

**ESTADO DEL ARTE DE SISTEMAS DE TRATAMIENTO DE AGUAS DE
PRODUCCIÓN EN CAMPOS PETROLEROS**

MARTHA ROCÍO CASTRO CASTELL

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-QUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA DE PETRÓLEOS
BUCARAMANGA**

2004

**ESTADO DEL ARTE DE SISTEMAS DE TRATAMIENTO DE AGUAS DE
PRODUCCIÓN EN CAMPOS PETROLEROS**

MARTHA ROCÍO CASTRO CASTELL

**Trabajo de Grado presentado para optar al título de
Ingeniero de Petróleos**

**TUTOR DE LA EMPRESA
OSCAR FERNEY RINCÓN SILVA
COORDINADOR LLANOS APIAY**

**TUTOR DE LA UNIVERSIDAD
NICOLAS SANTOS SANTOS
DOCENTE UIS**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-QUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA DE PETRÓLEOS
BUCARAMANGA**

2004

A Dios;

A mi padre;

A mi mamá que ha sido siempre mi más grande apoyo;

A Ofe, Oscar, Mary, Gustavo, Andrea por su colaboración;

AGRADECIMIENTOS

La autora expresa sus sinceros agradecimientos a:

ECOPETROL S.A. – Superintendencia de Operaciones Apiay, por permitir la realización de este proyecto; a su gente por su calidez y amabilidad.

Jorge Parra Saldarriaga, Ingeniero de Petróleos, Superintendente Apiay y Samuel Medina, Ingeniero de Petróleos, Jefe de Departamento de Producción, por permitir el desarrollo de este proyecto.

Oscar Ferney Rincón Silva, Ingeniero de Petróleos, Coordinador del Área Apiay - Ariari, Director del Proyecto, por su tiempo, paciencia y colaboración.

Freddy Omar Niño, Ingeniero de Petróleos, Profesional en el área de Yacimientos y Jhonny Augusto Cadena, Ingeniero de Petróleos, Profesional de Ingeniería, por ser los gestores de este proyecto.

A los supervisores y técnicos de producción de las Estaciones de Recolección que siempre estuvieron dispuestos a colaborar.

Universidad Industrial de Santander, Escuela de Ingeniería de Petróleos, pues en ella aprendí las bases para realizar este proyecto.

Blanca Sofía de Sabogal, por su atención y hospitalidad durante mi estadía en Villavicencio.

A mis amigos por mantener contacto conmigo y recordarme lo importante de la amistad.

A todas aquellas personas que de una u otra manera se vieron involucradas en el desarrollo de este proyecto.

CONTENIDO

	pág.
LISTA DE FIGURAS	
LISTA DE TABLAS	
ABREVIATURAS	
INTRODUCCIÓN	18
OBJETIVOS	23
1. ¿POR QUÉ SE REQUIERE ESTE PROYECTO?	25
2. SISTEMAS DE TRATAMIENTO DE AGUAS DE PRODUCCIÓN	29
2.1. PISCINAS DE OXIDACIÓN Y AIREACIÓN	29
2.2. SISTEMAS DE ASPERSIÓN	29
2.3. TANQUES DESNATADORES	30
2.4. INTERCEPTOR DE PLATOS PARALELOS	31
2.5. INTERCEPTOR DE PLATOS CORRUGADOS	31

	pág.
2.6. SEPARADOR DE FLUJO TRANSVERSAL	32
2.7. FILTROS CONVENCIONALES	32
2.8. CELDAS DE FLOTACIÓN	33
2.9. FILTROS DE MEMBRANA	35
2.10. HIDROCICLONES	36
2.11. COALESCEDORES LIBRE DE FLUJO TURBULENTO (SP PACKS)	37
2.12. LIGHT WATER TREATMENT UNIT	37
3. TECNICA DE FLOTACIÓN	40
3.1. VISIÓN GLOBAL DEL SISTEMA DE FLOTACIÓN POR AIRE DISUELTO	40
3.2. AVANCES EN EL DISEÑO DEL SISTEMA DE FLOTACIÓN POR AIRE DISUELTO	42
3.2.1. Presurización del reciclo	42
3.2.2. Sistemas de saturación de aire	42
3.2.3. Químicos	43
4. NUEVAS TECNOLOGÍAS Y EQUIPOS DE FLOTACIÓN	44
4.1. FLOTACIÓN DE PARTÍCULAS ABSORBENTES	44

	pág.
4.2. FLOTACIÓN DE AGREGADOS COLOIDALES	46
4.3. CILINDRO AIREADO O CÁMARA DE BURBUJAS ("BUBBLE CHAMBER")	48
4.4. SEPARADOR CENTRÍFUGO	49
4.5. PROCESO CAF - CAVITATION AIR FLOTATION	49
4.6. FLOTACIÓN JET-JAMESON MODIFICADA	50
4.7. FLOTACIÓN COLUMNAR	51
4.8. CELDA FF: FLOCULACIÓN – FLOTACIÓN	53
4.9. CELDA MULTIBURBUJAS	54
5. HIDROCICLONES	55
5.1. FACTORES QUE AFECTAN SU DESEMPEÑO	55
5.2. TIPOS DE HIDROCICLONES	58
5.2.1. Hidrociclones dinámicos	59
5.2.2. Hidrociclones estáticos	59
5.3. SOLUCIÓN PARA USO DE HIDROCICLONES ESTÁTICOS	61
5.3.1. Técnica de pre-coalescencia	63
5.3.2. Técnica Hydroflok	66
5.3.3. Separadores de fondo del pozo	68
6. CONCLUSIONES	72

	pág.
7. RECOMENDACIONES	76
BIBLIOGRAFÍA	78
FIGURAS Y TABLAS	83

LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1. Fotografía de Sistema de aspersion de la Estación de Recolección de Apiay	84
Figura 2. Esquema de Tanque Desnatador Vertical	85
Figura 3. Esquema de Tanque Desnatador Horizontal	86
Figura 4. Esquema de Interceptor de Platos Paralelos en Separador API	86
Figura 5. Fotografía de Platos Corrugados	87
Figura 6. Fotografía de Filtro de Arena	87
Figura 7. Fotografía de Filtro de Cartucho	88
Figura 8. Esquema de Celda de Flotación por Gas Disuelto	88
Figura 9. Esquema de Celda de Flotación por Gas Disperso con Eductor Hidráulico	89
Figura 10. Esquema de Celda de Flotación por Gas Disperso con Rotor Mecánico	90
Figura 11. Fotografía de Light Water Treatment Unit, LWTU	90
Figura 12. Componentes de un sistema de flotación por aire disuelto, FAD	91

	pág.
Figura 13. Sistema de saturación de aire	92
Figura 14. Proceso de flotación de partículas adsorbentes - FPA	92
Figura 15. Cilindro aireado o cámara de burbujas (“bubble chamber”), BC	93
Figura 16. Celda de flotación centrífuga del LTM	94
Figura 17. Proceso CAF – Cavitation Air Flotation	95
Figura 18. Algunos tipos de difusores	96
Figura 19. (a) Celda de Flotación Jet Convencional, CFJC, y (b) Modificada, CFJM	97
Figura 20. Columna de flotación – LTM - UFRGS	98
Figura 21. Sistema FF: Floculación – Flotación	99
Figura 22. Celda “multiburbujas” o con mezcla de burbujas medianas y microburbujas	100
Figura 23. Hidrociclón Dinámico	101
Figura 24. Hidrociclón Estático	102
Figura 25. Partes del Hidrociclón Estático. a) Hidrociclón de 4 partes. b) Hidrociclón de 3 partes	103
Figura 26. Técnica de pre-coalescencia, PECT-F	104
Figura 27. Proceso Hydroflok	105
Figura 28. Diseños de Sistemas DOWS con un equipo BES	106
Figura 29. Celda Columna Propuesta	107

ABREVIATURAS

Barril	BL
Barriles de agua por día	BWPD
Barriles de fluido por día	BFPD
Barriles de petróleo por día	BOPD
Barriles por día	BPD
Bombeo Electrosumergible	BES
Bombeo Mecánico	BM
Cámara atmosférica de recuperación de petróleo	ORC
Cámara de Burbujas ("bubble chamber")	BC
Centipoise	cp
Celda de Floculación – Flotación	FF
Celdas de Flotación Jet Convencionales	CFJC
Celdas de Flotación Jet Modificadas	CFJM
Diámetro de gota de aceite	d_o
Diferencial de gravedad específica	$\Delta\gamma$
Estación de Bombeo Apiay	EBA
Estación de Recolección Apiay	ERA

Estación de Recolección Suria	ERS
Flotación de Agregados Coloidales	FAC
Flotación de Partículas Absorbentes	FPA
Flotación por Aire Disuelto	FAD
Flotación por Aire Inducido Hidráulicamente	FAIH
Flotación por Cavitación de Aire (Cavitation Air Flotation)	CAF
Flotación por Gas Inducido	IGF
Galones por minuto	gpm
Gravedad, 32 ft/s ²	g
Gravedad Específica	GE
Gravedad específica del agua	γ_w
Gravedad específica del aceite	γ_o
Hidrociclón de Miller-ASH ("Air sparger hydrocyclone")	ASH
Interceptor de Platos Corrugados	CPI
Interceptor de Platos Paralelos	PPI
Light Water Treatment Unit	LWTU
Material absorbente de petróleo re-utilizable	RPA
Metro cúbico por día	m ³ /dia
Metro cúbico por hora	m ³ /h
Metro cúbico por segundo	m ³ /s
Micras	μm
Milidarcy	md

Miligramo por Litro	mg/L
Milímetros	mm
Partes por millón	ppm
Presión de entrada	P_{in}
Presión de salida	P_{out}
Presión de salida del producto recuperado fluyente (reject)	P_{rej}
Pies	ft
Pies Cúbicos Estándar	scf
Pies por segundo cuadrado	ft/s^2
Pulgadas	in
Razón de caída de presión	PDR
Revoluciones por minuto	rpm
Separadores aceite-agua producida	DOWS
Separadores gas-aceite	DGWS
Sólidos Totales Disueltos	STD
Superintendencia de Operaciones de Apiay	SOA
Tasa de flujo de entrada	q
Temperatura	T
Total Oil Recovery and Remediation	TORR
Ultravioleta	UV
Velocidad de separación	v
Viscosidad del agua	μ_w

TITULO. ESTADO DEL ARTE DE SISTEMAS DE TRATAMIENTO DE AGUAS DE PRODUCCIÓN EN CAMPOS PETROLEROS*

AUTOR(A). Castro Castell, Martha Rocío **

PALABRAS CLAVES. Tratamiento de aguas de producción, técnica de flotación, hidrociclones líquido-líquido, análisis de aguas.

RESUMEN.

Se presenta una investigación detallada de algunos sistemas de tratamiento de aguas de producción que en el mundo registran los mejores resultados, con el fin de optimizar los sistemas actuales y determinar la mejor alternativa para nuevos sistemas de tratamiento en las estaciones de recolección de Castilla, Apiay y Suria de la Superintendencia de Operaciones Apiay, que garanticen que las condiciones de calidad de la corriente de agua a vertimiento estén dentro de los estándares exigidos, aumenten la confiabilidad y seguridad operativa en el proceso, disminuyan el impacto al medio ambiente y los costos de operación e inyección de químico.

Se realizó un estudio bibliográfico exhaustivo sobre las nuevas tecnologías que garantizan la mayor remoción de sólidos y aceite en agua, haciendo énfasis en las técnicas de flotación y los hidrociclones líquido-líquido, que fueron los sistemas que más se ajustaron a las necesidades de la Superintendencia . Se revisaron las tecnologías de países como Canadá y Brasil.

Este proyecto servirá para definir en la Ingeniería Básica y Detalle de la nueva estación de recolección Castilla 3, el sistema de tratamiento de aguas más adecuado; a la vez presenta un abanico de nuevas alternativas para elegir el sistema de tratamiento de aguas en un proyecto de adecuación o creación de cualquier estación de recolección.

*Trabajo de Grado

**Facultad de Ingeniería Físico-Químicas, Escuela de Ingeniería de
Petróleos

Director de Escuela: Ph. D. Zully Imelda Calderón

TITTLE. STATE OF ART OF PRODUCED WATER TREATMENT SYSTEMS AT THE OILFIELD *

AUTHOR. Castro Castell, Martha Rocío **

KEYWORDS. Produced water treatment, Flotation technique, Hydrocyclone liquid-liquid, analyses of water.

ABSTRACT.

This work present a detailed investigation about some systems of produced water treatment around the world which record the best results, to optimize the real systems and determinate the best alternative to treat the produced water at the battery of Castilla, Apiay and Suria of the 'Superintendencia de Operaciones Apiay', which guaranties the quality conditions of the water stream to dispose are in the standard conditions established by law, increments the reliability and safety in the process, decreases the environment impact and the costs of operation and chemistry injection.

An exhaustive bibliographic study was realized about the latest technologies that guaranties the greater elimination of solids and oil of the produced water. This study does emphasis in the flotation techniques and hydrocyclone liquid-liquid, which were the systems that more adjusted to the needs of the superintendence. The technologies of countries as Canada and Brazil was reviewed.

This project will be used to define the most suitable system to treat the produced water in the development of the basic and detailed engineering of the new battery Castilla 3; Moreover this project shows a variety of new alternatives to choose the best treatment system of produced water in any project of improvement or creation of a battery.

*Project of degree

** Faculty of Engineering Phisical-Chemistry, School of Petroleum
Engineering

Manager of School: Zully Imelda Calderón

INTRODUCCIÓN

La Superintendencia de Operaciones Apiay de ECOPETROL S.A. maneja los siguientes campos:

- Campo Apiay de operación directa de ECOPETROL S.A.
- Campo Suria de operación directa de ECOPETROL S.A.
- Campo Reforma-Libertad de operación directa de ECOPETROL S.A.
- Campo Castilla de operación directa de ECOPETROL S.A.
- Campo Chichimene de operación directa de ECOPETROL S.A.
- Campo Valdivia-Almagro operado por Petrotesting S.A.
- Campo Rancho Hermoso operado por MOVE S.A.

A su vez presenta las siguientes estaciones de recolección:

- Estación de Recolección Apiay.
- Estación de Recolección Suria.
- Estación de Recolección Reforma-Libertad.
- Estación de Recolección Castilla 1.
- Estación de Recolección Castilla 2.
- Estación de Recolección Chichimene.
- Estación de Recolección Valdivia-Almagro.
- Estación de Recolección Rancho Hermoso

En este trabajo básicamente se presentarán las razones por las cuales se realiza el proyecto de “Estado del Arte de Sistemas de Tratamiento de Aguas de Producción en Campos Petroleros”.

Como se definió anteriormente, el objetivo de este proyecto es dar a conocer los nuevos equipos y sistemas de tratamiento de aguas de producción para elegir el que mejor satisfaga las necesidades de algunas de las estaciones de recolección de la Superintendencia de Operaciones Apiay en esta nueva etapa de desarrollo de sus campos.

Los sistemas y/o dispositivos que se usan normalmente para el tratamiento del agua producida son:

- Piscinas de oxidación y aireación.
- Sistemas de aspersión.
- Tanque desnatador.
- Interceptor de platos paralelos.
- Interceptor de platos corrugados.

- Separador de flujo transversal.
- Separadores de Lecho.
- Filtros Convencionales.
- Celdas de flotación Convencionales.

Adicional a ellos existen equipos un poco más recientes y sofisticados, tales como:

- SP Packs.
- Filtros de membrana.
- Celdas de Flotación con diseños especiales.
- Hidrociclones Líquido-Líquido.
- LWTU

Estos nuevos equipos se explicarán en el presente trabajo. Después de presentar las nuevas tecnologías para el tratamiento del agua de producción, en especial en

flotación e hidrociclones, se procede a hacer las recomendaciones para algunas de las estaciones de recolección de la SOA.

OBJETIVOS

- Mostrar las razones principales por las cuales se hace necesario mejorar y/o ampliar los actuales sistemas de tratamiento de aguas de producción en dichas estaciones.
- Presentar las generalidades y el funcionamiento de algunos de los sistemas de tratamiento de aguas de producción que han sido usados comúnmente en la industria petrolera mundial y su rendimiento bajo ciertas condiciones.
- Identificar las distintas técnicas de remoción del proceso de flotación.
- Presentar las nuevas tecnologías y avances en el campo de la Flotación para el tratamiento de aguas de producción.
- Diferenciar los distintos sistemas de generación de burbujas para la flotación e identificar sus ventajas y desventajas.

- Identificar los tipos de hidrociclones y conocer el principio de operación de cada uno de ellos.
- Diferenciar las distintas secciones del hidrociclón y su función en el proceso de separación agua – aceite.
- Presentar nuevas técnicas para mejorar la eficiencia de remoción de aceite de un hidrociclón, ya instalado.
- Exponer las recomendaciones para los sistemas de tratamiento de aguas de producción en algunas estaciones de recolección de la SOA.

1. ¿POR QUÉ SE REQUIERE ESTE PROYECTO?

En los últimos años se ha incrementado el interés de las industrias petroleras en mejorar sus sistemas de tratamiento de aguas de producción, para lograr las especificaciones legales de vertimiento y para alcanzar la certificación ISO 14000. Estos sistemas deben ser económicamente viables, simples y eficientes considerando que su costo debe ser imputado al costo de producción.

El método convencional para la remoción de iones, contaminantes y sólidos presentes en el agua es la precipitación - sedimentación, seguido de espesamiento y/o filtración del lodo formado. Sin embargo, este método presenta limitaciones, tales como baja eficiencia de remoción en efluentes diluidos, baja cinética de sedimentación, precipitación incompleta, grandes volúmenes de lodo conteniendo altos porcentajes de agua y difíciles de filtrar debido al pequeño tamaño de las partículas (Rubio y Tessele, 1997).

Otros métodos que pueden ser aplicados al tratamiento de efluentes conteniendo iones y sólidos disueltos son micro/nano/ultrafiltración, osmosis inversa, intercambio ionico, hidrociclones, flotación y procesos basados en fenómenos de biosorción (absorción y/o adsorción). Entre estos métodos, los basados en la

utilización de membranas y resinas presentan la desventaja de tener un alto costo de operación, transformando su aplicación inviable económicamente (Rubio,1998). La flotación y los procesos basados en fenómenos de biosorción, presentan potencial aplicación en el tratamiento de efluentes con contaminantes inorgánicos y/o orgánicos, al igual que los hidrociclones en especial cuando se tiene poco espacio y se quiere disminuir los costos de operación y mantenimiento.

Las anteriores son las razones generales de la industria para mejorar los sistemas de tratamiento de aguas de producción, a continuación veremos las razones específicas de la Superintendencia de Operaciones Apiay.

El sistema de tratamiento de aguas de producción de la Superintendencia de Operaciones Apiay, necesita ser analizado, mejorado y ampliado por el inminente incremento de los volúmenes de producción de agua debido a las siguientes razones:

1. La campaña de perforación de pozos que ha iniciado la Superintendencia desde 1999, que ha generado la entrada a producción de nuevos pozos.
2. El aumento de la frecuencia de algunos equipos de Bombeo Electro-Sumergibles (BES) instalados en algunos pozos.

3. El rediseño a equipos de mayores volúmenes, como cambio de Bombeo Mecánico (BM) a BES.
4. El incremento en el corte de agua de los pozos ya existentes.

Actualmente el campo Castilla cuenta con 35 pozos perforados, de los cuales 33 son productores. Este campo produce petróleo pesado con una gravedad de 13,5 ° API, con un promedio de producción de 33000 BOPD a agosto de 2004 de la Unidad K1 y K2.

