis Miguel Corredor Rodríguez Ing. Juan Carlos Saavedra Bohórquez Profesor. Manuel Enrique Cabarcas Simancas

Diseño Veirsep

Para el diseño de este equipo se deben ingresar los datos referentes al flujo de entrada a la unidad. El usuario podrá avanzar hasta la tabla donde se seleccionará las dimensiones ideales para la celda de flotación.

Diseño de Celda de flotación

Acerca del modelo
 Sistema de flotación: VEIRSEP™ Horizontal Flotation - SIEMENS
 Veirsep system Veirsep-P system

Condiciones de operación
 Caudal de agua: 25000 BWPD
 Presión: 14.7 Paig
 Número de celdas: 4
 Agua recirculada: 30 %
 Relación gas/agua: 0.5 ft³/ft³

Acete a la entrada de la unidad
 Diámetro de la gota: 10 µm
 Concentración de acete: 100 ppm

Fuente: <https://bit.ly/2TJFSFM>

Autores: Ing. Luis Miguel Corredor Rodríguez, Ing. Juan Carlos Saavedra Bohórquez, Profesor. Manuel Enrique Cabarcas Simancas

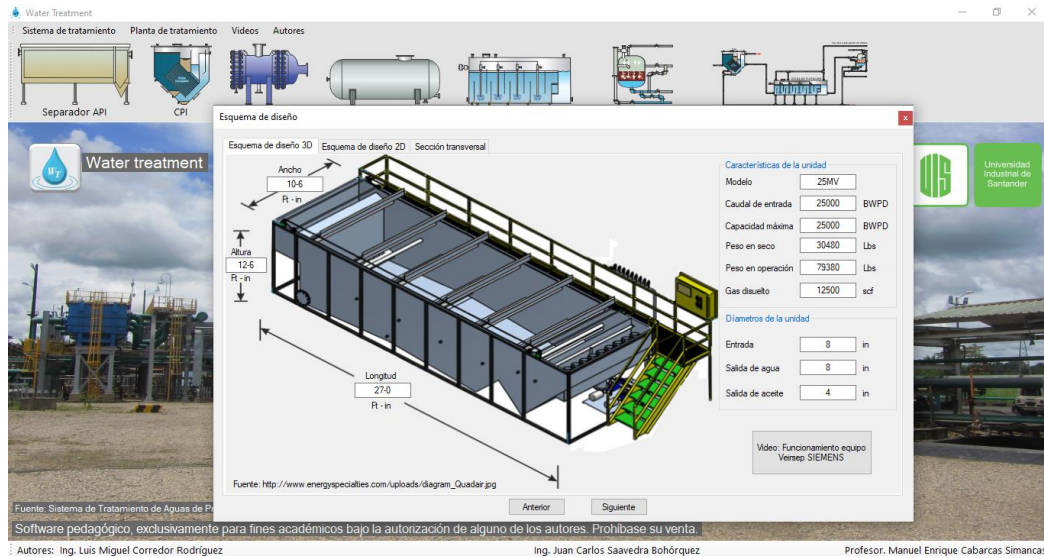
Dimensiones

Dimensiones del modelo Veirsep system SIEMENS

Modelo	Capacidad de diseño [BPD]	Dimensiones de ingeniería			Peso		Diametros [Agua]		Diametros [Acete]
		Longitud	Ancho [ft-in]	Altura [ft-in]	Seco [lbs]	En operación [lbs]	Entrada [in]	Salida [in]	Salida [in]
1MV	1000	14-0	5-0	5-6	9260	11380	4	4	2
3MV	3000	14-0	7-0	6-6	10340	20300	4	4	2
5MV	5000	16-0	7-6	7-6	11000	24625	6	6	3
7.5MV	7500	20-6	9-6	8-11	22325	38986	6	6	4
10MV	10000	23-1	10-0	9-6	22500	42350	8	8	4
15MV	15000	24-0	10-0	11-0	23600	65450	8	8	4
20MV	20000	26-0	10-6	12-0	25250	73150	8	8	4
25MV	25000	27-0	10-6	12-6	30480	79380	8	8	4
30MV	30000	33-0	10-6	13-0	34820	100340	10	10	6
40MV	40000	36-4	13-1	14-0	45515	140550	10	10	6
50MV	50000	38-0	14-0	14-6	47800	149400	10	10	6
75MV	75000	46-0	14-0	14-6	59500	165950	10	10	6

