

**VIABILIDAD TÉCNICA Y ECONÓMICA EN LA IMPLEMENTACIÓN DE OTRAS
ALTERNATIVAS DE FILTRADO PARA EL TRATAMIENTO DE SALMUERAS Y
AGUAS DE PRODUCCIÓN**

WILLIAM ANDRÉS AGUDELO ROSADO

SERGIO ENRIQUE MILLAN RANGEL

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

2015

**VIABILIDAD TÉCNICA Y ECONÓMICA EN LA IMPLEMENTACIÓN DE OTRAS
ALTERNATIVAS DE FILTRADO PARA EL TRATAMIENTO DE SALMUERAS Y
AGUAS DE PRODUCCIÓN**

WILLIAM ANDRÉS AGUDELO ROSADO

SERGIO ENRIQUE MILLAN RANGEL

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

DIRECTOR

OSCAR FERNANDO LOPEZ SILVA

Ingeniero de Petróleos

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICO-QUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA DE PETROLEOS
BUCARAMANGA**

2015

DEDICATORIA

Primero que todo darle gracias a dios todopoderoso, que sin el nada de esto hubiera sido posible.

Hay dos personas muy especiales que me dieron la oportunidad de estudiar y salir adelante, mis padres Carlos Enrique Millan Martínez y Flor María Rangel Guerrero; sin ellos no podría estar dando agradecimientos por este logro. La fuerza que mi padre me da desde el cielo es inmensa y alimenta mi espíritu cada día, minuto y segundo que transcurre en mi vida, mi madre es la artífice de que haya podido culminar mis estudios y gracias a su apoyo incondicional le dedico mi título en honor a su labor como padre, madre, amiga, confidente y compañera fiel en todas las facetas que he tenido.

Gracias a mis hermanos, Carlos Arturo Gómez Rangel, un gran consejero y amigo, Andrés Fernando Millan Rangel quien es la estampa de mi padre y lo amo con todo mi corazón; a ellos les doy gracias por apoyarme en las decisiones que he tomado; son parte esencial de mi vida.

Mis hijos Carlos Enrique Millan Millan, María Isabella Millan Millan y mi señora Maira Lilitiana Millan Ardila, son el motor de mi existencia; gracias a ellos comprendí lo difícil que es la labor de ser padre y ahora me siento más preparado que nunca para afrontar los retos que se atraviesen en mi camino. Los amo con todas las fuerzas de mi corazón. Por ellos me esforcé cada día en mis estudios y ahora que culmino, el fruto de mis esfuerzos será para ellos.

Por último y no menos importante agradecer a todos mis amigos que estuvieron incondicionales en el transcurso de mi carrera; alejo, batí, Galindo, Danna, Víctor, charalà y el resto de compañeros; gracias por estar siempre en las buenas y en las malas, los estimo mucho.

SERGIO ENRIQUE MILLAN RANGEL

DEDICATORIA

Tú, Dios bendito que todo lo puedes! Pongo en tus manos mis triunfos y derrotas. Y por ello a ti te dedico esta etapa tan importante que termina y espero sea el comienzo de miles de bendiciones, pero ante todo me des fortaleza en los momentos donde mis fuerzas fallen y a su vez, me ayudes a ser cada día más y mejor persona.

A mis padres Martha y William, sin ustedes nada de esto sería posible. Viviré agradecido con ustedes por todo lo que han hecho por mí. Ojalá la vida me alcance para responderle una parte del cariño y esfuerzo dedicado para ayudarme a crecer.

A mi manita Vivian, Abuela Dilia, tíos y demás familiares por estar siempre a mi lado y apoyarme en todo este proceso. Ustedes fueron testigos directos de mi lucha; Infinitas gracias por ello. El amor hacia ustedes es una fuente inagotable.

Por último, he tenido claro que la vida sigue su curso: los años pasan y las etapas se van quemando; pero lo único que queda son esas personas que algún día conoces en el camino y te acompañan en los procesos; esas personas que se llaman amigos. Amigos que llegan a convertirse en hermanos. A ellos les agradezco todo este cúmulo de experiencias vividas y su aporte para que todo esto sea posible.