De los 35 pozos, 11 fueron perforados por ECOPETROL (Castilla 25H, Castilla 26, Castilla 27, Castilla 28, Castilla 29, Castilla 30, Castilla 31, Castilla Norte-1, Castilla Norte-2, Castilla Norte-3, Castilla Norte-4 y Castilla Este-1) en los bloques denominados Castilla Este y Castilla Norte. A pesar de estas denominaciones, estos tres pozos pertenecen a la misma estructura del Campo Castilla.

Actualmente, en el área Apiay-Ariari se han perforado en total 69 pozos, de éstos en el campo Apiay se han perforado 27 pozos de los cuales 3 se encuentran inactivos a la espera de reactivación (Apiay 1, Apiay 2 y Apiay 6), 1 está abandonado (Guatiquía 1) y 1 se encuentra en proceso de perforación (Apiay 21), el resto se encuentran produciendo; en el campo Suria se han perforado 33 pozos de los cuales 3 están inactivos (Guayuriba 1, Austral 1 y Tanané 2), 1 está abandonado (Dino 1) y el resto son productores; en el campo Reforma - Libertad

se han perforado 12 pozos de los cuales 3 se encuentran inactivos (Libertad 2, Reforma 1 y Togo 1), 1 está abandonado (Villavicencio 1) y el resto son productores. Se está produciendo principalmente de las unidades cretáceas K-2 y K-1 y también se han probado las unidades terciarias T-2 y T-1.

2. SISTEMAS DE TRATAMIENTO DE AGUAS DE PRODUCCIÓN

Algunos de los sistemas que se utilizan comúnmente en la industria para hacer tratamiento a las aguas producidas antes de su disposición final se presentan a continuación:

2.1 PISCINAS DE OXIDACIÓN Y AIREACIÓN

Piscinas donde se les da un tiempo de residencia al agua para que se separen las gotitas de aceite de ella y para que se ponga en contacto con el aire. Debe tener la mayor área posible para enfriamiento del agua. En ella se produce la biodegradación de compuestos orgánicos disueltos y la sedimentación de sólidos. No es muy eficiente debido a que se necesitan grandes extensiones para la piscina y además el estado del clima influye en su desempeño.

2.2 SISTEMAS DE ASPERSIÓN

Se utilizan básicamente para poner la mayor cantidad de agua posible en contacto directo con el aire para lograr así una oxidación de fenoles y un intercambio de temperatura con este, para enfriar el agua que sale a grandes temperaturas.

Estas piscinas funcionan usando unas bombas que succionan el agua que llega a la piscina de aireación, expulsándola a través de unas boquillas de aspersión, donde se le disminuye la temperatura al agua por la expansión que sufre al intercambio con el aire (Ver **Figura 1**).

2.3 TANQUES DESNATADORES

Requieren de alto tiempo de residencia para que ocurra la separación gravitacional. Pueden ser verticales u horizontales. En los verticales, el flujo entra y pasa a un tubo que lo dirige hacia abajo a través de la capa de aceite permitiendo que se liberen pequeñas cantidades de gas, de ahí va a un sistema propagador y el agua sigue fluyendo hacia abajo, en contra corriente las gotitas de aceite que coalescen ascienden hasta los colectores de superficie que se encargan de recogerlos; El espesor de la capa de aceite depende de la altura relativa del vertedero de aceite y de la pierna de agua y sobre todo de la diferencia en gravedad específica de los dos líquidos (Ver **Figura 2**). En los horizontales, el flujo entra a través de un tubo de descenso (downcomer) para separar el gas, las gotitas de aceite suben perpendicularmente al flujo de agua que es horizontal a lo largo del recipiente, se instalan baffles para que las gotas de aceite coalescan y asciendan a la superficie donde son desnatadas sobre el vertedero de aceite. Estos tanques son un poco más eficientes que los verticales (Ver **Figura 3**).

2.4 INTERCEPTOR DE PLATOS PARALELOS, PPI

Consiste en un grupo de platos lisos espaciados paralelamente entre si y a la longitud axial de un separador API y que se ubican inclinados en la piscina con el fin de que las gotas de aceite suban por la superficie del plato y coalescan. Si el flujo es perpendicular al eje, los platos forman una “V” de manera que la película de aceite migra a la parte superior del plato coalescente y por los lados (Ver **Figura 4**). Los sedimentos van al centro y se depositan en el fondo del separador y de allí son removidos más tarde.

2.5 INTERCEPTOR DE PLATOS CORRUGADOS, CPI

Es similar a los PPI, pero la superficie de los platos es corrugada como un tejado (Ver **Figura 5**), con el eje de las ondulaciones paralelo a la dirección de flujo. Se encuentran inclinados 45°. El agua es forzada a la sección del fondo y el aceite se acumula en el tope de cada corrugación. Cuando el aceite alcanza el último paquete de platos se recoge en un canal y se lleva a la interfase agua-aceite. Maneja un poco mejor los sedimentos. Se taponan cuando hay gran cantidad de sólidos.

2.6 SEPARADOR DE FLUJO TRANSVERSAL

Consiste en un mecanismo de platos corrugados donde el flujo de agua es horizontal y perpendicular al eje de las ondulaciones del plato, lo que permite su instalación en ángulos mayores a 45°, facilitando la remoción de sedimento y el empaquetamiento de platos a la presión del recipiente. Se puede instalar en recipientes horizontales o verticales. Se recomienda su uso cuando se requiere recipientes a presión y mucho sedimento. Requieren propagadores y colectores para distribuir uniformemente el flujo de agua en los platos. Se aplican para la separación de gotas de diámetro mayor a 30 μm .

2.7 FILTROS CONVENCIONALES

Consisten de un recipiente o tanque en el que se coloca un medio coalescente que captura los sólidos y/o las gotas de aceite y las hace coalescer. Pueden ser de: a) Lecho suelto como arena (Ver **Figura 6**), antracita, gránate o cáscara de nuez o de lecho fijo, tales como esponjas, fibras y están disponibles en flujo ascendente, descendente o ambos, remueven partículas de 2 a 10 μm , son retrolavables y costosos; b) Cartucho ya sea plegado o enrollado, son desechables y tienen baja capacidad de acumulación de sólidos y recubiertos donde la torta filtrante gastada se seca y se descarga (Ver **Figura 7**).

2.8 CELDAS DE FLOTACIÓN

Su principio de funcionamiento es una disminución aparente de la gravedad específica del aceite debido a la adherencia de burbujas de gas a las gotas de aceite, que permiten una velocidad de ascenso mayor y más rápida separación. Requieren de la inyección de químicos como los polielectrolitos que aumentan su eficiencia, también la temperatura y la salinidad son factores importantes, por encima de los 200 °F y 3 a 4 % de NaCl, pierde eficiencia. Según la procedencia del gas o el aire se dividen en celdas de flotación por gas/aire disuelto y celdas de flotación por gas/aire inducido o disperso.

Los diseños de gas/aire disuelto toman una porción del agua tratada y la saturan con gas natural o aire en una contactora. A mayor presión más cantidad de gas puede ser disuelto en el agua. La mayoría de las unidades están diseñadas para una presión de contacto de 20 a 40 psig. Normalmente del 20% al 50% del agua tratada es recirculada para que se contacte con el gas o el aire. El agua saturada, es luego inyectada en el tanque de flotación, allí el gas disuelto o el aire rompe la solución y se libera en forma de burbujas de pequeño diámetro que contactan las gotas de aceite en el agua y las llevan a la superficie en una espuma (Ver **Figura 8**).

En los diseños de gas/aire inducido, las burbujas son dispersadas en la corriente total por un aparato inductor o por un vórtice creado por un rotor mecánico. En las

celdas de flotación con eductor hidráulico (Ver **Figura 9**), el agua limpia es bombeada a un cabezal de re-circulación que alimenta una serie de eductores venturi, el agua que fluye por estos eductores, succiona gas del espacio de vapor o aire que es inyectado al sistema, el cual es liberado en las boquillas como un jet de pequeñas burbujas; estas burbujas suben y arrastran consigo a las pequeñas gotas de aceite formando una espuma en superficie que posteriormente es desnatada. Estas unidades pueden tener de una a cuatro cámaras y usan menos potencia y menos gas/aire que las unidades de rotor mecánico.

En las celdas de flotación con rotor mecánico (Ver **Figura 10**), este crea un vórtice y un vacío dentro del tubo de vórtice. Los anillos de refuerzo (shrouds) aseguran que el gas en el vórtice se mezcle y se introduzca en el agua. El rotor y el eje inductor causan que el agua fluya mientras crea un movimiento de remolino (swirling). Un baffle en la cima dirige la espuma a una bandeja desnatadora como resultado del movimiento de remolino (swirling). Estas unidades pueden tener tres o cuatro cámaras.

Otros sistemas que son más recientes y menos utilizados actualmente en el tratamiento de aguas de producción, pero que brindan un buen desempeño son:

2.9 FILTROS DE MEMBRANA

Hay varios métodos para permitir que las sustancias atraviesen una membrana. Ejemplos de estos métodos son la aplicación de alta presión, el mantenimiento de un gradiente de concentración en ambos lados de la membrana y la introducción de un potencial eléctrico.

Hay dos factores que determinan la efectividad de un proceso de filtración de membrana: selectividad y productividad.

La filtración de membrana se puede dividir en micro-filtración y ultra-filtración por una parte y en nano-filtración y ósmosis inversa por la otra.

Cuando la filtración de membrana se utiliza para retirar partículas más grandes, se aplican la micro-filtración y la ultra-filtración. Debido al carácter abierto de las membranas su productividad es alta mientras que las diferencias de presión son bajas. Cuando se necesita desalinizar el agua, se aplican la nano-filtración y la ósmosis inversa. La nano-filtración y las membranas de ósmosis inversa no actúan según el principio de porosidad, la separación ocurre por difusión a través de la membrana. La presión requerida para realizar la nano-filtración y la ósmosis inversa es mucho más alta que la requerida para la micro y ultra filtración, mientras que la productividad es mucho más baja.

Es un proceso de bajo costo energético. La mayor parte de la energía requerida es la necesaria para bombear los líquidos a través de la membrana. La cantidad total de energía utilizada es mínima comparada con las técnicas alternativas, tales como evaporación. El proceso puede ser fácilmente ampliado.

2.10 HIDROCICLONES

Estos dispositivos usan la fuerza centrífuga para remover las gotas de aceite del agua aceitosa. Su principio de separación se basa en la alta diferencia de densidades entre el aceite y el agua. Estos dispositivos pueden ser estáticos o dinámicos. Básicamente son usados en operaciones costa afuera ya que pueden remover gotas de aceite hasta de 2 μm pero tienen un alto costo. Ahorran espacio y pesan menos que los separadores convencionales.

El desempeño de estos dispositivos depende de la relación que exista entre la tasa de fluido en la salida corriente arriba a la tasa total de fluido de entrada, normalmente es óptima entre 1 a 3%. Esta relación es proporcional a la razón de caída de presión, PDR. El desempeño también se ve afectado por el tamaño de la gota de aceite a la entrada, la concentración de aceite a la entrada, el diferencial de gravedades específicas y la temperatura de entrada (a temperaturas mayores de 80 °F mejor operación). Para objeto de diseño, la suposición de una eficiencia de 90% es válida.

2.11 COALESCEDORES LIBRE DE FLUJO TURBULENTO (SP PACKS)

Esta tecnología fue creada por Paragon Engineering Services y registrada por Modular Production Equipment, Houston. Se ubica normalmente dentro de cualquier recipiente o tanque que actúa por asentamiento por gravedad para mejorar su eficiencia en la remoción de petróleo. Consiste en crear un flujo turbulento de magnitud apropiada para provocar la coalescencia, forzando al agua a fluir a través de un tubo serpentín de diámetro similar a la tubería de entrada para evitar el taponamiento.

2.12 LIGHT WATER TREATMENT UNIT, LWTU

Es una unidad de tratamiento de agua móvil (Ver **Figura 11**), que usa técnicas de coalescencia y separación para reducir el contenido de aceite del agua proveniente de los separadores desde un porcentaje pequeño hasta décimas de ppm, normalmente del 2% (20000 ppm) a 10 ppm.

La unidad consta de un recipiente grande horizontal, que contiene 8 paquetes coalescentes que están bien distribuidos a lo largo de la longitud del mismo.

El compartimiento de salida de la unidad opera a una presión cercana a la atmosférica, y la presión de entrada está limitada a la contrapresión del mismo proceso, es decir típicamente 20 a 35 psi.

A medida que el agua fluye a baja velocidad a través de los paquetes, el medio coalescente mojado en aceite, temporalmente retiene las gotas de petróleo dispersas. Ellas coalescen en gotas mucho más grandes, que son finalmente liberadas por el paquete coalescedor cuando este está completamente saturado con petróleo. El petróleo liberado es interceptado entre dos paquetes, mientras las gotas más pequeñas proceden al próximo paquete y así continúa el proceso repetitivamente según el número de paquetes coalescedores.

La corriente rica en aceite sale a una cámara atmosférica de recuperación de petróleo (ORC), protegida por un preventor de detonación. Una bomba accionada por aire, envía el petróleo recuperado al separador de prueba de pozos.

El proceso de LWTU está basado en recobro total de petróleo y la remediación, TORR (Total Oil Recovery and Remediation), una tecnología de la compañía EARTH de Canada. El material coalescente primario del que están hechos los paquetes es el RPA (Reusable Petroleum Absorbent) patentado por la compañía antes mencionada. El RPA se puede regenerar a través de centrifugación, con lo cual se generan poco desechos.

Un filtro de sólidos es ubicado a la entrada del LWTU para interceptar los sólidos dispersos en el agua de alimento y evitar el taponamiento del medio coalescente.

3. TÉCNICA DE FLOTACIÓN

El proceso de flotación tuvo sus inicios en el procesamiento de minerales y se usó por largo tiempo en separaciones sólido-sólido aplicando espumas estables para la recuperación de las partículas de mineral (Kitchener, 1982).

Este proceso se basa principalmente, en el mecanismo de adhesión de las partículas o sustancias contaminantes hidrofóbicas a burbujas de aire de tamaños del orden de 15 a 2000 μm de diámetro, dependiendo del tipo y tamaño del contaminante.

Muchos factores afectan el proceso de flotación, los más importantes son: el hold-up de aire, el exceso y la distribución de tamaño de las burbujas, el grado de agitación, el tiempo de residencia de las burbujas, el contenido de sólidos, el tamaño de la partícula (la gravedad), la forma de la partícula, el procesamiento del producto flotado, la hidratación de la superficie del sólido y los re-agentes de flotación. (Matis, 1995 y Rubio, 1998).

3.1 SISTEMA DE FLOTACIÓN POR AIRE DISUELTO, FAD

Las unidades FAD más usadas son de forma rectangular y usan presurización del reciclo para obtener el aire para la flotación.

Los componentes de un sistema FAD (Ver **Figura 12**) son:

- **Celda de contacto o cámara de coagulación.** Recibe la mezcla de la corriente a tratar y el aire disuelto; en ella, las burbujas de aire se adhieren al contaminante, además provee la distribución del flujo a lo ancho de la unidad.
- **Celda de flotación.** Suministra el área para la separación del aire y las sustancias floculadas. Algunas usan platos inclinados (separación sólidos - líquidos).
- **Desnatador de superficie.** Se coloca para remover la parte flotante de la superficie. El sistema más usado consiste de una serie de placas arrastradas por un sistema conducido por cadenas con velocidad variable.
- **Desnatador de fondo.** Se usa para remover los sólidos asentados en el fondo de la unidad.
- **Cámara y bafle de descarga.** En ellos, se da la separación física del agua clarificada de las partículas floculadas; presenta en el fondo un vertedero.
- **Sistema de saturación de aire.** Suministra la cantidad de aire en la forma apropiada (Ver **Figura 13**), usando idealmente un mínimo flujo de reciclo. Usa

bombas de presurización para forzar al aire a entrar en la corriente a tratar o en un reciclo de la corriente tratada. Luego esta solución es inyectada en la entrada de la corriente a tratar.

3.2 AVANCES EN EL DISEÑO DE LA FAD

Algunos de los avances que se han presentado en los últimos 20 años son:

3.2.1 Presurización del reciclo. La mayoría de fabricantes han pasado de la presurización del flujo completo a la presurización de un flujo de reciclo para inducir la flotación, esto debido a que en la primera clase de presurización la presión estaba limitada a valores menores de 50 psig puesto que el volumen a tratar era bastante grande, además el proceso perdía eficiencia debido a la destrucción del flóculo a causa de la turbulencia y a las altas fuerzas de corte que se generaban en la corriente completa.

3.2.2 Sistemas de saturación de aire. Las bombas usadas en este proceso son capaces de manejar agua con aire dentro y operan a presiones más altas que las bombas centrífugas estándar, aumentando la saturación de aire y la eficiencia volumétrica. Estas bombas incluyen turbinas regenerativas y bombas centrífugas especiales multifase. El desarrollo de estas bombas que manejan un fluido con aire en su interior (del 10% al 20% en volumen de aire) permitió introducir la

misma cantidad de aire disuelto con menor flujo (del 50% al 70% comparado con las celdas presurización de flujo completo).

3.2.3 Químicos. Se aplican para mejorar la desestabilización de emulsiones y sólidos suspendidos, la precipitación de proteínas, etc. Los avances en este campo se han hecho en una gran variedad de polímeros (para la floculación) de diferentes pesos y cargas eléctricas para tratar contaminantes específicos, tanto que disminuyen o eliminan el uso de coagulantes. Algunas de las ventajas del uso de estos son: formación de floculos más fuertes, flotante de menor volumen y menos mezcla. Esta adición secuencial de químicos ha llevado a su vez, al uso de tubos de floculación (en vez de tanques floculantes), ya que en ellos los tiempos de retención son más cortos.

4. NUEVAS TECNOLOGÍAS Y EQUIPOS DE FLOTACIÓN

4.1 FLOTACIÓN DE PARTÍCULAS ABSORBENTES, FPA

La base de este proceso es la selección de un material adsorbente adecuado, o sea, con elevada área superficial y alta reactividad con el elemento contaminante (alta capacidad de adsorción). El mecanismo responsable por el proceso de Flotación, FPA, está compuesto de 4 etapas en nivel macroscópico (Ver **Figura 14**) y 11 en nivel microscópico.

Las etapas macroscópicas son:

- Adsorción/absorción de los contaminantes en la superficie del sólido adsorbente.
- Floculación/Agregación de las partículas sólidas conteniendo los contaminantes.
- Colisión y adhesión de las burbujas a los agregados de partículas.

- Flotación.

Las etapas microscópicas, incluyendo los fenómenos de transporte de masa por difusión y los fenómenos interfaciales, pueden ser divididas en:

- Difusión del contaminante por la solución.
- Difusión a través de la película de líquido que envuelve la partícula adsorbente.
- Migración del contaminante hacia la superficie de la partícula adsorbente.
- Difusión a través de los poros.
- Adsorción en un sitio activo, intercambio iónico y/o absorción.
- Agregación y/o floculación de las partículas.
- Hidrofobización de los agregados.

- Interacción con burbujas.

- Flotación propiamente dicha

La **Tabla 1** muestra los estudios reportados con relación a esta técnica.

4.2 FLOTACIÓN DE AGREGADOS COLOIDALES, FAC

La base de este proceso es la formación de agregados a partir de la adsorción/coprecipitación de los iones contaminantes en coloides con alta área superficial, baja toxicidad y buenas características de flotación, especialmente con el empleo de microburbujas generadas in situ, como en el caso de la FAD. La cinética de levitación de las unidades burbujas - partículas puede ser incrementada con la adición de polímeros o hidrofobizantes (colectores).