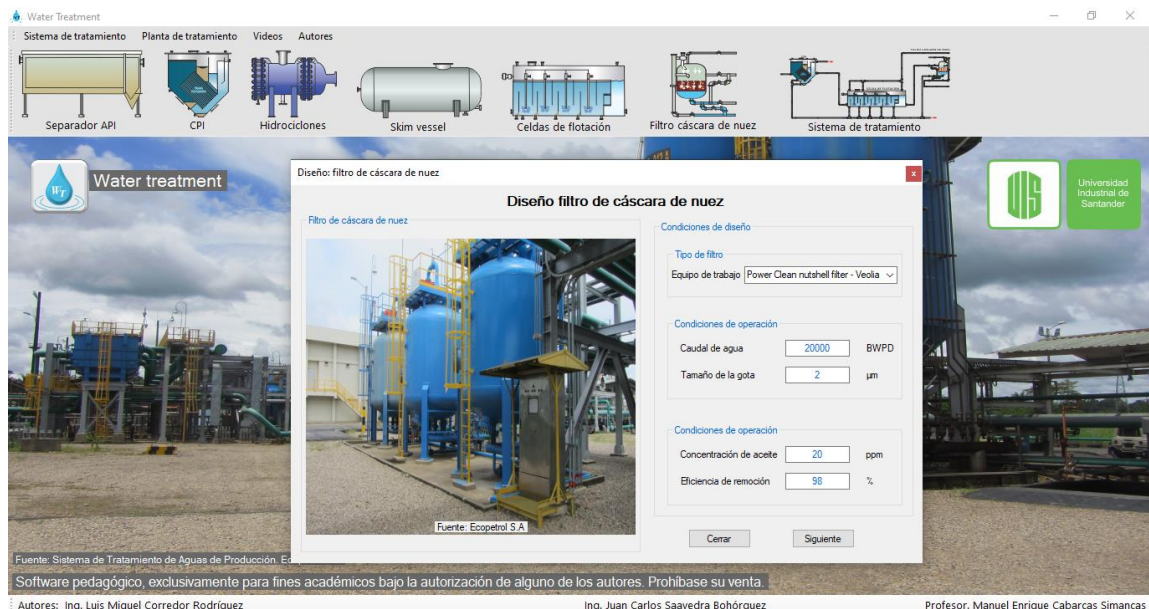
Autores: Ing. Luis Miguel Corredor Rodríguez, Ing. Juan Carlos Saavedra Bohórquez, Profesor. Manuel Enrique Cabarcas Simancas

El esquema del diseño aparecerá junto con las dimensiones del equipo, de igual manera que en los dos equipos anteriores.



Diseño del sistema de filtración

El usuario tendrá a disposición tres tipos de filtros desarrollados por diferentes compañías a nivel mundial: Power Clean, Auto-Shell filter y Wemco Silver Band. Deberá seleccionar uno e ingresar las propiedades del fluido a tratar.



Diseño del filtro Power Clean

El usuario podrá avanzar a siguiente ventana donde podrá ver las dimensiones del equipo y podrá comprender el principio de funcionamiento al dar click en el botón “etapas de filtrado”. Allí al seleccionar cada etapa aparecerá un cuadro de texto con la información respectiva de la etapa del ciclo de trabajo del filtro. Además, podrá visualizar los tiempos empleados en cada etapa al dar click en el botón “Ver tiempos”, lo cual mostrará una tabla con la información correspondiente.

The screenshot displays a software window titled "Ciclo de filtrado" (Filtering Cycle) for a Power Clean filter. It features five diagrams illustrating different stages of the cycle, each with a corresponding schematic of the filter tank and its components (Power head, Venteo, Suciedad Agua sin filtrar, Medio limpio, Limpieza Agua filtrada, Backwash, and Conjunto de medios). The stages are: Filtración, Fluidización, Descarga, Asentamiento, and Purga.

In the center, a table provides the following operational data:

Operación	Tiempo	Válvulas abiertas
Filtración	14 Horas*	A-E-F
Fluidización	15 Segundos	A-B
Descarga	10 Minutos	B-C
Asentamiento	60 Segundos	A
Purga	60 Segundos	A-D
Filtración 2do ciclo	14 Horas*	A-E-F

* Tiempo ajustable

At the bottom of the window, there are buttons for "Regresar", "Ver tiempos", and "Cerrar". The source is cited as "Fuente: VEOLIA Power Clean®MShell Filters, 2014." and the author as "Autores: Ing. Luis Mi...".

Diseño del filtro Auto-Shell

El usuario deberá ingresar los datos del fluido a tratar y podrá visualizar en la siguiente ventana las dimensiones del equipo. Además, podrá seleccionar al costado izquierdo el tipo de etapa de trabajo del filtro y obtendrá una breve descripción de la etapa del proceso.

Water Treatment

Sistema de tratamiento | Planta de tratamiento | Videos | Autores

Separador API

Dimensionamiento

Referencia del equipo | Esquema del equipo

Modelo No. 23500

Condiciones de operación

Máximo caudal de agua 23500 BWPD

Dímetro del recipiente 8 ft

Salida del equipo

$$C_{O_{out}} [ppm] = \frac{Oil_{out} * 23810}{Liquid_{out}}$$

Oil_{out} : Aceite en salida de agua [gal]

$Liquid_{out}$: Salida de agua [bls]

Aceite removido 0.4 BPD

Caudal de agua de salida 19999.6 BWPD

Concentración de aceite 0.4 ppm

Filtración

Ciclo de filtrado

Selección etapa de filtrado Filtración

Ciclo de filtrado

Durante el ciclo de filtración, el agua sucia del proceso pasa a través del filtro de arriba a abajo. A medida que el agua pasa a través de la cáscara de nuez, se eliminan el aceite libre y los sólidos en suspensión.