WILLIAM AGUDELO ROSADO

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN.....	16
1. GENERALIDADES DEL AGUA DE PRODUCCIÓN	17
1.1 AGUA DE PRODUCCIÓN.....	18
1.2 SALMUERAS	20
1.3 PRINCIPALES CARACTERÍSTICAS FISICOQUIMICAS DEL AGUA.....	22
1.4 SÓLIDOS Y ACEITES EN EL AGUA	29
2. SISTEMAS Y EQUIPOS PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS DE PRODUCCIÓN	32
2.1 PRINCIPIOS DE SEPARACIÓN	33
2.2 EQUIPOS PARA EL TRATAMIENTO DE AGUA	38
3. UNIDADES DE FILTRACIÓN	50
3.1 MECANISMOS DE SEPARACIÓN.....	51
3.2 TIPOS DE FILTROS.....	54
3.3 CLASIFICACIÓN SEGÚN SU REMOCIÓN.....	58
3.4 CONSIDERACIONES IMPORTANTES AL ELEGIR UN FILTRO	61
3.5 FILTROS EXISTENTES EN LA INDUSTRIA.	69
4. USO DE OTRAS ALTERNATIVAS DE FILTRADO.....	117
4.1 ALTERNATIVA 1: TIERRA DE DIATOMEAS.....	118
4.2 ALTERNATIVA 2: CÁSCARA DE NUEZ	122
4.3 ALTERNATIVA 3: CASCARILLA DE PALMA AFRICANA.....	126

5. VIABILIDAD TÉCNICA Y ECONÓMICA	132
5.1 FASE EXPERIMENTAL	133
5.2 ANÁLISIS TÉCNICO	144
5.3 ANÁLISIS ECONÓMICO	154
6. CONCLUSIONES	158
7. RECOMENDACIONES.....	159
BIBLIOGRAFÍA.....	160

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Ciclo del agua	19
Figura 2. Agua buena y agua mala.....	20
Figura 3. Skim tank	40
Figura 4. Skim tank horizontal.....	40
Figura 5. Esquema de una caja API y sus secciones.....	42
Figura 6. Esquema de un interceptor de platinas paralelas.....	43
Figura 7. Esquema del flujo a través de un coalescedor de placas corrugadas. ...	44
Figura 8. Separador de flujo transversal o cruzado.	44
Figura 9. Descripción de un equipo de flotación.....	46
Figura 10. Hidrociclón.....	47
Figura 11. Esquema de un decantador.....	49
Figura 12. Mecanismos de separación.....	53
Figura 13. Diferentes tipos de mallas para el filtrado.....	57
Figura 14. Filtro de operación por gravedad.....	70
Figura 15. Esquema filtro de cartuchos.....	73
Figura 16. Filtro de medio granular.....	76
Figura 17. Operación del filtro DE.....	80
Figura 18. Filtros con cáscara de nuez marca Hydromation.....	85
Figura 19. Cáscara de nuez utilizada por los filtros Sabian.....	89
Figura 20. Filtro marca SFX.....	92
Figura 21. Filtro SFX de único flujo.....	93
Figura 22. Filtro de doble flujo DFX	95
Figura 23. Filtro doble de flujo vertical VFX.....	97
Figura 24. Filtros bicapa y tricapa.....	105
Figura 25. Configuración del filtro Filtraflo.....	108
Figura 26. Filtro marca Biostyr.....	110

Figura 27. Filtro marca Biosep.....	112
Figura 28. Filtro Enviro-Shell.....	117
Figura 29. Vista microscópica de la diatomita.....	118
Figura 30. Materiales utilizados	136
Figura 31. Equipos utilizados en el proyecto.	137
Figura 32. Configuración alternativa 1	138
Figura 33. Funcionamiento de esquema alternativa 1.	139
Figura 34. Formación de torta de arena diatomea.	140
Figura 35. Parámetros de operación y diseño para un filtro DE típico.....	141
Figura 36. Configuración alternativa 2	142
Figura 37. Esquema de trabajo alternativa 2.	142
Figura 38. Típica operación y parámetros de diseño específicos de un filtro aguas-abajo.....	143
Figura 39. Lechos filtrantes alternativa 2 y 3	144
Figura 40. Toma de muestras después del filtrado.....	145
Figura 41. Eficiencia de remoción de sólidos.....	150
Figura 42. Eficiencia de remoción de aceites.....	151