Las etapas del proceso FAC son las siguientes:

- Formación de precipitados coloidales precipitante - contaminante (coprecipitación), con el objetivo de insolubilizar el contaminante.

- Coagulación de los coloides con agente coagulante (heterocoagulación), para aumento de tamaño.
- Flocculación de los coloides, para disminuir el número de agregados, reducir la cantidad de agua y en algunos casos, hidrofobizar la superficie de las unidades flotables.
- Hidrofobización de los agregados (opcional a la etapa 3), normalmente empleando tensoactivos (colectores).
- Colisión de flóculos o agregados con burbujas de aire.
- Adhesión a las burbujas.
- Ascensión de las unidades burbujas - flóculos o agregados coloidales hacia la superficie.
- Separación del producto flotado conteniendo los contaminantes.

En el caso de la FAC debido a que los coloides adsorbentes son pequeños y frágiles es necesario utilizar microburbujas (burbujas con tamaños menores que 100 μm) y evitar las condiciones hidrodinámicas de alta turbulencia para no

destruir estos agregados, por lo cual, el equipo de flotación ampliamente utilizado para la separación sólido/líquido es el de flotación por aire disuelto (FAD), sin embargo, cuando se requiere tratar grandes volúmenes, este equipo presenta algunas limitaciones debido a su baja capacidad de tratamiento. Las tecnologías de flotación no convencionales (celdas Jameson o jet, celdas columnas y celdas centrifugas), son una alternativa, debido a que las condiciones hidrodinámicas son relativamente tranquilas y los tiempos de retención son bajos.

4.3 CILINDRO AIREADO O CÁMARA DE BURBUJAS ("BUBBLE CHAMBER"), BC

Este sistema es una variante del Hidrociclón de Miller-ASH ("Air sparger hydrocyclone") sin el "overflow" (desbordamiento) y sirviendo de "contactor" de burbujas y partículas. El ASH y el BC hacen parte de un conjunto de sistemas de flotación centrífuga de alta capacidad que aplica el concepto de separación con burbujas pequeñas en un campo centrífugo (Ver **Figura 15**). Estos sistemas han sido recientemente utilizados en el área ambiental, en la remoción de tintas de papel (reciclo) y aceites. El sistema BC consta de un contactor y un separador de las fases flotada y agua tratada.

4.4 SEPARADOR CENTRÍFUGO

Un sistema diferente (Ver **Figura 16**) fue desarrollado en el laboratorio de la Universidad do Río Grande do Sul y emplea el mismo principio de la “nozzle flotation”, con la diferencia de que después de la etapa de pasaje forzada por la válvula (en este caso el flujo es horizontal), la solución aireada pasa por un "static mixer" y todo el conjunto alimenta a un separador de forma cilíndrica que posee entrada tangencial, un pedestal para formar el "air core", "underflow", "vortex finder" y "overflow". Las principales variables de diseño son las dimensiones del cilindro y de sus distintas partes, el tipo de contactor ("static mixer") y el sistema de auto aspiración. Entre los parámetros operacionales, se destacan, la presión del fluido dentro del separador centrífugo, la localización del pedestal y el caudal a ser tratado.

4.5 PROCESO CAF - CAVITATION AIR FLOTATION

En este caso la generación de burbujas ocurre por cavitación del aire directo en la corriente a tratar (succionado) vía a un tubo aireador especial, agitado en alta rotación (este tubo es la base del proceso y está patentado). Actualmente, su mayor uso ha sido en la industria de alimentos (Ver **Figura 17**).

4.6 FLOTACIÓN JET-JAMESON MODIFICADA

Las celdas de flotación jet convencionales, CFJC, consisten de un tubo de contacto, un tanque de flotación y un controlador de nivel. El tubo de contacto está a su vez formado por un inyector (generador de burbujas) localizado en la parte superior que permite introducir la corriente a tratar en forma de jet, un tubo de descenso ("downcomer"), y en la parte inferior, posee un distribuidor de burbujas o difusor (Ver **Figura 18**). En estas celdas el proceso de "colección" (colisión - adhesión) y la formación de los agregados gotas de aceite - burbujas de aire, se produce en el tubo de descenso ("downcomer") y la separación de estos agregados del agua, en el tanque de flotación (separación de las fases). La mezcla cae en co-corriente, siendo descargada en el tanque de separación de las fases, donde los agregados ascienden a la superficie (camada de espuma), mientras que el agua tratada es descargada por la parte inferior.

La corriente a tratar previamente condicionada, en un mezclador estático, con espumante y/o floculante es alimentada a presión por el inyector. Al pasar el agua por la reducción de área en el inyector, aumenta la velocidad, al mismo tiempo que decrece la presión. La reducción de presión induce la entrada de aire por la abertura dispuesta para este fin. El movimiento subsiguiente de la corriente de dos fases a través de la región de baja velocidad (alta presión) resulta en la dispersión del aire en burbujas pequeñas. Estas son forzadas a descender en

sentido opuesto a su flotabilidad natural, en dirección al tanque de flotación, donde ocurre la separación de las partículas de aceite del agua (Ver **Figura 19 (a)**).

En la celda de flotación jet modificada, CFJM, fue incluido en el centro del tanque de flotación un colector o cilindro concéntrico cerrado en el fondo y empaquetado en la parte superior. Este colector concéntrico evita el arrastre de las partículas no adheridas a las burbujas de aire a la salida del agua tratada. El hecho de descargar los agregados contaminante - burbujas de aire en este colector, fuerza a las partículas no adheridas a las burbujas de aire a ascender a la interfase espuma/agua, aumentando la probabilidad de que estas queden retenidas en la camada de espuma (Ver **Figura 19 (b)**). Este colector, también, permite operar el tubo de descenso en condiciones hidrodinámicas turbulentas lo que favorece el proceso de floculación en el propio tubo de descenso y no altera el régimen de flujo en el tanque de flotación.

Las modificaciones estructurales en el diseño de la CFJC, versión CFJM, aumentaron la eficiencia de remoción de aceite en 5 puntos porcentuales (de 80% en la CFJC a 85 % en la CFJM).

4.7 FLOTACIÓN COLUMNAR

La celda - columna se caracteriza por su forma rectangular, cuadrada o redonda con poco diámetro y una gran altura. Prevalece la forma redonda. Es usada comúnmente en la industria metalúrgica. La corriente a tratar entra a unas 2/3

partes de la zona inferior de la celda y se encuentra con una corriente de aire ascendente, el concentrado rebosa por la parte superior, y simultáneamente un spray de agua colocado en la parte superior lava las espumas removiendo la ganga o estéril, que se descarga por la parte inferior.

El sistema de inyección de aire es la parte fundamental de la celda y se realiza mediante inyectores internos o externos que buscan mejorar la producción del enjambre de burbujas y el tamaño de las mismas; así, por ejemplo, se han usado inyectores cerámicos, tubos perforados, cubiertos con lonas de filtro y últimamente el generador de burbujas desarrollado por el Bureau de Minas de Estados Unidos. El sistema consiste en la disolución de aire en el agua, alimentados convenientemente a una cámara pequeña que contiene gravas, de preferencia de canto rodado, a presiones que fluctúan entre 60 a 70 psi. También es importante el burbujeador microcel de Process Engineering Resources, Inc., que es un mezclador estático para colocarse fuera de la columna formando microburbujas. Finalmente, podemos mencionar los slam jet sparger de Canadian Process Technologies de regulación automática de gas, que trabajan fuera de la columna y son diseñadas para fácil instalación y mantenimiento en línea.

Las ventajas de este diseño con respecto a las celdas convencionales son menor costo de instalación y operación, menor ocupación de espacio, disminución sustancial del consumo de energía, principalmente porque no tiene sistema de

agitación mecánica, fácil automatización y control por computadora y menor consumo de reactivos que las celdas de agitación mecánica.

La celda columnar tipo Microcel fue modificada de tal manera que la alimentación entra junto con la fase espuma para optimizar la separación sólido - líquido (Ver **Figura 20**). En el reciclo, realizado por bombeo, a través de un venturi o válvula de aguja, el aire es succionado en el tubo interior donde se forman las burbujas, moduladas en su tamaño con la adición de tensoactivos.

4.8 CELDA FF: FLOCULACIÓN - FLOTACIÓN

Un nuevo sistema de floculación, ha sido desarrollado en nuestro laboratorio, acoplado a un sistema de flotación centrífugo (**Figura 21**). La floculación o coalescencia de emulsiones aceite en agua, ocurre en la presencia de aire y en un floculador especialmente diseñado para aumentar la turbulencia.

Los flóculos formados se caracterizan por su gran tamaño y baja densidad lo que hace la separación extremadamente rápida. El tiempo de residencia es del orden de segundos lo que hace de FF un equipo de alta capacidad. Este flotador compacto ha sido utilizado en la remoción de aceites y grasas, para el tratamiento y reciclo de aguas de lavado de vehículos y en la remoción de sólidos suspendidos (Rubio 2001).

4.9 CELDA MULTIBURBUJAS

Recientemente, Féris et al, (2001) reportaron valores de remoción de precipitados coloidales de hierro en una columna que opera con mezclas de burbujas de tamaño mediano (menores que 600 μm) y microburbujas generadas con el sistema FAD (menores que 100 μm). Esta celda, llamada de "multiburbujas" (**Figura 22**) presenta una serie de ventajas con relación a la FAD y a la Microcel.

Estas ventajas son derivadas de los mayores valores de flujo del área superficial de burbujas disponibles, S_b , (mejor tasa aire/sólidos) lo que resulta en mejores velocidades (cinética) de separación.

La generación de las burbujas de tamaño medio se logra utilizando un venturi y la de las microburbujas con la técnica de la FAD. Para ello se necesita alto volumen de aire y en especial, para la generación de microburbujas se requiere alta área superficial. Esta técnica no genera destrucción del floculado.

5. HIDROCICLONES

5.1 FACTORES QUE AFECTAN SU DESEMPEÑO

Tanto en los hidrociclones dinámicos como en los estáticos el desempeño se rige por la ley de Stokes. La forma en que afecta cada uno de los factores de dicha ley, el desempeño del hidrociclón se describe a continuación:

- Diferencial de gravedad específica, $\Delta\gamma = (\gamma_w - \gamma_o)$, es la fuerza dominante en la separación. A mayor diferencia de gravedades, más rápido ocurre la separación (mayor potencial).
- Tamaño de gota medio, d_o , es importante porque las gotas más grandes se mueven más rápidamente hacia el núcleo central. A más altas concentraciones de aceite a la entrada, aumenta la probabilidad de coalescencia incrementando el tamaño de gota medio. Adicionalmente, se debe hacer un diseño cuidadoso para minimizar el alto corte corriente arriba del hidrociclón para prevenir la desintegración de las gotas.

- Temperatura, T , influye en la medida en que se altera la viscosidad del agua, aunque también afecta en menor grado el diferencial de gravedad específica, aumentando la velocidad de migración de la interfase. Un aumento de temperatura generalmente mejora el desempeño del hidrociclón. Además, para un mejor desempeño del hidrociclón, este se debe instalar corriente abajo de un separador primario donde normalmente ocurre la remoción del 95% de agua o corriente arriba de cualquier enfriador de agua producida.
- Tasa de flujo de entrada, q , a más altas tasas de flujo, aumenta la intensidad de las fuerzas de separación centrífugas.
- Tasa reject (tasa de salida del producto recuperado), puesto que esta tasa se mantiene por encima de la mínima, no influye significativamente en el desempeño del hidrociclón y se puede asumir constante.

Otros factores que influyen en el desempeño del hidrociclón son la concentración de entrada, los baches de aceite, la tensión interfacial, el tratamiento químico, los sólidos y el contenido de gas libre o disuelto. En la aplicación, la mayoría de estos factores permanecen constantes, por tanto las variables de operación de caída de presión son las que normalmente dominan la eficiencia de la unidad.

Los factores anteriores influyen en el desempeño de ambos tipos de hidrociclones, pero analizándolos por separado, hay dos factores que afectan el desempeño de los hidrociclones estáticos aunque casi no influyen en el desempeño de los dinámicos, estos son la presión de operación y la relación reject. La presión de operación es un parámetro crítico, para determinada tasa de flujo de entrada, se requiere una mínima presión de entrada para generar un vórtice al interior del ciclón. Cuando se alcanza esta presión, el diferencial de presiones de la entrada a la salida de agua "limpia" y de la entrada a la salida de producto recuperado, controlan el desempeño del hidrociclón. La relación reject se define como la relación del flujo del producto recuperado al flujo de entrada, expresado como un porcentaje. La operación del hidrociclón por debajo de la relación reject óptima, baja la eficiencia de remoción de aceite debido a que solo una parte pequeña del volumen del núcleo rico en aceite es removida con la corriente del producto recuperado. El resto sale en la corriente de agua "limpia". La operación del hidrociclón por encima de la relación reject óptima, no disminuye la eficiencia de remoción de aceite pero aumenta el volumen de la corriente del producto recuperado. Las típicas relaciones reject son entre 0.5 y 3%.

El efecto de la relación reject no es importante en los hidrociclones dinámicos, sin embargo la tasa reject si los afecta. Esta última se diseña constante a través del turndown (rango de operación de tasas de flujo de entrada, de la mínima a la máxima tasa de flujo, sobre el cual es consistente el desempeño requerido), por eso es el parámetro a optimizar. Pruebas de campo demostraron que se puede

trabajar con una tasa reject hasta de 0.5 gpm sin afectar notoriamente la eficiencia.

Otro parámetro que afecta a los hidrociclones dinámicos, es la velocidad de rotación, a más altas velocidades de rotación, mayor es la fuerza centrífuga, lo que mejora la eficiencia de remoción a una tasa dada, aunque puede representar un aumento significativo en la presión de entrada. Estas velocidades se encuentran entre 1050 y 3000 rpm.

5.2 TIPOS DE HIDROCICLONES

Según su uso existen tres tipos básicos de hidrociclones, hidrociclones sólidos-líquido, hidrociclones líquido-líquido e hidrociclones gas-líquido. Estos a su vez se pueden combinar para separar tres fases.

Según su principio de operación, existen dos tipos de hidrociclones para el tratamiento de las aguas de producción, los estáticos y los dinámicos. Los del segundo tipo se limitan a pruebas offshore, los del primer tipo han sido más investigados y aceptados en la industria petróleo, y se dividen a su vez según su diseño en los hidrociclones de 4 partes diseñados por Colman y Thew (1988) y los hidrociclones de 3 partes diseñados por Young et al. (1990).

5.2.1 Hidrociclones Dinámicos. El hidrociclón dinámico es un cilindro de rotación con una entrada axial, una boquilla para el producto recuperado (reject nozzle), y una salida axial. Un motor externo rota la pared del ciclón y el cono de vórtice de entrada a una velocidad entre 1600 y 3000 rpm (Ver **Figura 23**). El ciclón está disponible en varios tamaños con capacidades entre 1250 a 25000 BWPD.

Principio de operación de hidrociclones dinámicos. La corriente entra de manera axial y fluye a través de un cono de rotación que genera un movimiento de vórtice al fluido. Las altas fuerzas centrífugas (mayores a 1000 g) permiten que el aceite migre al núcleo central y salga por la boquilla de salida del producto recuperado.

El agua limpia sale del ciclón por el mismo extremo de la salida del producto recuperado. De ahí, se nota que el aparato está en co-corriente para el agua producto y la corriente de producto recuperado. El vórtice que se forma por la rotación se conoce como “vórtice libre”, en él, la velocidad tangencial es inversamente proporcional a la distancia a la línea central del hidrociclón.

5.2.2 Hidrociclones Estáticos. El hidrociclón estático es un “housing” que contiene uno o más liner con una entrada y dos salidas una para el agua limpia y otra para el aceite recobrado (Ver **Figura 24**). Se usan corriente abajo, válvulas de control de presión y orificios para la salida del recobro para regular la caída de

presión y obtener una calidad aceptable en ambas corrientes de salida, además se debe tener una presión de entrada al hidrociclón adecuadamente baja y no restringir la producción con un back pressure excesivo en la cabeza del pozo.

Partes del hidrociclón estático. Existen dos tipos de diseños de hidrociclones estáticos: El hidrociclón de 4 partes diseñado por Colman y Thew (1988), consiste de cuatro secciones, la sección de cámara cilíndrica de remolino, la sección de reducción concéntrica, la sección finamente aguzada (cónica) y la sección de tallo largo paralelo. Este ciclón tiene una entrada tangencial en la cámara cilíndrica, un orificio de salida del producto recuperado en la cima del dispositivo, y una salida en el fondo (Ver **Figura 25a**). El hidrociclón de 3 partes diseñado por Young et al. (1990), tiene tres secciones, la sección de cámara cilíndrica de remolino, la sección de reducción concéntrica, y la sección de tallo paralelo (Ver **Figura 25b**). Como se puede notar este diseño eliminó la sección finamente aguzada (cónica) y además, aumentó el ángulo de la sección cónica de 1,5 in a 6 in. Otras diferencias son las dos entradas tangenciales a la sección de cámara cilíndrica de remolino y un “finder core” en la sección de tallo paralelo para aumentar la captura de las gotas pequeñas de aceite. Las unidades son exteriormente similares, siendo el hidrociclón de 4 partes más grande.

Principio de operación de hidrociclones estáticos. La corriente entra tangencial a la cámara cilíndrica, en las secciones cámara de entrada y de reducción concéntrica se alcanza la más alta aceleración tangencial del fluido (se forma un vórtice a alta velocidad), reduciendo la caída de presión y el esfuerzo de corte para evitar la ruptura de las gotas. El fluido se acelera a través de la sección cónica, donde a causa de su más baja gravedad, el aceite se mueve al núcleo central. En ambos diseños del hidrociclón estático, la mayor parte de la separación ocurre en la sección cónica debido al bajo ángulo de este segmento, que mantiene la intensidad del remolino con un alto tiempo de residencia; el fluido luego pasa a la sección de tallo largo donde las gotas más pequeñas de aceite migran al núcleo de flujo en reversa y salen en la corriente del “overflow”. El agua limpia emerge por la puerta de salida, mientras que un eje inverso de flujo lleva al núcleo de aceite al orificio superior de salida del producto recuperado.

5.3 SOLUCIÓN PARA USO DE HIDROCICLONES ESTÁTICOS

Se ha visto que los hidrociclones estáticos presentan algunas falencias en el desempeño, a pesar de esto son más utilizados pues son más económicos y tienen otras ventajas comparados a los hidrociclones dinámicos, por tal razón, se presentan algunas soluciones alternativas para el uso de hidrociclones estáticos.

Existen muchos sistemas de hidrociclones estáticos para la separación de aceite del agua de producción que no alcanzan las especificaciones de calidad requeridas para el vertimiento. Las causas más comunes son:

- Cambios a largo plazo de las condiciones del campo: disminución de temperatura y/o presión. Estos cambios pueden reducir el “turndown” y el desempeño del hidrociclón.
- Química interfacial adversa: causada por cambios químicos en el yacimiento, pero más comúnmente por un creciente “cóctel” de químicos comúnmente adicionados a los procesos modernos de producción de aceite y gas, por ejemplo: inhibidores de costras, inhibidores de corrosión, fluidos de tratamiento del pozo, desemulsificantes, coagulantes, floculantes, fluidos de drenaje de plataforma que contienen detergentes diferentes, solventes y partículas coloidales que pueden disminuir la tensión interfacial aumentando la sensibilidad al rompimiento de la gota.
- Propiedades físicas adversas: Tales como la viscosidad, baja diferencia de densidades.
- Distribución pequeña de tamaño de gota a la entrada: causada por la sensibilidad a la dispersión en regiones de alto corte del proceso, tales como

válvulas; El desempeño de separación del hidrociclón es muy sensible a la distribución de tamaño de gota.