Tiempo de etapa: 24 horas

Fuente: SIEMENS. Auto-Shell Filter: Walnut Shell Filtration, 2014.

Regresar Cerrar

Software pedagógico, exclusivamente para fines académicos bajo la autorización de alguno de los autores. Prohíbese su venta.

Autores: Ing. Luis Miguel Corredor Rodríguez | Ing. Juan Carlos Saavedra Bohórquez | Profesor. Manuel Enrique Cabarcas Simancas

Diseño del filtro Wemco Silver Band

De igual manera que en los dos filtros anteriores, después de digitar los datos de entrada el usuario podrá observar las dimensiones del equipo y las características del fluido saliente.

Water Treatment

Sistema de tratamiento | Planta de tratamiento | Videos | Autores

Separador API

Dimensiones: Filtro Wemco

Dimensiones del equipo | Esquema del equipo

Filtro de cáscara de nuez

Modelo No.	Flujo de operación [Bd]	Dímetro	Longitud	Peso en seco [lbm]	Peso en operación [lbm]
SB18	820	1.5	8	2300	3200
SB49	2300	2.5	8	6500	9500
SB70	3300	3	8	7500	11500
SB126	5800	4	8	10500	18500
SB196	9100	5	8	14000	27000
SB283	13100	6	8	16000	35500
SB385	17800	7	8	19500	46000
SB502	23500	8	8	21500	57500
SB636	29500	9	8	23000	70000
SB785	36400	10	8	26000	86000
SB950	44000	11	8	28500	104000
SB1130	52400	12	8	33500	124000
SB1327	61400	13	8	33900	154900
SB1539	71250	14	8	42500	204000

Filtro de cáscara de nuez

Bomba de fluidización del medio filtrante

Medio filtrante

Soporte del medio filtrante

Salida del medio filtrante

Ventoso

Entrada de agua sucia

Descarga

Salida de agua limpia

Desnataje

Descarga de agua tratada

Fuente: Schlumberger. Wemco silver band separator, 2016.

Regresar Cerrar

Software pedagógico, exclusivamente para fines académicos bajo la autorización de alguno de los autores. Prohíbese su venta.

Autores: Ing. Luis Miguel Corredor Rodríguez | Ing. Juan Carlos Saavedra Bohórquez | Profesor. Manuel Enrique Cabarcas Simancas

Water Treatment

Sistema de tratamiento Planta de tratamiento Videos Autores

Dimensiones: Filtro Wemco

Separador API

Dimensiones del equipo Esquema del equipo

Dimensiones

Modelo No.	A [ft]	B [ft]	C [ft]	D [ft]
SB18	4	4	13 1/2	1
SB49	7	7	14 2/3	1
SB70	7	6	15	1 1/2
SB126	8 2/3	7	15 1/2	1 1/2
SB196	9	8	17 1/6	1 1/2
SB283	9 5/6	9 5/6	18 1/3	1 1/2
SB385	10	10	18 11/12	2
SB502	11 2/3	10	19 1/3	2
SB636	12	10	20 5/6	2
SB785	15	12	23 2/3	2
SB950	16	12	24	2 1/2
SB1130	18	12	24 5/6	2 5/6
SB1327	18	13	25 1/6	2 5/6
SB1539	18	14	26 1/2	2 5/6

Referencia del equipo

Modelo No. SB502

Condiciones de operación

Máximo caudal de agua 23300 BWPD

Díametro del recipiente 8 ft

Longitud del recipiente 8 ft

Peso unidad vacía 21500 lbm

Peso unidad en operación 57500 lbm

Salida del equipo

Concentración de aceite 0.4 ppm

Acete removido 0.4 BPD

Caudal de agua de salida 19999.6 BWPD

$$C_{o_{out}} [ppm] = \frac{Oil_{out} * 23810}{Liquid_{out}}$$

Oil_{out} : Acete en salida de agua [Gal]
 $Liquid_{out}$: Salida de agua [Bls]

Referencia del equipo

Fuente: Schlumberger, Wemco silver band separator, 2016

Software pedagógico, exclusivamente para fines académicos bajo la autorización de alguno de los autores. Prohibase su venta.

Autores: Ing. Luis Miguel Corredor Rodríguez Ing. Juan Carlos Saavedra Bohórquez Profesor. Manuel Enrique Cabarcas Simancas

Diseño del sistema completo de tratamiento de agua de producción

En este módulo se resumen todos los pasos descritos hasta acá. El usuario podrá escoger entre un ambiente onshore u offshore. Si la elección se hace para diseñar el sistema en ambiente costa afuera se desactivará la opción del sistema de filtros al igual que el separador API en el sistema primario.