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Comparación entre el valor de Beta y el porcentaje de eficiencia de remoción.	61
Tabla 2. Especificaciones de diseño filtro presurizado de arena de bajo caudal. ...	82
Tabla 3. Producción mundial del fruto de Nuez.	123
Tabla 4. Características del cultivo de palma africana.	130
Tabla 5. Composición mineralógica y características generales de la arena diatomea para la práctica.	134
Tabla 6. Características físicas de las muestras.	135
Tabla 7. Resultados alternativa 1: Tierra de Diatomeas.	147
Tabla 8. Resultados alternativa 2: Cascara de Nuez.	148
Tabla 9. Resultados alternativa 3: Cascarilla de Palma Africana.	149
Tabla 10. Criterios y condiciones para elección de la tecnología adecuada.	153
Tabla 11. Presupuesto y costos materia prima en Colombia.	154
Tabla 12. Costos de construcción de un equipo de filtración en Colombia.	155
Tabla 13. Análisis económico	156

RESUMEN

TÍTULO: VIABILIDAD TÉCNICA Y ECONÓMICA EN LA IMPLEMENTACIÓN DE OTRAS ALTERNATIVAS DE FILTRADO PARA EL TRATAMIENTO DE SALMUERAS Y AGUAS DE PRODUCCIÓN.

AUTORES: WILLIAM ANDRÉS AGUDELO ROSADO**
SERGIO ENRIQUE MILLAN RANGEL**

PALABRAS CLAVES: FILTRACIÓN, AGUAS DE PRODUCCIÓN, SALMUERAS.

La extracción y producción de hidrocarburos está ligada al manejo de grandes cantidades de agua producto de la actividad petrolera. El manejo y tratamiento de estas aguas son de suma importancia a la hora de disponer su uso último sin olvidar el cuidado y las normas que velan por el sostenimiento amigable del medio ambiente.

En la búsqueda de preservar el medio ambiente circundante surge la necesidad de explorar dispositivos o equipos útiles, a un bajo costo y una alta eficiencia de trabajo, para el tratamiento de las aguas producto de la actividad sin alterar o causar el mínimo impacto posible al medio ambiente.

Este trabajo está basado en determinar la viabilidad en el uso o implementación de materiales filtrantes vegetales (Cascarilla de palma africana y Cáscara de Nuez) e inorgánicos (Arena Diatomea) en la fabricación de equipos de filtración para el tratamiento de aguas de producción y salmueras en campos de crudo. Para ello fue necesario reproducir las condiciones de operación a escala de laboratorio de un equipo de filtración, para posteriormente monitorear el comportamiento de cada uno de las alternativas planteadas.

Los equipos de filtración ofertados actualmente son equipos importados generando un alto costo económico. Los materiales filtrantes utilizados en este proyecto son productos Colombianos que tienen como objetivo abaratar los costos de fabricación de los dispositivos de filtrado, y corroborar que tenga la misma eficiencia de trabajo que los equipos extranjeros.

* Proyecto de Grado

** Facultad de ingenierías Físicoquímicas. Ingeniería de Petróleos. Director: Ing. Oscar Fernando López Silva.

ABSTRACT

TITLE: TECHNICAL AND ECONOMIC VIABILITY IN THE IMPLEMENTATION OF ALTERNATIVES FILTER FOR THE TREATMENT OF WATER PRODUCTION AND BRINES.*

AUTHORS: WILLIAM ANDRÉS AGUDELO ROSADO**
SERGIO ENRIQUE MILLAN RANGEL**

KEYWORDS: FILTRATION, WATER PRODUCTION, BRINES.

The extraction and production of hydrocarbons is linked to the managing of big quantities of water product of the petroleum industry. The managing and treatment of these waters perform supreme importance at the moment of arranging its last use without forgetting the care and standards that ensure the sustainability of the friendly environment.