- Geometría del hidrociclón de separación por debajo de la óptima: Tales como diámetros nominales grandes y tipos no adecuados de liner de los hidrociclones.

A continuación se presentan algunas nuevas técnicas.

5.3.1 Técnica de Pre-coalescencia. La idea de Cyclotech es crear tecnología que mejore el desempeño de los equipos ya existentes y/o amplíe su uso, por ello desarrolló la técnica de pre-coalescencia. La técnica está basada en la coalescencia a la entrada del aceite para producir una distribución de tamaño de gota de aceite más gruesa antes de la entrada al hidrociclón. Las pruebas de campo han demostrado que se puede mejorar el desempeño de separación en un 200%. Esta técnica no requiere control externo o fuente de potencia, no se ve afectada por el contenido de sólidos y se puede retrolavar fácilmente sin necesidad de un recipiente mayor o modificaciones en la tubería.

Esta técnica debe emplearse en sistemas existentes, cuyas corrientes no alcanzan las especificaciones de descarga o requieren una dosis bastante alta de químico para hacerlo, o en sistemas nuevos para extender la aplicabilidad del hidrociclón a aceite pesado, condensados y otras aplicaciones normalmente marginadas.

El principio de separación del hidrociclón está basado en la Ley de Stokes, por eso cualquier aumento en el tamaño de la gota beneficiaría grandemente la velocidad de separación, por ejemplo si logramos duplicar el tamaño de la gota, la velocidad se cuadruplicaría; Por esta razón, Cyclotech consideró clave la técnica de pre-coalescencia.

Los hidrociclones tienen una geometría interna que no se puede adecuar fácilmente a las diferentes capacidades de flujo, una solución es llenar la cámara de entrada con una fibra basada en una estructura coalescente para entrapar las gotas de aceite a medida que pasan por la cámara de entrada, aumentando el nivel de coalescencia, para producir un engrosamiento de las mismas antes de que lleguen a los liner individuales del hidrociclón. Se recomienda colocar un filtro corriente arriba del hidrociclón para el manejo de sólidos. Puesto que tanto el filtro como el medio coalescente requieren cambiarse periódicamente, en especial para manejar altos volúmenes de agua, esta opción no es tan atractiva.

Sin embargo, dado el nivel muy moderado de crecimiento de la gota, requerido para alcanzar una mejora sustancial en el desempeño de separación del hidrociclón, un bajo tiempo de residencia óptimamente diseñado, una alta velocidad de flujo y un dispositivo con un medio altamente abierto son suficientes para producir la pre-coalescencia parcial requerida mientras se mantiene un insensibilidad marcada a fallas por sólidos.

El sistema propuesto está formado por cuatro componentes principales:

- Desviador de entrada.
- Coalescedor de entrada.
- Coalescedor intermedio.
- Coalescedor de salida.

El desviador de entrada realiza las siguientes funciones: (1) Desviar el agua entrante al extremo final del compartimiento de entrada lo más lejos de las entradas a los liner, para maximizar el tiempo de contacto en el medio coalescente, minimizar el corto circuito y dirigir el flujo a través del medio, (2) proporcionar un medio robusto para ubicar los coalescedores (Ver **Figura 26**).

Los tres coalescedores pueden removerse individualmente. Un sistema ranurado asegura la alineación de todos los coalescedores con respecto a los otros y con respecto al porta liner en los platos de soporte del recipiente. Para implementar este sistema solo se necesita un cambio simple, que no implica modificaciones permanentes, en el caso de que se quiera volver al sistema inicial.

5.3.2 Técnica Hydroflok. El proceso Hydroflok, acelera la coalescencia de las gotas y forma floculos más grandes con una combinación de medios mecánicos y químicos. Este proceso fue desarrollado por Norsk Hydro durante la fase conceptual del proyecto de la plataforma Troll B para el Troll Oil Unit Committee.

En este proceso, el agua producida recibe un pre-tratamiento en un floculador antes de pasar a los hidrociclones. El recipiente de floculación consta de 2 cámaras conectadas en serie, en las cuales las gotas son primero agrandadas y posteriormente floculadas. (Ver **Figura 27**).

La carga electrostática sobre las gotas de aceite es neutralizada usando un coagulante, el cual se adiciona corriente arriba del floculador y es distribuido en el agua por medio de un mezclador. Luego el agua pasa a la primera cámara del floculador y se expone a una vigorosa mezcla por un tiempo de retención definido. Posteriormente, el agua fluye a la segunda cámara, donde se le adiciona el floculante, por el cual se forman aglomerados, y más tarde floculos más grandes. El agua es mezclada por un tiempo óptimo para producir una floculación rápida y asegurar que los floculos formados sean fuertes y estables. Los floculos deben tener suficiente resistencia a las fuerzas de corte que se producen a la entrada del hidrociclón.

Este proceso actúa a la misma presión del separador corriente arriba, para evitar la liberación de gas y mejorar el desempeño de los hidrociclones corriente abajo. Son parámetros importantes en el proceso: la selección del químico y las dosis apropiada del mismo, el grado de turbulencia (velocidad del agitador) y el tiempo de retención.

Las pruebas que se llevaron a cabo en la plataforma Troll B, con una corriente de entrada de 1000 ppm de aceite de tamaño promedio de la gota de 5 μm , produjeron los siguientes resultados: La instalación de los hidrociclones únicamente produjo una eficiencia de remoción de aceite del 75%, El hidrociclón con un recipiente floculador corriente arriba pero sin químicos, produjo una eficiencia de remoción de aceite del 88%, el anterior sistema pero con un paso de inyección de floculante, produjo una eficiencia de remoción de aceite del 93% , por último se le adicionó al segundo sistema un primer paso de inyección de coagulante y un segundo paso de inyección de floculante antes del hidrociclón y se obtuvo una eficiencia de remoción de aceite del 98%. Vale la pena resaltar que para obtener una eficiencia de remoción del 100% se necesitó para el tercer sistema una tasa de dosificación de 5 ppm, y para el cuarto sistema 1.5 ppm de coagulante y 0.5 ppm de floculante. El tiempo de retención en el recipiente de floculación y la tubería corriente arriba y corriente abajo fue de 2.5 minutos.

A medida que la separación es mejorada, el turndown del hidrociclón aumenta. Se debe considerar la aplicación del proceso Hydroflok cuando:

- Se tengan gotas pequeñas, de diámetro menor a 10 μm .
- Se tengan altas concentraciones de aceite en el agua del separador.
- Se tengan grandes volúmenes de agua.

El producto recuperado por el “overflow” del hidrociclón, es normalmente del 2% al 5% del total de la corriente de entrada al mismo. Aunque este producto tenga una alta concentración de aceite, del 95% al 98% de esta corriente es agua y las gotas suspendidas en ella son muy pequeñas y difíciles de separar, por eso no es recomendable reciclar esta corriente al proceso pues disminuiría su desempeño, por el contrario se aconseja tratar esta corriente con una pequeña centrífuga, donde las gotas son forzadas a coalescer y esta fase continua se puede mandar a la corriente de crudo o al despacho inmediatamente, lo mismo que la corriente de agua se puede enviar a la descarga.

5.3.3 Separadores de fondo del pozo. Los separadores aceite-agua producidos (DOWS) y gas-aceite (DGWS) son una tecnología relativamente nueva que puede

ayudar en la reducción de los costos de tratamiento de agua y producir más hidrocarburos en superficie por día puesto que parte del agua producida no llega a superficie. Las características críticas para el éxito, incluyen una alta relación agua a aceite, la presencia de una zona de inyección adecuada, que esté aislada de la zona de producción, compatibilidad del agua entre las zonas de inyección y producción y un pozo apropiadamente perforado y con buena integridad mecánica. Los DOWS son dispositivos situados en el fondo del pozo que separan el agua de las corrientes de gas y aceite. Algo del agua es inyectada dentro de otra formación u horizonte de la misma formación, mientras que el aceite, el gas y el agua remanente se producen en superficie (Ver **Figura 28**). El DOWS tiene gran potencial en el ahorro de dinero y en la reducción del impacto ambiental por el manejo en superficie del agua producida. Además en los pozos donde ha sido instalado se ha presentado un aumento de producción de aceite.

Esta tecnología es muy reciente y todavía tiene inconvenientes sin resolver. El costo de instalación del DOWS, que incluye el trabajo de workover, es alto. Si el crudo sube sus precios, probablemente será una alternativa atractiva para las empresas del sector.

Las ventajas del DOWS y del DGWS incluyen la reducción de sal del agua producida, eliminación de pozos solo para convertirlos a inyectoros, aumento de la producción diaria y uso de componentes off-the-shelf. Las configuraciones típicas DOWS incluyen un pozo que produce aceite y agua de un yacimiento y lo inyecta

en otro aislado hidráulicamente, como proceso de recobro secundario. Se puede usar un segundo pozo para producir de la zona de agua inyectada a una zona de disposición. Además requiere dos componentes básicos, un sistema de separación agua-aceite y por lo menos una bomba en el fondo del hueco que ocupen espacios de 7 in o menos de diámetro de casing.

Dos tipos básicos de DOWS se han desarrollado, un tipo usa hidrociclones que manejan normalmente hasta 10000 BFPD y el otro usa separadores por gravedad que manejan cerca de 1000 BFPD.

Los DOWS tipo hidrociclón se utilizan para pozos con los siguientes métodos de levantamiento: Bombeo electrosumergible, Bombeo Mecánico y Cavidades Progresivas. Los DOWS tipo separadores por gravedad, solo se han utilizado para Bombeo Mecánico. Ambos para poder ser introducidos en el casing, se diseñan como herramientas largas y delgadas (cerca de 100 ft).

Para obtener buenos resultados de la técnica, debe haber suficiente espacio vertical entre las zonas de producción y de inyección para permitir la separación por gravedad (si es el caso), el tiempo de residencia en la zona de inyección y el tamaño de la gota de aceite deben ser suficientemente grandes para permitir la separación especialmente en el DOWS tipo separador por gravedad, se debe estar seguro de la buena inyectividad de la zona receptora del agua, debe existir buen aislamiento entre las zonas productora y de inyección, se debe tener cuidado

para evitar el taponamiento por finos y/o arenas, aunque ya se han desarrollado equipos desarenadores para colocar en fondo, no se debe aplicar en pozos con grandes problemas de corrosión y escamas.

Esta tecnología es relativamente nueva, pero ya se han instalado 37 unidades DOWS en Norte América, 21 de ellas son DOWS tipo hidrociclón (Ver **Tabla 2**) y las 17 restantes son DOWS tipo separador por gravedad (Ver **Tabla 3**). No todas fueron exitosas pero la mayoría, presentaron un aumento promedio de la producción de aceite del 47% en formaciones carbonatadas y del 17% en formaciones de areniscas, además el rango de disminución de agua fue del 88% en formaciones carbonatadas y del 78% en formaciones de areniscas.

6. CONCLUSIONES

Del anterior informe presentado, se puede concluir que:

- Uno de los principales inconvenientes que han presentado los campos que maneja la Superintendencia de Operaciones Apiay a lo largo de su historia de producción son los altos volúmenes de producción de agua, por las diferentes causas anteriormente mencionadas; Esto ha hecho necesario re-evaluar y adecuar en varias oportunidades, su sistema de tratamiento de aguas de producción. Una vez más, debido en gran parte a los proyectos de desarrollo del campo, con los cuales se está perforando una cantidad apreciable de pozos al año, se enfrenta la Superintendencia a este problema.
- Las normatividad ambiental es cada día más exigente y el compromiso que tiene la industria petrolera de conservar la naturaleza es cada vez mayor, por consiguiente, tanto científicos como fabricantes de esta industria se han dado a la tarea de desarrollar tecnologías que día a día sean más amables con el medio ambiente. Colombia no es la excepción, en los últimos años se ha incrementado el interés de las empresas en lograr la Certificación ISO 14001; La Superintendencia de Operaciones Apiay es pionera en la Industria

Colombiana en obtención de esta certificación, es por ello que realiza esfuerzos por mantenerse en continuo mejoramiento en sus procesos, minimizando así su impacto al medio.

- Los equipos y sistemas de tratamiento de aguas de producción más usados en la Superintendencia de Operaciones Apiay son aquellos cuyo principio de separación está basado en la gravedad, por ello creí conveniente enfocar la investigación a equipos cuyos principios no se basaran únicamente en esta fuerza, tales como hidrociclones y flotación.
- Los nuevos diseños de equipos de flotación han disminuido el área que ocupan, aumentado su capacidad de manejo de agua y ampliado su rango de generación de burbujas, probando así que la técnica es adaptable a las necesidades de cada campo y que presenta muchas ventajas comparada con los sistemas de tratamiento convencionales.
- Los sistemas de flotación pueden ser una buena alternativa para el tratamiento de aguas de producción de la Superintendencia de Operaciones Apiay, pues se pueden montar fácilmente sobre las facilidades ya existentes, tales como separadores API, disminuyendo aún más el costo de instalación del nuevo sistema.

- La separación líquido-líquido por medio de hidrociclones ha incrementado su aceptación en la última década. Las investigaciones que se han realizado con respecto al funcionamiento y la eficiencia de los hidrociclones demuestran el gran potencial de estos dispositivos y el interés de la industria petrolera en ellos.
- Los hidrociclones pueden ser una buena alternativa para el tratamiento de aguas de producción de la Superintendencia de Operaciones Apiay, para las estaciones de recolección de Castilla, pues maneja crudo pesado (9-13 °API), además presentan un montaje sencillo.
- La técnica de flotación cobra cada día mayor interés en el tratamiento de aguas de producción. Son varios los estudios que se han llevado a cabo y varios los que quedan por hacer, pero sin duda alguna, esta técnica ha demostrado ser bastante accesible, relativamente económica y muy eficiente.
- La técnica de pre-coalescencia propuesta por Cyclotech, se puede tomar como base para implementar un sistema de coalescencia en el diseño futuro de hidrociclones o adaptarlo a hidrociclones ya existentes, para mejorar así su eficiencia de remoción sin tener que incrementar grandemente los costos de construcción o mantenimiento.

- La técnica Hydroflok desarrollado por Norsk Hydro, mejora grandemente la eficiencia de remoción de aceite al combinar la coagulación y la floculación, permitiendo así: Controlar el crecimiento de las gotas de aceite, formar floculos estables que resistan las fuerzas de corte a la entrada del hidrociclón y reducir el consumo de químicos

7. RECOMENDACIONES

Después de analizar la información consultada acerca de los sistemas de tratamiento de aguas, puedo recomendar lo siguiente:

- Para el tratamiento de agua de las estaciones de Castilla, recomiendo el uso de un separador de hidrociclones líquido –líquido corriente abajo de los tanques de lavado pues estos equipos manejan bien el crudo pesado y ocupan poco espacio. En cuanto a la nueva estación Castilla 3, sería bueno utilizar un separador de hidrociclones para que en caso de que la producción de agua se incremente, sólo haya que colocar otro liner dentro del “housing” de los hidrociclones y equilibrar la carga.
- Para el caso de las estaciones de Apiay y Suria, como el crudo es más liviano se puede utilizar la flotación; la celda en columna sería una buena opción debido a que estos sistemas son más compactos y serian más adecuados para estas estaciones que no tienen mucho espacio disponible para equipos voluminosos como son los sistemas basados en los principios de gravedad. También se puede adaptar un sistema generador de burbujas a las piscinas

API o algún tanque, dependiendo de un estudio previo que se haga de cada caso.

- También propongo diseñar una celda columna (seleccionando algunas ventajas de los sistemas de flotación expuestos), para las estaciones de Apiay y/o Suria, la cual recibiría la corriente a tratar a 2/3 partes de la longitud de la celda de arriba hacia abajo, previamente a esta corriente se le ha inyectado un floculante y se ha hecho pasar, por un floculador, para agrandar el tamaño de los flocs. En el fondo de la celda se encuentra la salida del efluente limpio, una parte de esta corriente va a vertimiento o posterior tratamiento y una parte pequeña (10% al 30%) es reciclada con una bomba y regresa a la celda columna, haciéndola pasar por un venturi para que arrastre el aire suficiente y lo distribuya en el área transversal de la celda por medio de un difusor radial. Las burbujas ascienden y capturan los floculos de la corriente de entrada y los suben hasta superficie (hay que analizar si existe la necesidad de agregar un espumante). La corriente de agua tratada sube, rebosa por el baffle y desciende a través del anular entre el baffle y la pared de la celda hasta encontrar la salida de agua limpia. El producto flotado cae en una bandeja dispuesta para su colección y es luego retirado de la misma por una salida en el piso de esta (Ver **Figura 29**).

BIBLIOGRAFÍA

ARNOLD, Ken y STEWART, Maurice, Surface Production Operations, Volumen 1, Segunda Edición, Publicado por Gulf Publishing Company, Houston, Texas, 1998.

AZAÑERO ORTIZ, Ángel. NUÑEZ JARA, Pablo Antonio. LEON DELGADO, Elard. MORALES VALENCIA, Marco. JARA IZACUPE, July y RENDON LOPEZ, Jorge Luis. Avances en Flotación Columnar En: Revista del Instituto de Investigación de la Facultad de Geología, Minas, Metalurgia y Ciencias Geográficas de la Universidad de Río Grande do Sul, 2003.

CAPPONI, Fabiano y MATIOLO, Elves. NUNES, Denise G. RUBIO, Jorge. PEREZ. GUERRERO, Carlos. y BERKOWITZ, Gabriel. Advances In Flotation Of Minerals Fines

CAPPONI, Fabiano y RUBIO, Jorge. Depuração De Águas Oleosas Por Flotação A Jato, 2003.

DA ROSA, J. SANTANDER, Mario. SOUZA, L. y RUBIO, Jorge. Flotación Como Proceso De Remocion De Contaminantes. III. Nuevas Técnicas Y Equipos.

EMPRESA COLOMBIANA DE PETROLEOS S.A., Superintendencia de Operaciones Apiay. File de Pozos, *Archivo Técnico*. Departamento de operaciones Apiay. Apiay, Meta, ECOPETROL.

EVALUACIÓN DE LAS CONDICIONES DE OPERACIÓN DE LAS ESTACIONES DE RECOLECCIÓN DE APIAY Y SURIA, Coordinación de Tratamiento, Superintendencia de Operaciones Apiay, ECOPETROL Apiay, 3 de Julio de 2003.

FÉRIS, L.A. GALLINA, S.C.W. RODRIGUES, R.T. y RUBIO, Jorge. Optimizing Dissolved Air Flotation Design System, Abril 6, 2000.

FINBORUD Anne, FAUCHER Mark y SELLMAN Erik, New Method For Improving Oil Droplet Growth For Separation Enhancement, SPE 56643, Octubre 1999.

GODBOLD Tom, LANGHUS Bruce, LANGHUS Arthur y VOSS Daves, New Technologies For Handling Produced Water-Downholeoil/Water Or Gas/Water Separators, PTTC, Julio 14 de 2000.

GOMEZ Carlos, CALDENTEY Juan, WANG Shoubo, GÓMEZ Luis, MOHAN Ram y OVADIA Shoham, Oil-Water Separation In Liquid-Liquid Hydrocyclones (LIhc) – Experiment And Modeling, SPE 71538, Octubre 2001.

HUDSON INDUSTRIES, Folleto publicitario “IAF, RPV and EPV SERIES Pressurized Induced Gas Flotation Units”.

ICP – ECOPETROL. Factibilidad de Inyeccion de Agua de Produccion en los Campos Apiay, Suria y Reforma de la GLL, , Febrero de 2004.

JONES P.S., A Field Comparison Of Static And Dynamic Hydrocyclone, SPE 20701, SPE Production and Facilities, Mayo 1993.

MANUAL DE OPERACIONES DE LA ESTACIÓN DE RECOLECCION Y TRATAMIENTO APIAY, Superintendencia de Operaciones Apiay, Departamento de Producción, ECOPETROL, 2003.

MELDRUM N., Hydrocyclones: A Solution To Produced-Water Treatment, SPE 16642, SPE Production Engineering, Noviembre 1988.

MINISTERIO DE MINAS Y ENERGÍA DEL PERÚ. Guía Ambiental para la Disposición y Tratamiento del Agua Producida, Capítulos 5 y 6, , 2001.

REYES AVILA, Nubia. Estudio De Factibilidad Para La Implementacion De Completamientos Inteligentes En Pozos Del Area Apiay – Ariari, Proyecto de Grado, UNIVERSIDAD DE AMÉRICA, 2001.

ROSS, Charles C. P.E., G.E. Valentine, Jr., SMITH, Brandon M. P.E. y PIERCE, J. Patrick , E.I.T. Recent Advances and Applications of Dissolved Air Flotation for Industrial Pretreatment. Noviembre 17, 2003.

ROSS, Charles C. P.E. SMITH, Brandon M. E.I.T. y G.E. Valentine, Jr. Rethinking Dissolved Air Flotation (Daf) Design For Industrial Pretreatment, 2000.

RUBIO, Jorge., SOUZA, M.L. SMITH, R.W. Overview of flotation as a wastewater treatment technique. Diciembre 12, 2001.

RUBIO, Jorge. TESSELE, Fabiana. ALHUCEMA, Pamela. MARINKOVIC´ ,Edgardo. Flotacion Como Proceso De Remocion De Contaminantes. II. Avances Y Aplicaciones En La Flotación Por Aire Disuelto.

RUBIO, Jorge. Unconventional Flocculation And Flotation Techniques.

SANTANDER, Mario y PAVEZ, Osvaldo. Alternativas tecnológicas para el tratamiento de efluentes originados en la extracción y procesamiento de minerales. Universidad de Atacama, Facultad de Ingeniería, Departamento de Metalurgia

SCHLUMBERGER. Folleto publicitario “Light Water Treatment Unit – LWTU”, Documento en Acrobat Reader , 2004.

SINKER, A. B., HUMPHRIS M. y WAYTH, N Enhanced Deoiling Hydrocyclone Performance Without Resorting To Chemicals, SPE 56969, Septiembre 1999.

STRODER S. M. y WOLFENBERGER E. E., Hydrocyclone Separation: A Preferred Means Of Water Separation And Handling In. OILFIELD PRODUCTION, SPE 27671, Marzo 1994.

VEIL J. A., LANGHUS B. G. y BELIEU, S., Downhole Oil/Water Separators: An Emerging Produced Water Disposal Technology, SPE 52703, Marzo 1999.

WEMCO .Folleto publicitario “Celda de Flotación”, Documento en Acrobat Reader

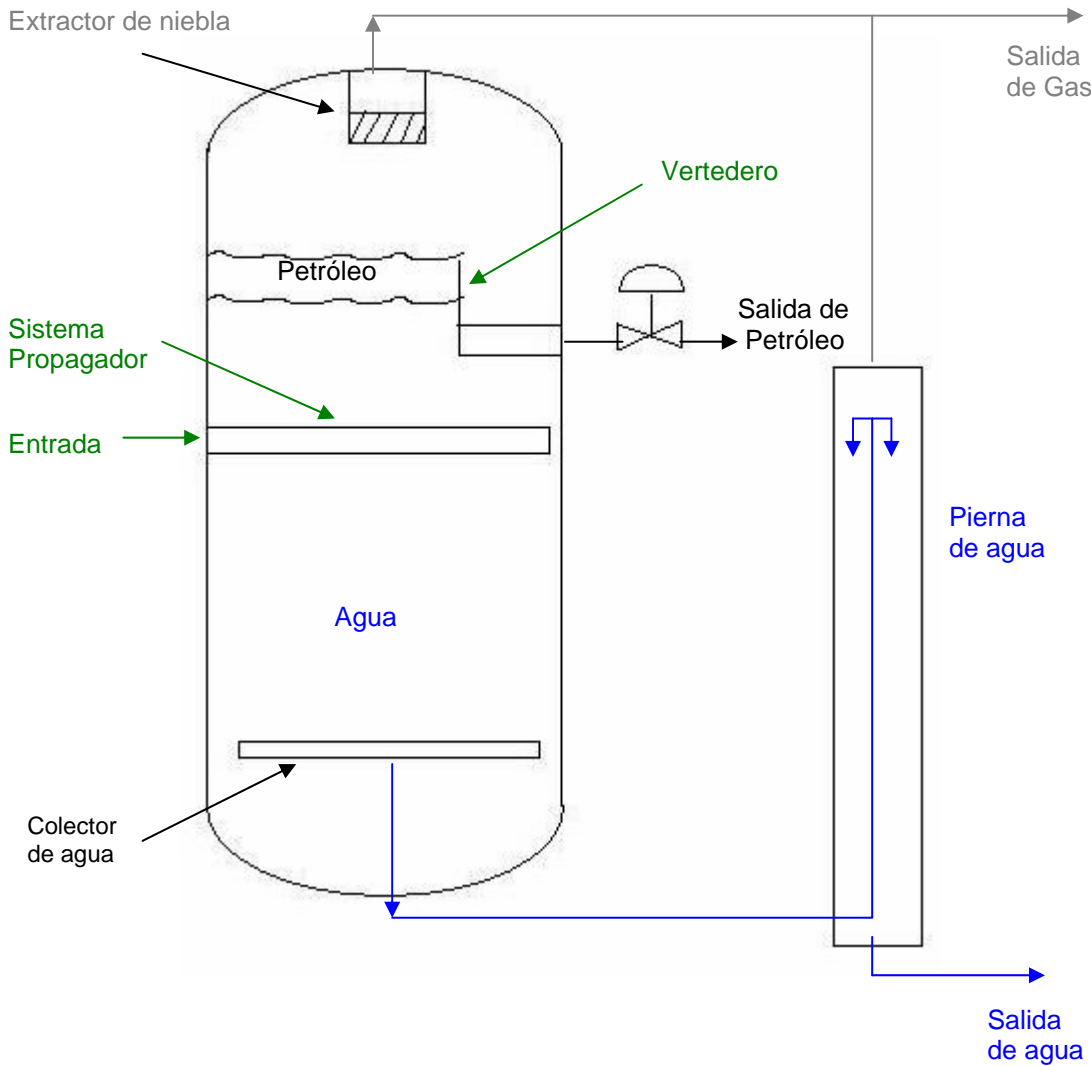
FIGURAS Y TABLAS

Figura 1. Fotografía de Sistema de aspersión de la Estación de Recolección de Apiay



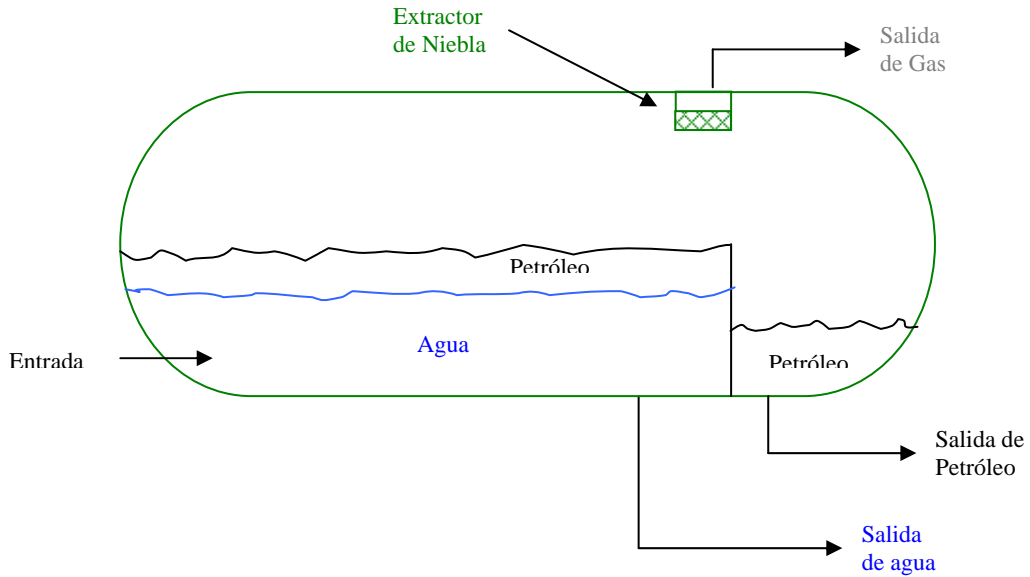
*Fuente: Manual de Operaciones Estación de Recolección y Tratamiento Apiay, Departamento de Producción, SOA.

Figura 2. Esquema de Tanque Desnatador Vertical.



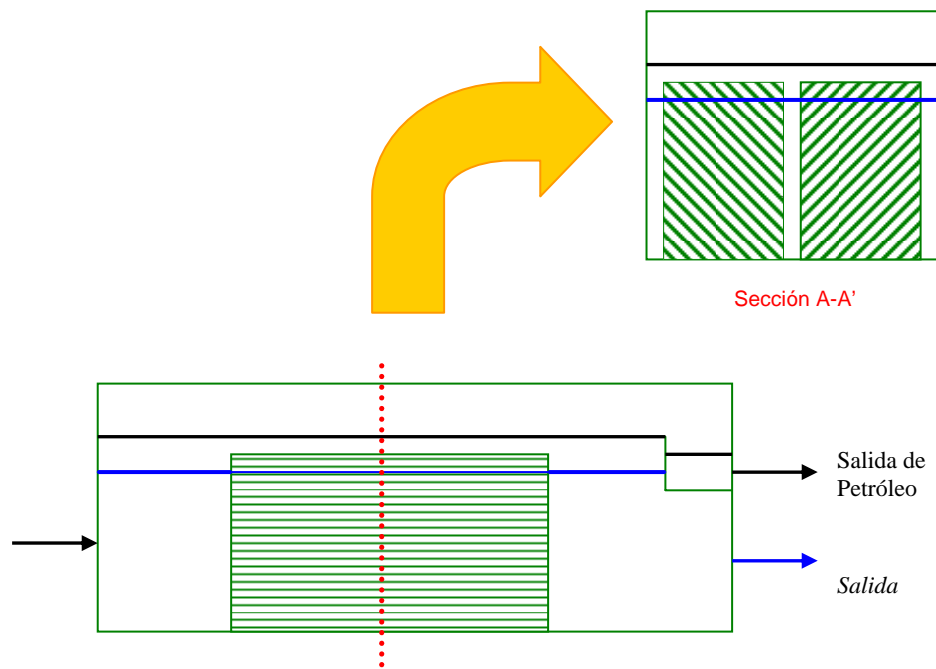
*Fuente: La autora.

Figura 3. Esquema de Tanque Desnatador Horizontal.



*Fuente: La autora.

Figura 4. Esquema de Interceptor de Platos Paralelos en Separador API.



*Fuente: La autora.

Figura 5. Fotografía de Platos Corrugados.



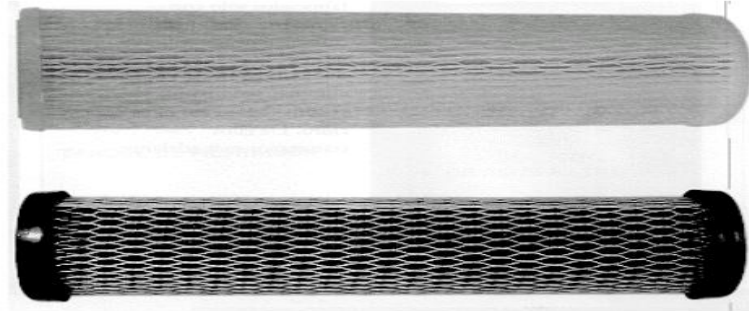
*Fuente: ECOPETROL, Superintendencia de Operaciones Apiay.

Figura 6. Fotografía de Filtro de Arena.



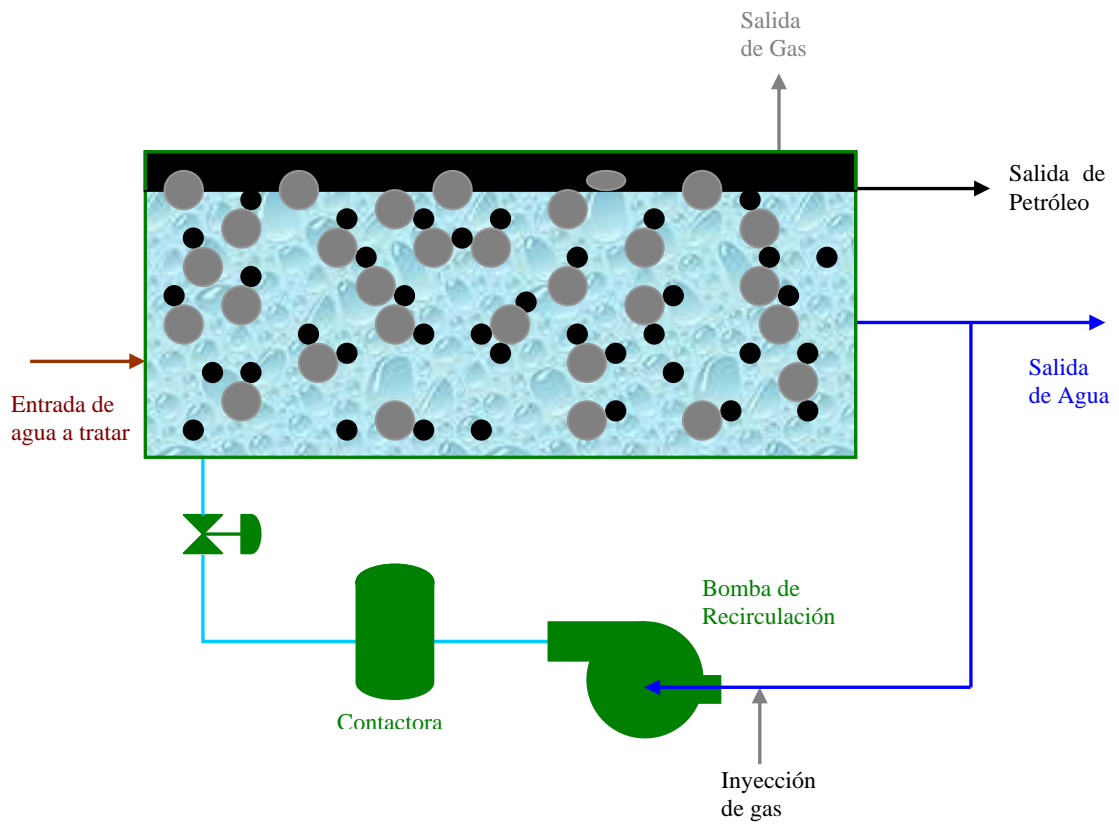
*Fuente: XXXXX

Figura 7. Fotografía de Filtro de Cartucho.



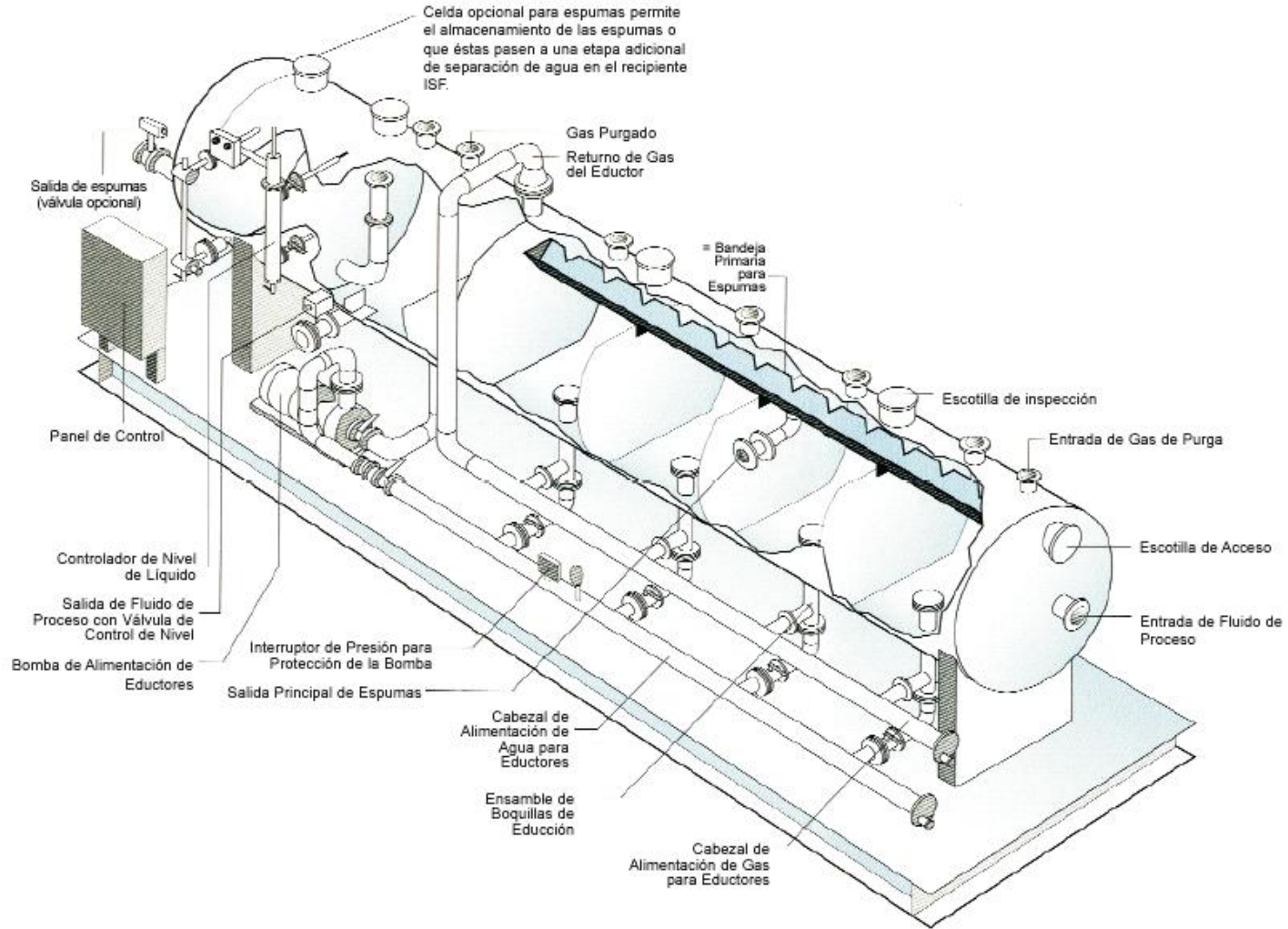
*Fuente: XXXXX

Figura 8. Esquema de Celda de Flotación por Gas Disuelto.