In seeking to preserve the surrounding environment arises the need to explore devices or equipment useful, at a low cost and high working efficiency, for the treatment of water product activity without altering or causing minimal impact to the environment.

This work is based on determining the feasibility in the use or implementation of plant inorganic filter materials (husk of African palm and Nutshell) and inorganics (earth Diatomaceous) in the manufacture of filtration equipment for the treatment of produced water and brines oil fields. It was necessary to reproduce the conditions of laboratory-scale operation of filtration equipment, later to monitor the behavior of each of the alternatives proposed.

The equipments of filtration offered nowadays are imported equipments generating a high economic cost. The filtering materials used in this project are Colombian products that aim to reduce the cost of the manufacture of filtering devices, and corroborate so that they have the same efficiency of work as foreign equipment.

* Graduation Project

** Faculty of Physical-Chemical Engineering. Petroleum Engineering. Directed by Ing. Oscar Fernando López Silva.

INTRODUCCIÓN

Los campos de petróleo en el mundo están permanentemente en actividad; Producto de esta actividad se generan residuos que pueden ser potencialmente tóxicos para la humanidad y el medio ambiente. Las aguas de producción y salmueras representan en gran medida, los desechos a tratar en la industria de hidrocarburos para poder mitigar los efectos negativos que producirían si no se dispone de un adecuado sistema de tratamiento para su posterior uso: consumo doméstico, potabilidad del agua, riego agroindustrial, reinyección, etc.

En la actualidad, el desarrollo y uso de nuevas tecnologías están enfocados en reducir considerablemente los costos de operación y mejorar la eficiencia de los equipos con otras alternativas de filtrado para el tratamiento de residuos producto de la producción de hidrocarburos. También se tiene en cuenta el respeto por el medio ambiente y el estricto cumplimiento de la ley.

A través de este trabajo se busca fundamentalmente conocer las principales características y alternativas disponibles en Colombia para el filtrado de agua de producción y salmueras; con el fin de disminuir los costos de fabricación y su uso en la industria de hidrocarburos teniendo en cuenta la sana interacción con el medio ambiente y el cumplimiento de las normas vigentes para la disposición final de los recursos hídricos.

1. GENERALIDADES DEL AGUA DE PRODUCCIÓN

La generación de aguas residuales es una actividad humana inevitable. El tratamiento y disposición apropiada de estas supone el conocimiento de las características físicas, químicas y biológicas y de sus principales efectos sobre la fuente receptora.¹

El agua que se produce durante la explotación de un yacimiento es uno de los problemas más frecuentes de la industria petrolera y genera los costos más altos debido al tratamiento requerido para cumplir con la normatividad. Si se tiene en cuenta que la producción mundial de agua es aproximadamente 210 millones de barriles por día que acompañan a los 84 millones de barriles por día de petróleo, se podría decir que muchas compañías se han convertido prácticamente en empresas productoras de agua.²

El agua que resulta del tratamiento de la producción de un campo petrolero debe ser tratada antes de ser dispuesta. Entre los métodos de disposición más comunes se pueden mencionar: la reinyección en procesos de recuperación secundaria o el vertimiento a las corrientes de agua natural, en cualquiera de las dos situaciones el agua residual debe ser tratada de manera que cumpla con cada fin específico.³

Las soluciones de manejo de la producción de agua se centran en última instancia en la economía y el costo directo del manejo de agua. Los costos relacionados con el tratamiento y la eliminación del agua en la superficie varían drásticamente.

¹ JAIMES, Diana y PICO, María. Diseño de la planta de tratamiento de aguas residuales y de producción evaluando las diferentes alternativas nacionales y extranjeras-aplicación Campo Colorado, 2009. 228 p.

² SECRETARIA DE ENERGÍA. Prospectiva del mercado de petróleo crudo 2010-2015, Gobierno Federal 2011, México.

³ JAIMES, Diana y PICO, María. Diseño de la planta de tratamiento de aguas residuales y de producción evaluando las diferentes alternativas nacionales y extranjeras-aplicación Campo Colorado, 2009. 228 p.