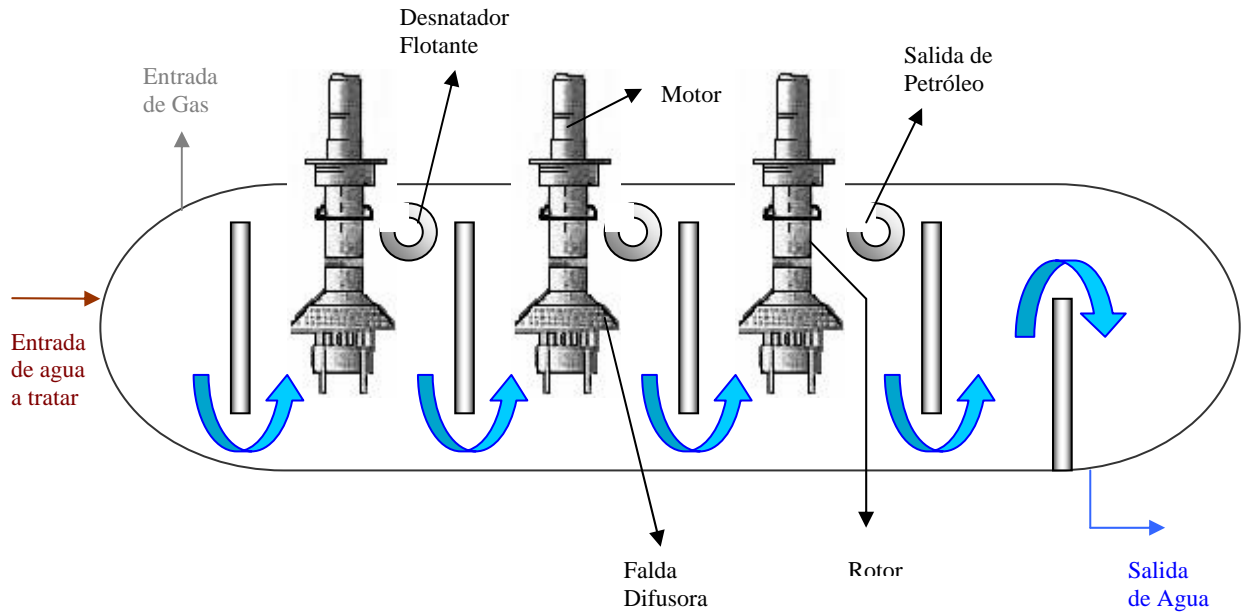
*Fuente: La autor

Figura 9. Esquema de Celda de Flotación por Gas Disperso con Eductor Hidráulico.



*Fuente: Folleto Publicitario Celda de Flotación

Figura 10. Esquema de Celda de Flotación por Gas Disperso con Rotor Mecánico.



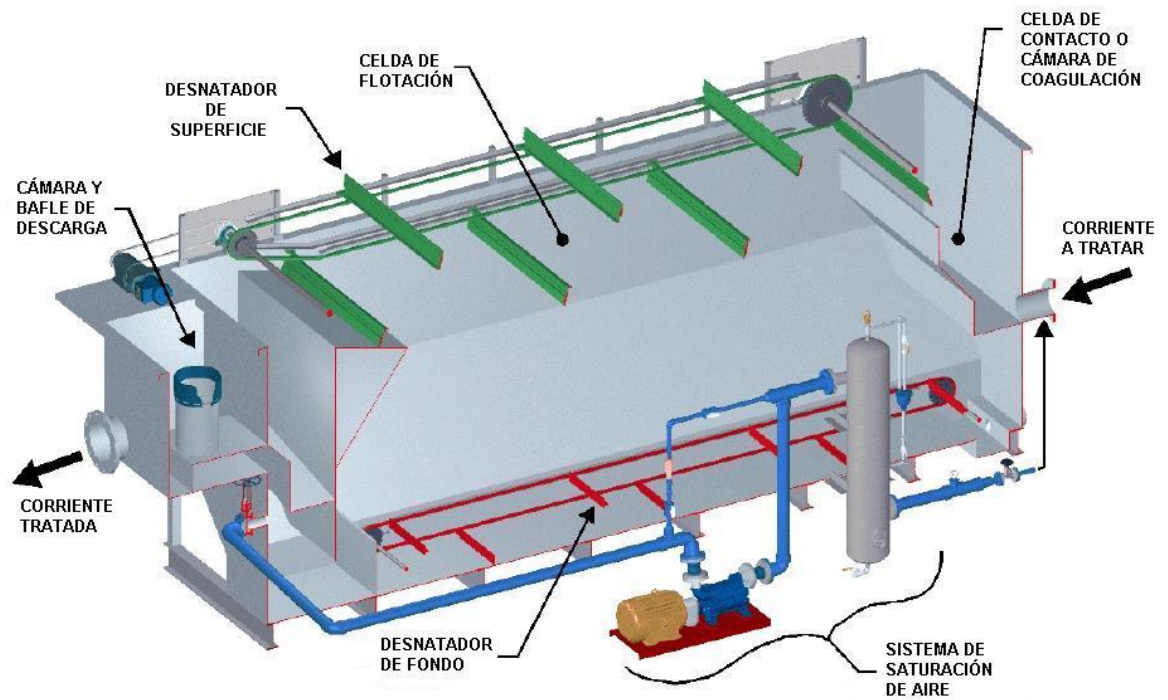
*Fuente: La autora.

Figura 11. Fotografía de Light Water Treatment Unit, LWTU.



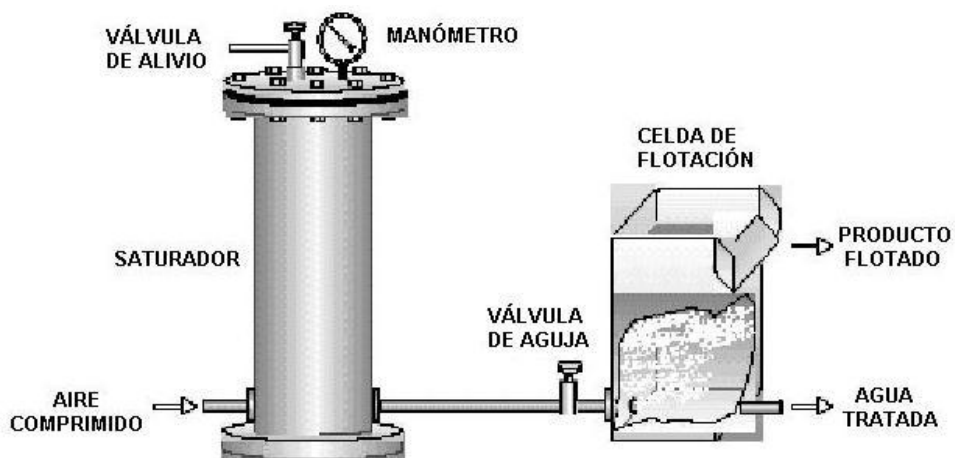
*Fuente: Folleto Publicitario Light Water Treatment Unit, LWTU, Schlumberger.

Figura 12. Componentes de un sistema de flotación por aire disuelto, FAD.



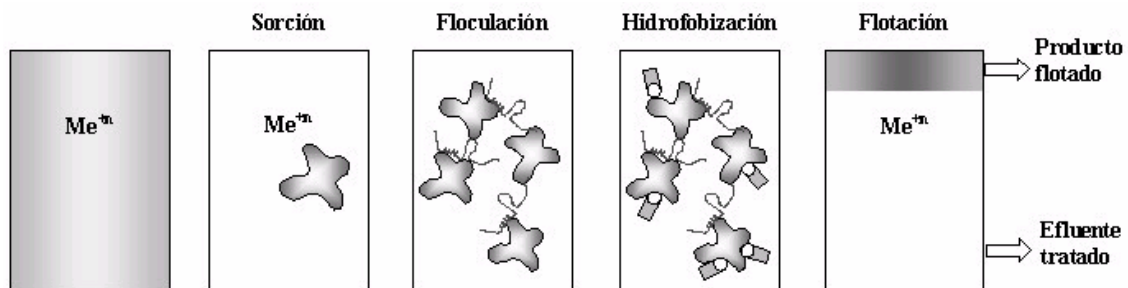
*Fuente: "Rethinking Dissolved Air Flotation (DAF) Design for Industrial Pretreatment", Charles C. Ross, P.E., Brandon M. Smith, E.I.T., G.E. Valentine, Jr.

Figura 13. Sistema de saturación de aire.



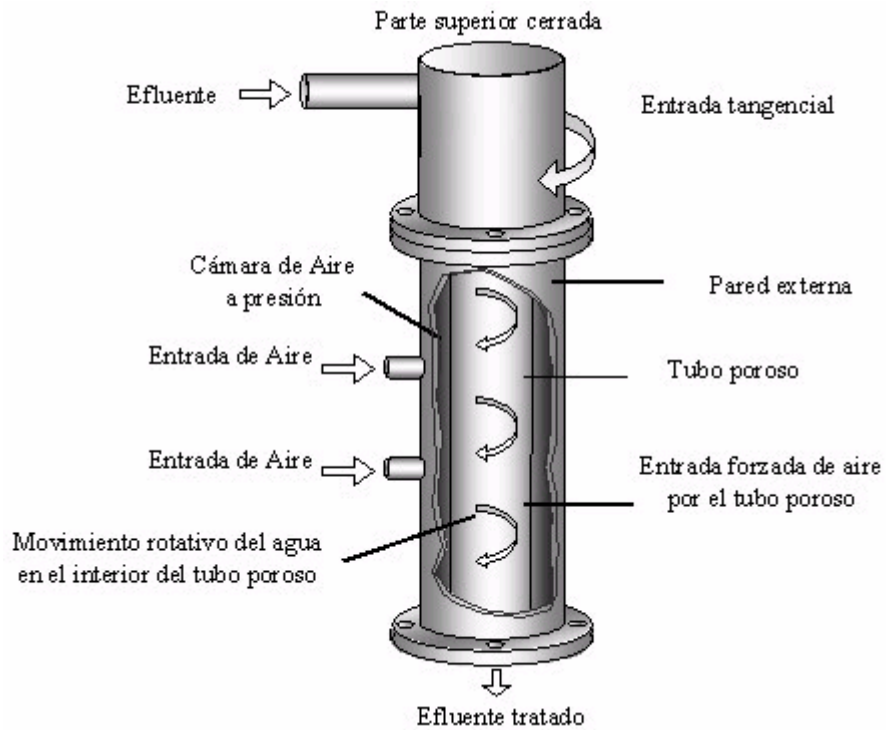
*Fuente: "FLOTACION COMO PROCESO DE REMOCION DE CONTAMINANTES. II. AVANCES Y APLICACIONES EN LA FLOTACIÓN POR AIRE DISUELTO", Rubio Jorge, Fabiana Tessele, Pamela Alhucema, Edgardo Marinkovic´.

Figura 14. Flotación de partículas absorbentes – FPA.



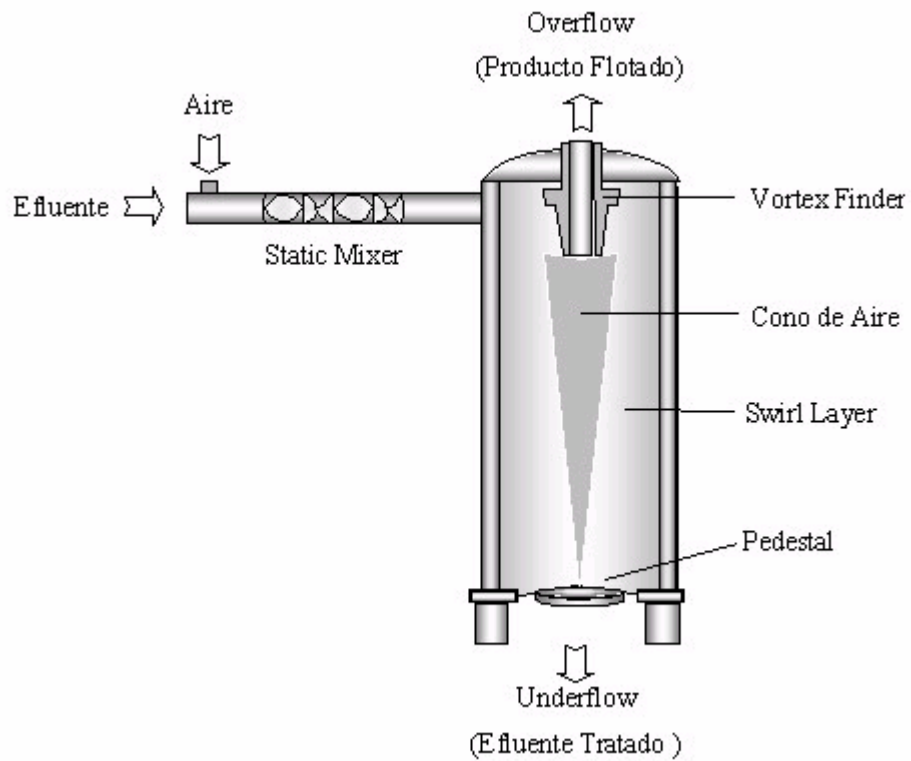
*Fuente: "Flotación como proceso de remoción de contaminantes. iii. Nuevas técnicas y equipos.", Da Rosa, J., M. Santander, M. L. Souza y J. Rubio.

Figura 15. Cilindro aireado o cámara de burbujas (“bubble chamber”), BC.



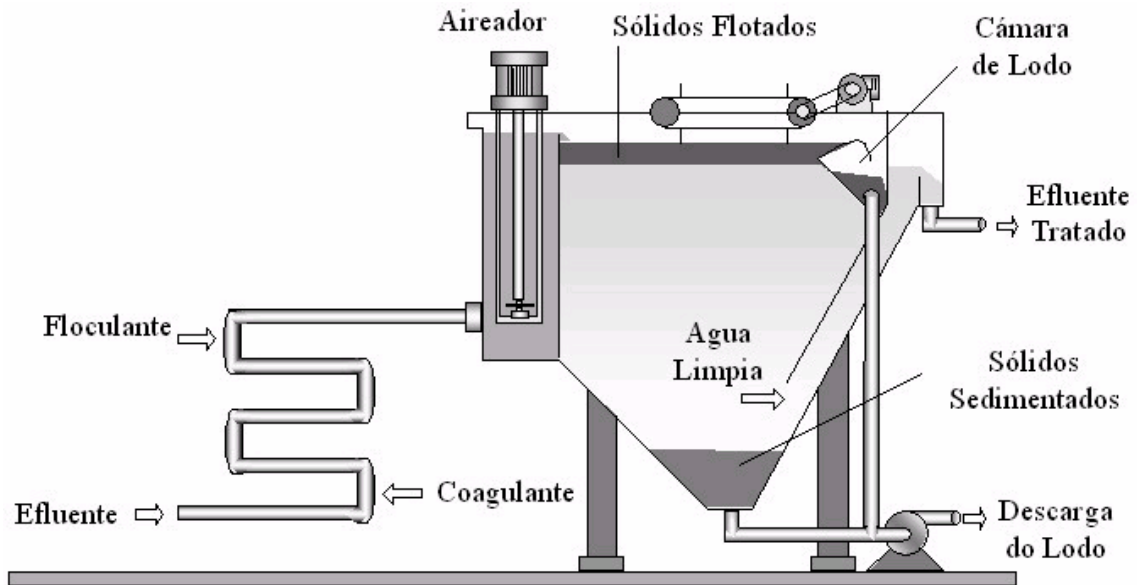
*Fuente: “Flotación como proceso de remoción de contaminantes. iii. nuevas técnicas y equipos.”, Da Rosa, J., M. Santander, M. L. Souza y J. Rubio.

Figura 16. Celda de flotación centrífuga del LTM.



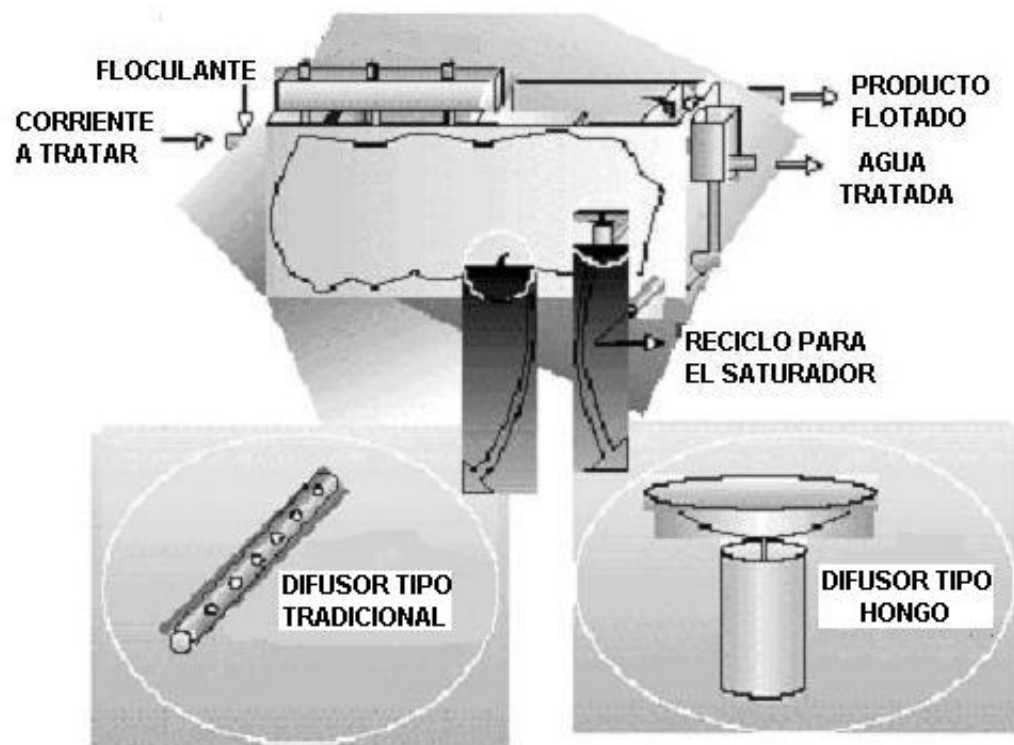
*Fuente: "Flotación como proceso de remoción de contaminantes. iii. Nuevas técnicas y equipos.", Da Rosa, J., M. Santander, M. L. Souza y J. Rubio.

Figura 17. Proceso CAF – Cavitation Air Flotation.



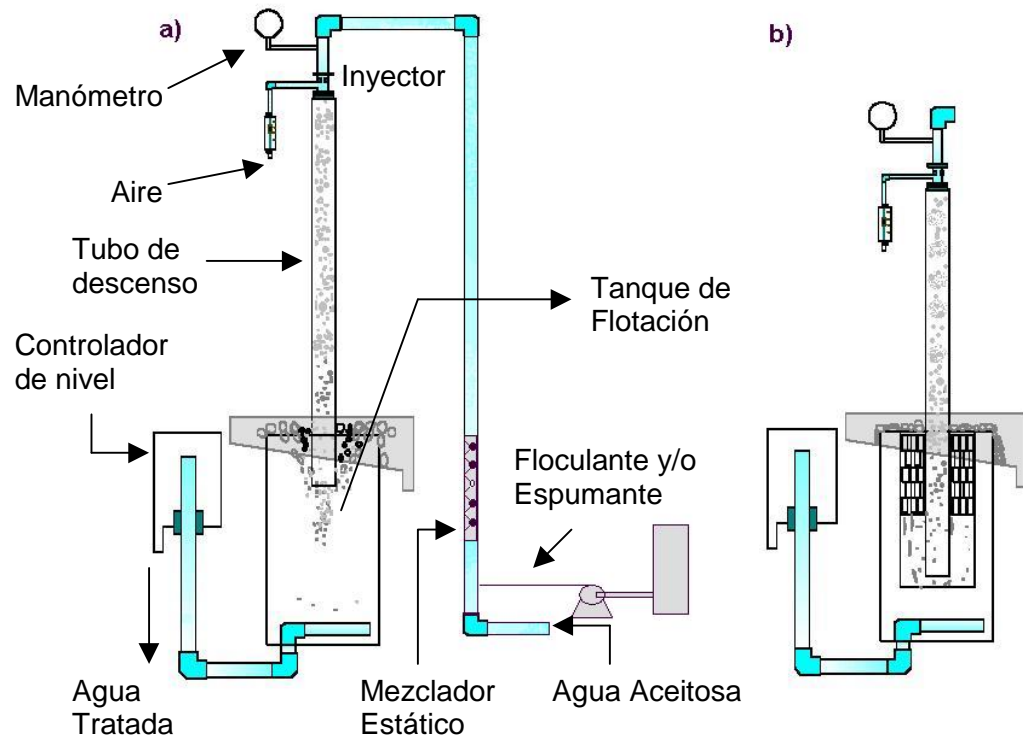
*Fuente: "Flotación como proceso de remoción de contaminantes. iii. Nuevas técnicas y equipos.", Da Rosa, J., M. Santander, M. L. Souza y J. Rubio.

Figura 18. Algunos tipos de difusores.



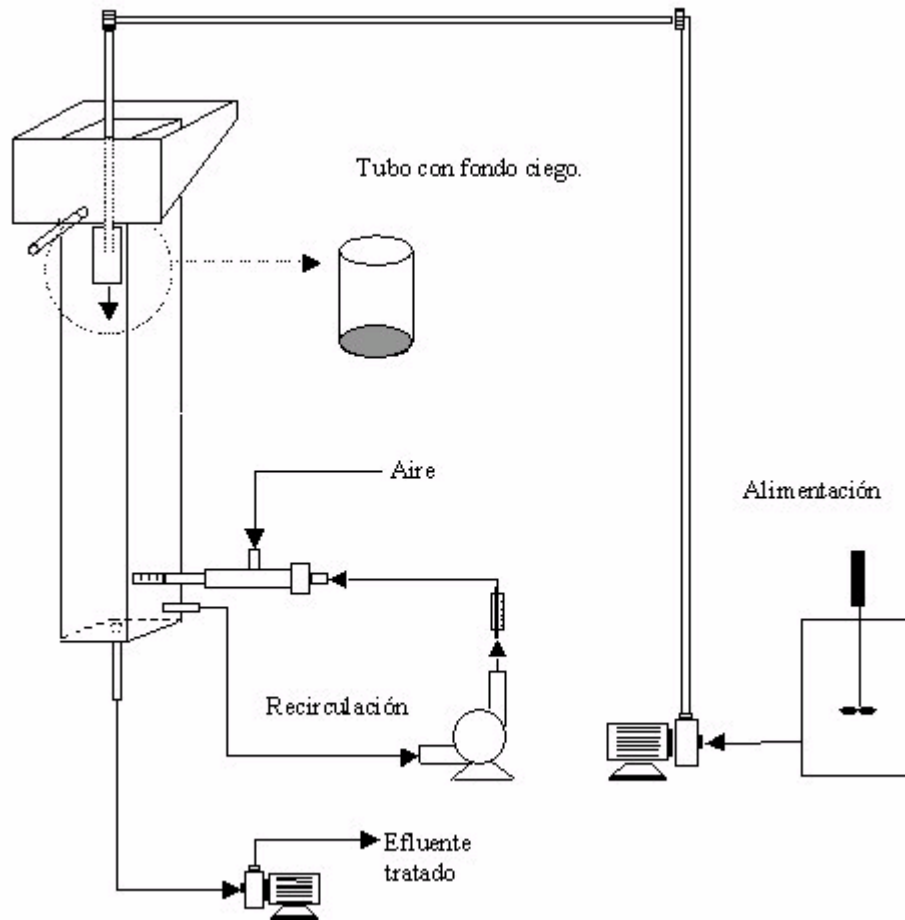
*Fuente: "FLOTACION COMO PROCESO DE REMOCION DE CONTAMINANTES. II. AVANCES Y APLICACIONES EN LA FLOTACIÓN POR AIRE DISUELTO", Rubio Jorge, Fabiana Tesele, Pamela Alhucema, Edgardo Marinkovic´.

Figura 19. (a) Celda de Flotación Jet Convencional, CFJC, y (b) Modificada, CFJM.



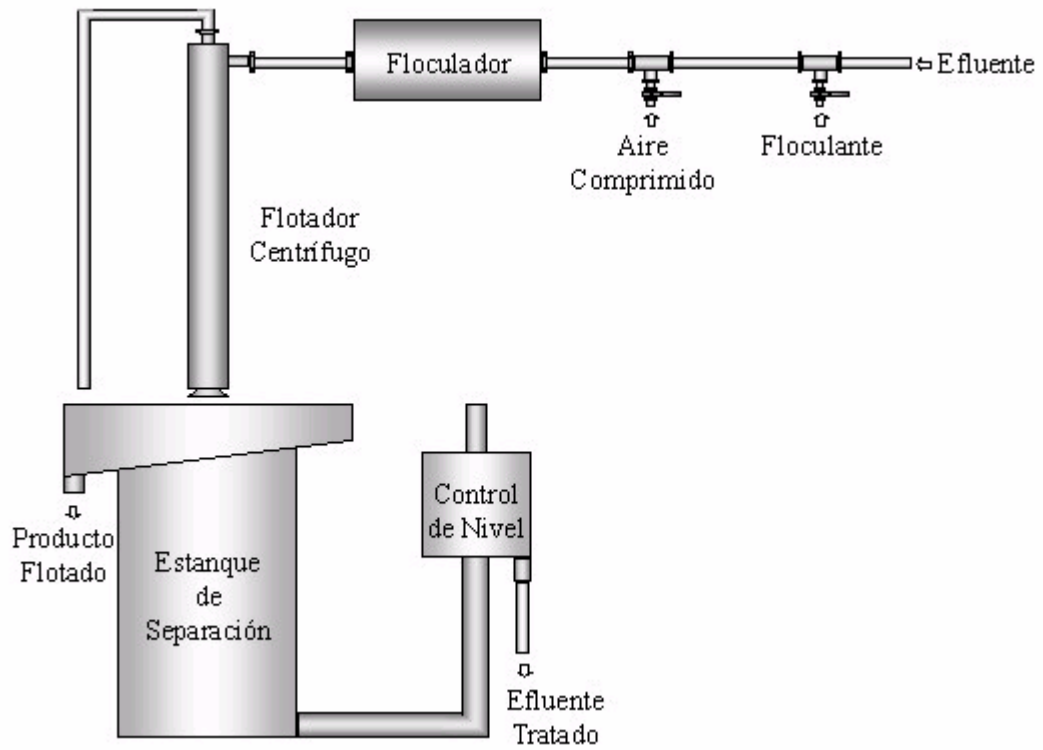
*Fuente: "DEPURAÇÃO DE ÁGUAS OLEOSAS POR FLOTAÇÃO A JATO", F. Capponi y J. Rubio. Modificado por la autora.

Figura 20. Columna de flotación – LTM - UFRGS.



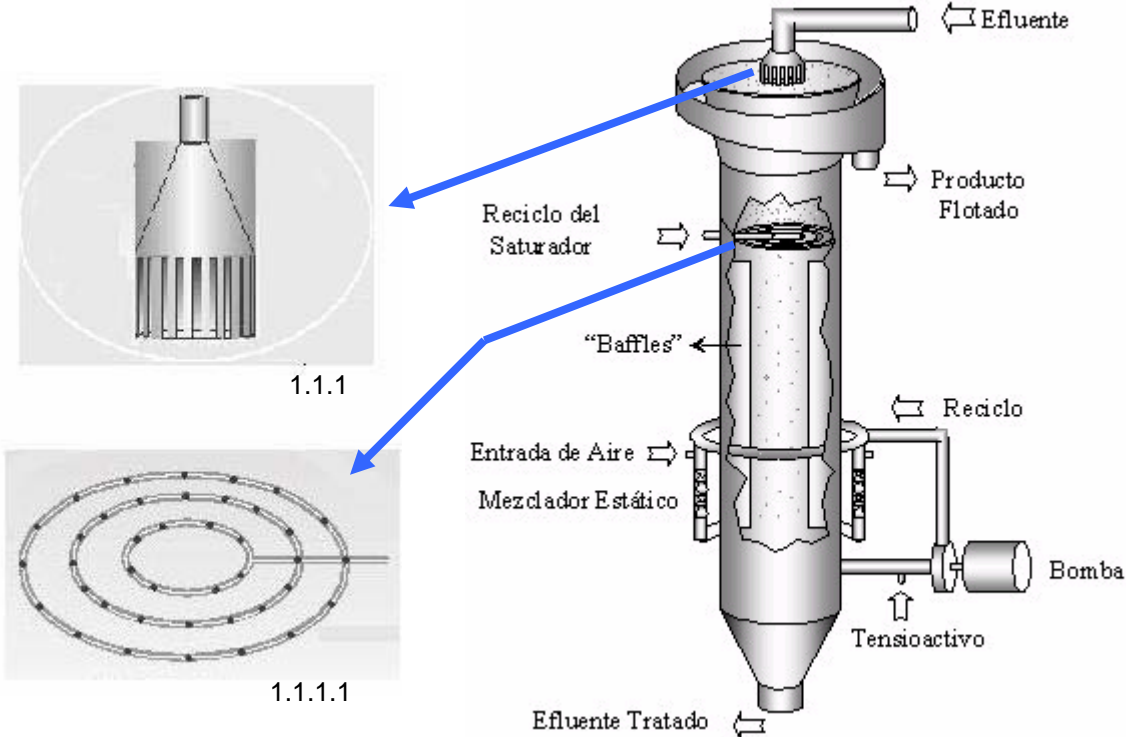
*Fuente: "Flotación como proceso de remoción de contaminantes. iii. Nuevas técnicas y equipos.", Da Rosa, J., M. Santander, M. L. Souza y J. Rubio.

Figura 21. Sistema FF: Floculación – Flotación.



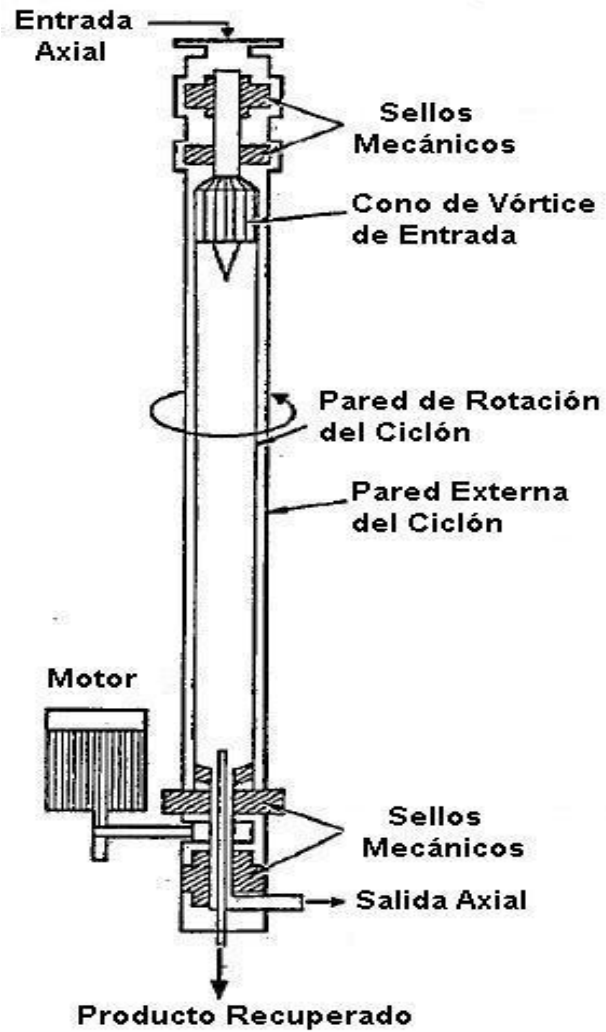
*Fuente: "Flotación como proceso de remoción de contaminantes. iii. Nuevas técnicas y equipos.", Da Rosa, J., M. Santander, M. L. Souza y J. Rubio.

Figura 22. Celda “multiburbujas” o con mezcla de burbujas medianas y microburbujas.



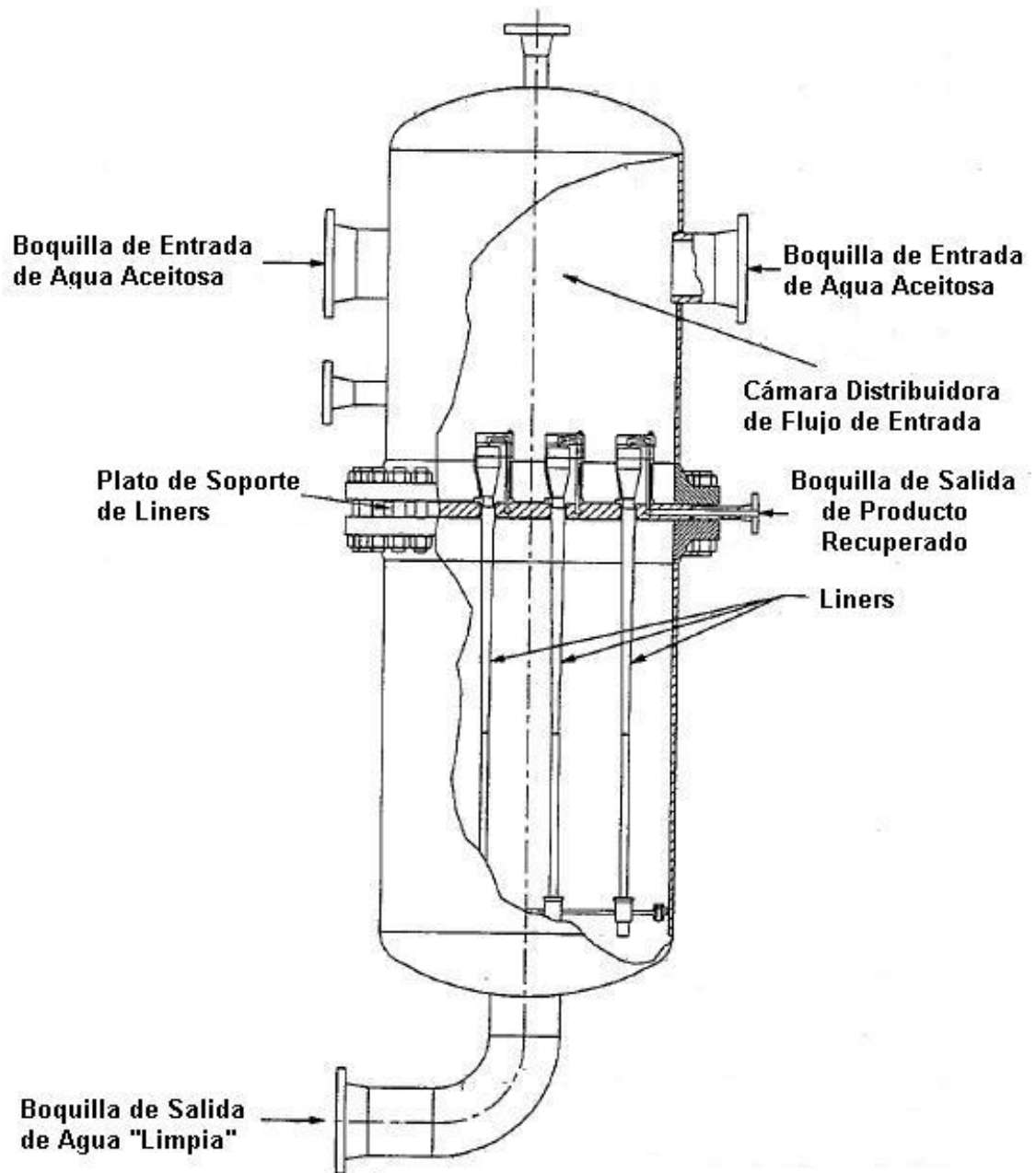
*Fuente: "UNCONVENTIONAL FLOCCULATION AND FLOTATION TECHNIQUES", J. Rubio. Modificado por la autora.

Figura 23. Hidrociclón Dinámico.



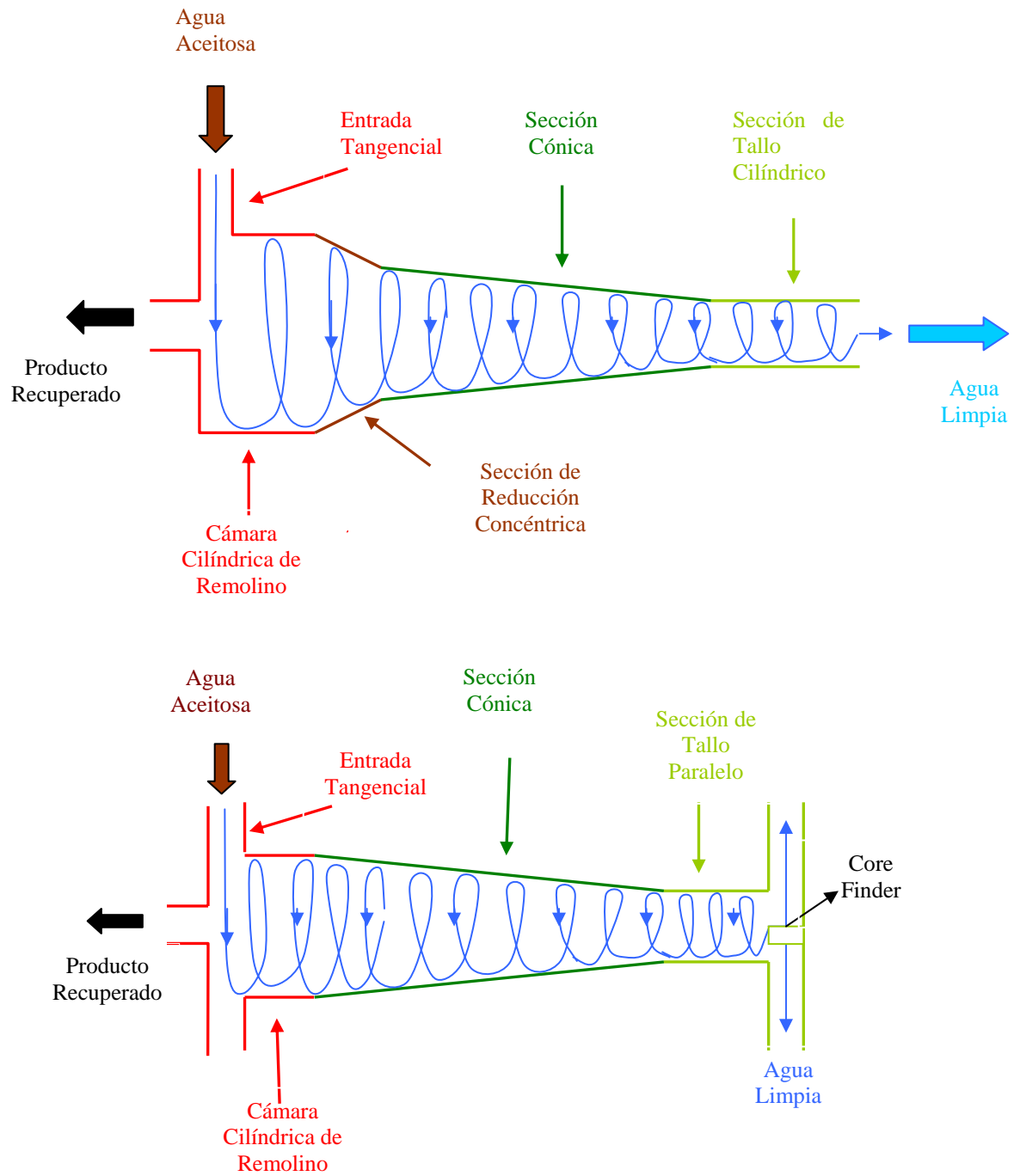
*Fuente: A FIELD COMPARISON OF STATIC AND DYNAMIC HYDROCYCLONE, Jones P.S.

Figura 24. Hidrociclón Estático.



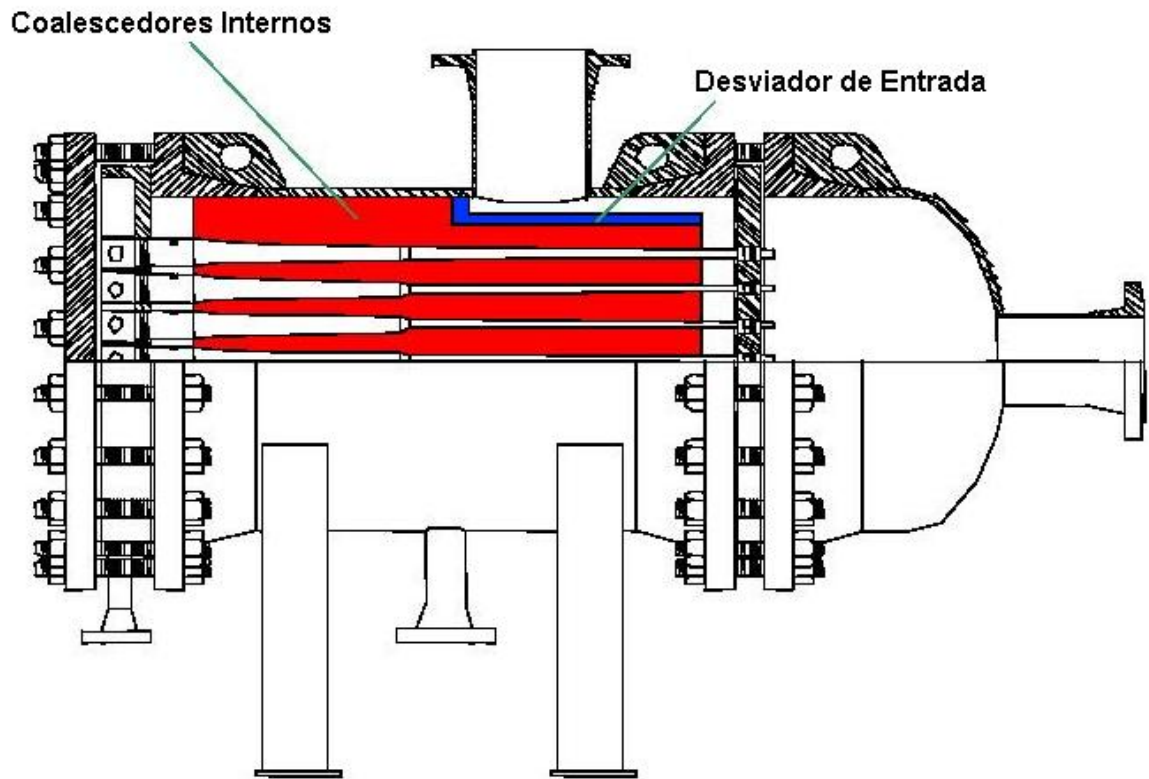
***Fuente:** HYDROCYCLONE SEPARATION: A PREFERRED MEANS OF WATER SEPARATION AND HANDLING IN. OILFIELD PRODUCTION, Stroder S. M. y E. E. Wolfenberger.

Figura 25. Partes del Hidrociclón Estático. a) Hidrociclón de 4 partes. b) Hidrociclón de 3 partes.



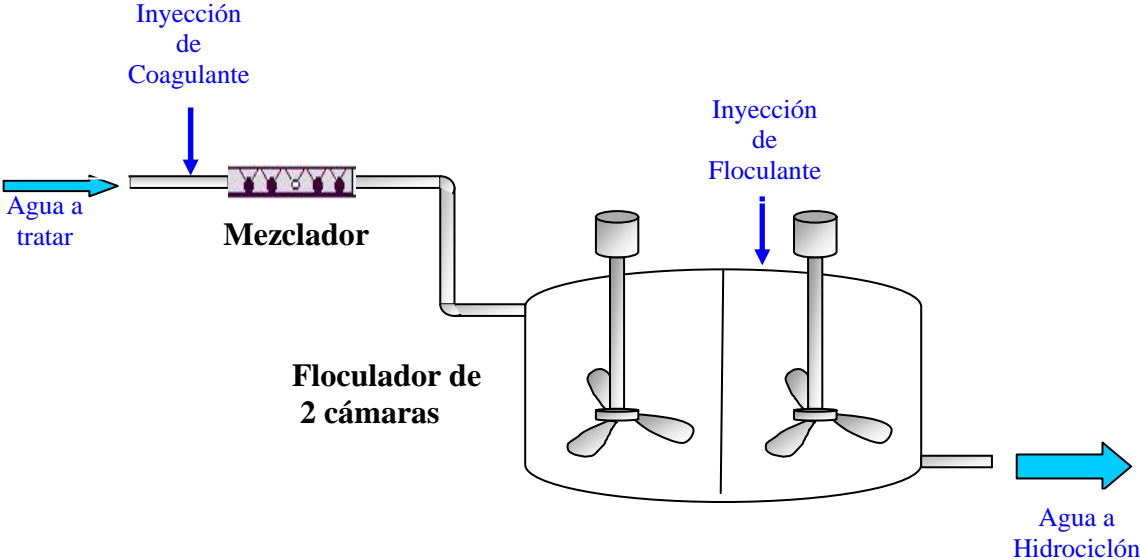
*Fuente: La autora.

Figura 26. Técnica de pre-coalescencia, PECT-F.



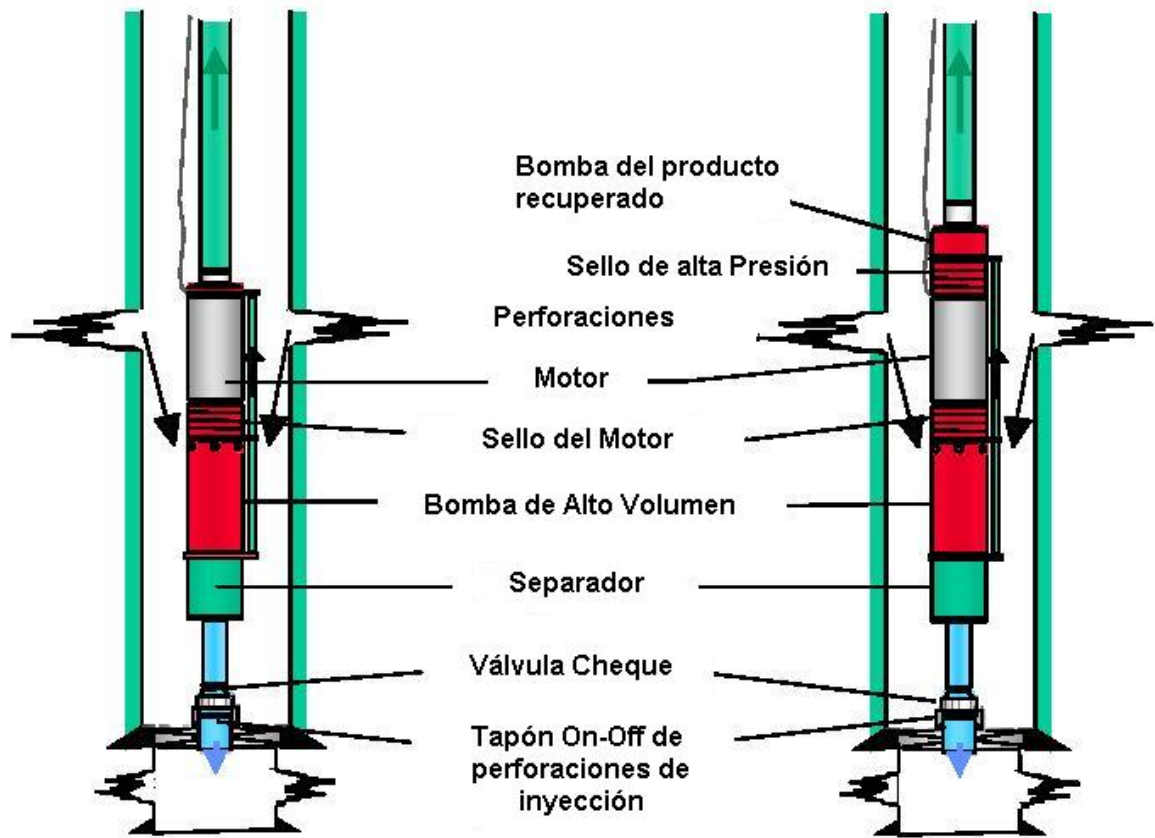
*Fuente: ENHANCED DEOILING HYDROCYCLONE PERFORMANCE WITHOUT RESORTING TO CHEMICALS, Sinker A. B., Humphris M. y N. Wayth.

Figura 27. Proceso Hydroflok.



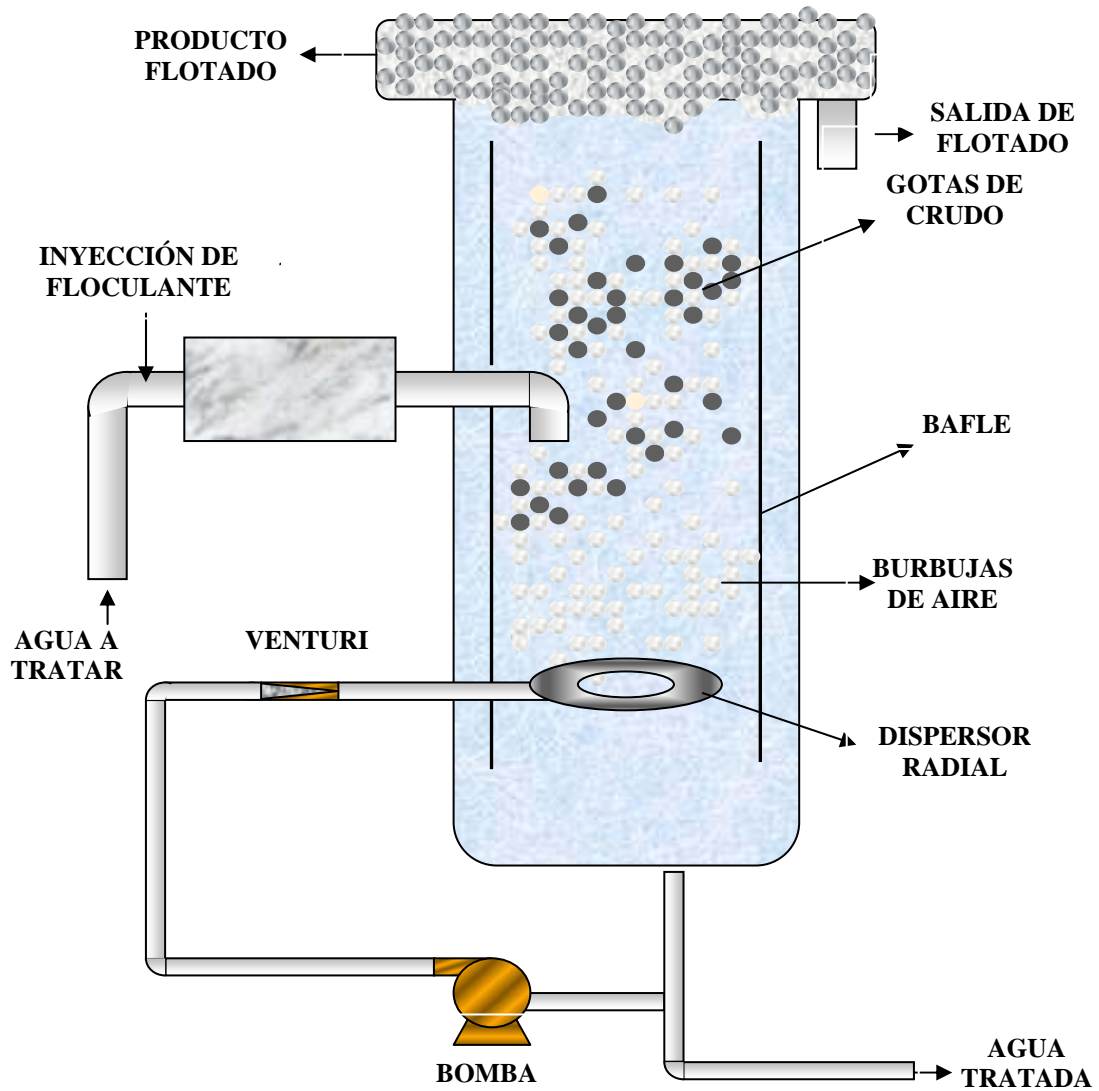
*Fuente: La autora.

Figura 28. Diseños de Sistemas DOWS con un equipo BES.



*Fuente: DOWNHOLE OIL/WATER SEPARATORS: AN EMERGING PRODUCED WATER DISPOSAL TECHNOLOGY, Veil J. A., Langhus B. G. y S. Belieu.

Figura 29. Celda Columna Propuesta.



*Fuente: La autora.

Tabla 1. Recientes estudios de Flotación de Partículas Absorbentes, FPA.

<i>Estudios reportados de flotación de partículas adsorbentes (FPA)</i>		
<i>Material sorbente</i>	<i>Contaminantes</i>	<i>Autores</i>
<i>Relaves de carbón</i>	Ni, Cu, Zn, Pb, Cd, Cr, aceites	Féris et. al., 1997, Rubio, 2000
<i>Zeolitas</i>	Ni, Cu, Zn	Rubio and Tessele, 1997
<i>Zeolitas</i>	Hg, As, Se	Tessele et al., 1997
<i>Pirita</i>	Cu, As	Zouboulis et. al., 1992, 1993
<i>Lama roja, residuo del proceso Bayer</i>	Cu	Zouboulis et. al., 1993
<i>Dolomita</i>	Pb	Zouboulis et. al., 1993
<i>Ceniza volante</i>	Ni	Zouboulis et. al., 1993
<i>Resina de intercambio iónico</i>	Cu	Duyvesteyn and Doyle, 1995
<i>Hidroxiapatita</i>	Cd	Zouboulis et. al., 1997
<i>Carbón activado</i>	Dye (Rodamine B)	Féris et al. 1999
<i>Barita</i>	Aceite emulsionado	Santander and Rubio, 1998
<i>Arcilla (hidrotalcite)</i>	Iones Cromatos, Cr+6	Lazaridis et. al., 2001

*Fuente: "Flotación como proceso de remoción de contaminantes. iii. nuevas técnicas y equipos.", Da Rosa, J., M. Santander, M. L. Souza y J. Rubio.

Tabla 2. Desempeño de los DOWS tipo hidrociclón en los pozos instalados

Compañía Operadora	Nombre del pozo	Campo	Estado/ Provincia	Producción de Aceite antes [BPD]	Producción de Agua antes [BPD]	Producción de Aceite después [BPD]	Producción de Agua después [BPD]	% Incremento de Aceite	% Disminución de Agua
Imperial Redwater	Imperial Redwater #1-26	Redwater	Alberta	19	1780	24	59	26	97
Pinnacle-Alliance	Pinnacle-Alliance 7C2	Alliance	Alberta	44	380	100	95	127	75
Pinnacle-Alliance	Pinnacle-Alliance 06D	Alliance	Alberta	25	820	100	160	300	80
Pinnacle-Alliance	Pinnacle-Alliance 07C	Alliance	Alberta	38	1200	37	220	-3	82
PanCanadian	PanCanadian 00/11C-05	Provost	Alberta	21	690	17		.19	
PanCanadian	PanCanadian 00/11A2-05	Provost	Alberta	34	979	14		.69	
PanCanadian	PanCanadian 00/16-05	Provost	Alberta	9,4	546	16		.70	
PanCanadian	PanCanadian 00/02-09	Bashaw	Alberta	13	428	164	239	1162	44
Talisman Energy				6	629	39	21	550	97
Anderson	Anderson 08-17	Swan Hills Unidad #1	Alberta	176	3648	264	264	60	93
Talisman Energy	Creelman 3c7-12/dB	Creelman	Saskatchewan	113	2516	277	126	145	95
CHEVRON	Fee 153X	Rangely	Colorado	45	1400	32	500	.29	64
Wascana	Wascana B7-27	South Success	Saskatchewan	76	2450	0	380	cerrado	84
Talisman Energy	Handsworth 4dB-161d6	Handsworth	Saskatchewan	88	1700	50	189	.43	89
Marathon Etah	Marathon Etah #7	Garland	Wyoming	70	4000	78	320	11	92
Gulf Canada	Gulf Canada 02/12-01	Fen-Big Valley	Alberta	21	1038	117	217	457	79
Tri-link Resources	Bender 9-30	Bender	Saskatchewan	35	976	35	227	0	77
Talisman Energy	Handsworth 2D5-131C7	Handsworth	Saskatchewan	63	1260	38	63	.40	95
Santa Fe Energy Jones	Canyon 4-#2	Indian Basin	New Mexico	100	3000				
CHEVRON	HSA #1107	Wickett	Texas						
PanCanadian	PanCanadian 00/07-09 Bashaw	Bashaw	Alberta	19	352	62	250	226	29

*Fuente: DOWNHOLE OIL/WATER SEPARATORS: AN EMERGING PRODUCED WATER DISPOSAL TECHNOLOGY, Veil J. A., Langhus B. G. y S. Belieu.

Tabla 3. Desempeño de los DOWS tipo separador por gravedad en los pozos instalados.

Compañía Operadora	Nombre del pozo	Campo	Estado/ Provincia	Producción de Aceite antes [BPD]	Producción de Agua antes [BPD]	Producción de Aceite después [BPD]	Producción de Agua después [BPD]	% Incremento de Aceite	% Disminución de Agua
TEXACO	Dickson #17	East Texas	Texas	3	184	10	126	233	32
TEXACO	SU 1040	Levelland	Texas						
Talisman Energy	Tidewater Parkman 4-27	Parkman	Saskatchewan	16	252	33	139	106	45
TEXACO	Salem #85-40	Salern	Illinois	6	655	6	150	0	77
CHEVRON	Shepard #65	East Texas	Texas	7	269	16.5	127	136	53
TEXACO	RMOTC 77 Ax20	RMOTC	Wyoming	5	190	10	38	100	80
Talisman Energy	Hayter	Chatwin	Alberta	25	250	32	25	28	90
Richland	Parkman 1-17	Parkman	Saskatchewan	20	220	15	190	-25	14
CHEVRON	PNB 14-20	Draiton Valley	Alberta	75	517	84	14	12	97
Talisman Energy	South Sturgeon	Grande Prairie	Alberta	27	932	26	179	-4	81
Petro-Canada	Utik 13-21	Utikama	Alberta	8	451	10	63		86
TEXACO	Ingram	East Texas	Texas	15		26	150	73	
Tristar		Sylvan Lake	Alberta	35	403		57		86
Southward	Southward 11-13	Carlile	Saskatchewan	24.5	458	16		-35	
Petro-Canada	E4-10-16	Bellshill-Lake	Alberta	30	470	38	61	27	87
Crestar Energy	Ranchman Sylvan Lake 00/08	Sylvan Lake	Alberta	35	315	2	54	-92	83

*Fuente: DOWNHOLE OIL/WATER SEPARATORS: AN EMERGING PRODUCED WATER DISPOSAL TECHNOLOGY, Veil J. A., Langhus B. G. y S. Belieu.