1.1 AGUA DE PRODUCCIÓN

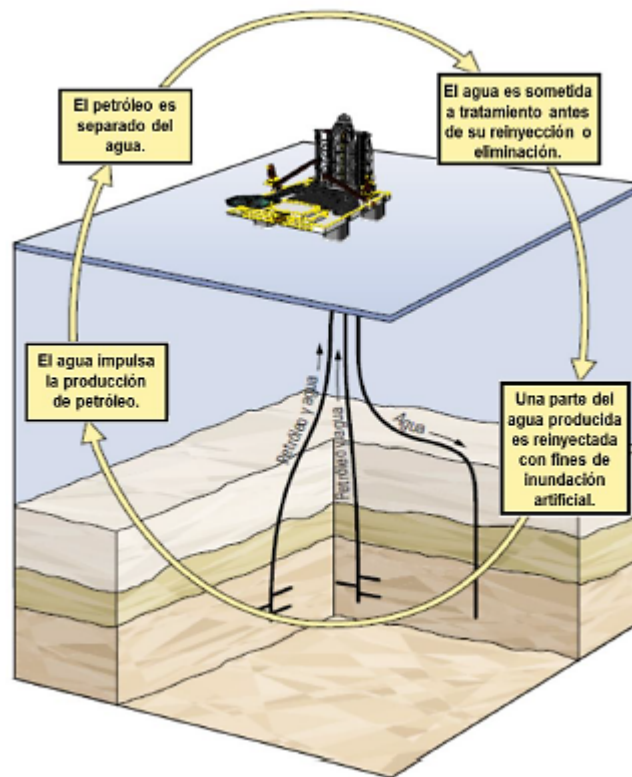
Se define como el agua obtenida en superficie a través de pozos de petróleo y/o gas desde una formación de interés, un acuífero activo o un proyecto de inyección de agua acompañada de los químicos inyectados previos a la inyección o tratamiento. Esta agua presenta características químicas similares a la formación y a los hidrocarburos debido a la exposición por periodos de tiempos prolongados.

Hoy en día, las compañías petroleras producen un promedio de tres barriles de agua por cada barril de petróleo que extraen de los yacimientos agotados. Se gastan más de 40 mil millones de dólares por año para hacer frente a los problemas del agua indeseada. En muchos casos, las tecnologías innovadoras para el control del agua pueden significar una reducción de los costos y un aumento en la producción de hidrocarburos.⁴

El agua afecta todas las etapas de la vida del campo petrolero, desde la exploración hasta el abandono del campo, pasando por el desarrollo y la producción del mismo. Cuando se produce petróleo de un yacimiento, en algún momento del tiempo el agua proveniente de un acuífero cercano o de los pozos inyectores se mezcla y es producida junto con el hidrocarburo. La figura 1 muestra el camino recorrido por el agua que invade la tubería de producción y las instalaciones de procesamiento en la superficie y, finalmente, se extrae y se desecha, o se reinyecta para el mantenimiento de presión conocido como ciclo del agua.

⁴ BAILEY, Bill. CRABTREE, Mike. TYRIE, Jeb. Et al. Control del agua. En: Oilfield review Schuemberger, verano de 2000.

Figura 1. Ciclo del agua



Fuente: ARNOLD, Richardi. BURNETT, David. ELPIHICK, Jon. Manejo de la producción de agua: De residuo a recurso. Oilfield review Schulerberger (Modificado).

Si bien es cierto que ningún operador quiere producir agua; hay aguas que son mejores que otras. Con respecto a la producción de crudo, a continuación se mencionan las tres más importantes:

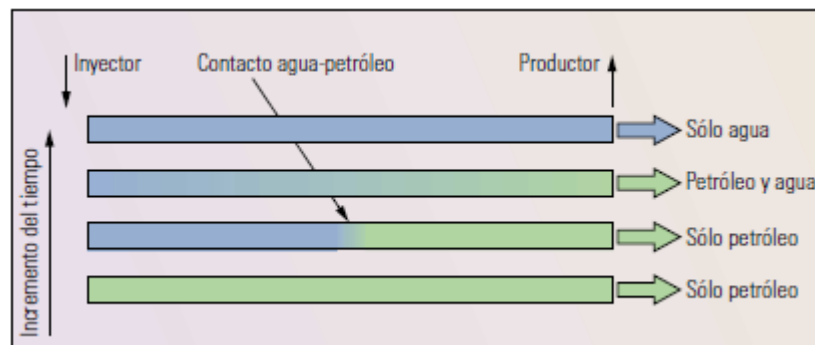
Agua de barrido: Proviene de un pozo inyector o de un acuífero activo que contribuye al barrido del petróleo del yacimiento. El manejo de este tipo de agua es una parte fundamental del manejo del yacimiento y puede constituir un factor determinante en la productividad de los pozos y de las reservas finales.⁵

⁵ KUCHUK, F. PATRA, SK. NARASIMHAM, JL. RAMANAN, S. Water watching. En: Middle east well evaluation review 22. Noviembre, 1999.

Agua buena: Es el agua producida dentro del yacimiento a una tasa inferior al límite económico de la relación agua/petróleo (RAP). La producción del agua buena tiene lugar cuando existe un flujo simultáneo de petróleo y agua en toda la matriz de la formación. Otra forma de producción de agua aceptable proviene de las líneas de flujo convergentes dentro del yacimiento.

Agua mala. Se puede definir como el agua producida dentro del yacimiento, que no produce petróleo, o bien cuando la producción de petróleo no es suficiente para compensar el costo asociado con el manejo del agua; significa que el agua se produce por encima del límite económico de la relación agua/petróleo (RAP).⁶

Figura 2. Agua buena y agua mala.



Fuente: BAILEY, Bill. CRABTREE, Mike. TYRIE, Jeb. Et al. Control del agua. En: Oilfield review Schlumberger, verano de 2000.

1.2 SALMUERAS

Agua que contiene sales en solución, como sodio, calcio o bromuros. La salmuera se produce comúnmente junto con el petróleo. La eliminación de la salmuera de

⁶ ELPHICK, J. SERIGHT, R. A classification of water problem types. Presentado en: Conferencia internacional anual sobre modificación concordante del yacimiento, cegado del agua y el gas. Houston, 1997.

un campo de petróleo se logra generalmente por medio de la inyección subterránea en formaciones saturadas de agua salina o por evaporación en piletas superficiales. También es utilizada como fluido de control de pozo durante las fases de terminación y reparación de las operaciones de pozos. Las salmueras están libres de sólidos y no contienen ninguna partícula que pueda taponar o dañar una formación productiva. Por otra parte, las sales de la salmuera pueden inhibir reacciones indeseables en la formación, tales como la dilatación de las arcillas. Las salmueras se formulan y se preparan generalmente para condiciones específicas, existiendo una amplia gama de sales para alcanzar densidades oscilantes entre 1,0 y 2,4 g/cm³ [8,4 y más de 20 lbm/gal (ppg)].

Las salmueras se dividen en 2 categorías: monovalentes y bivalentes:⁷

- **Salmueras monovalentes:** contienen sales que tienen cationes monovalentes; estas sales incluyen el cloruro de sodio, cloruro de potasio, bromuro de potasio, bromuro de sodio, formiato de sodio y formiato de potasio. El bromuro de potasio y el bromuro de sodio son especialmente efectivos en formaciones sensibles al calcio y en formaciones donde el gas dióxido de carbono pueda reaccionar con salmueras de calcio para crear un precipitado de carbonato de calcio.

Las salmueras monovalentes generalmente presentan baja corrosividad, aún a temperaturas mayores de 400°F

- **Salmueras bivalentes:** contienen sales que tienen cationes bivalentes; estas sales incluyen el cloruro de calcio, el bromuro de calcio y el bromuro de zinc. Una salmuera bivalente puede estar compuesta de una sal única o de una mezcla de sales, dependiendo de la densidad de la salmuera requerida y del punto de cristalización. La corrosividad de estas salmueras depende de su densidad y su composición química. Los datos de

⁷ BAROID. Manual de fluidos. Houston, Estados Unidos. 1997, 566 p.

laboratorio demuestran que la adición de cloruro de calcio hace bajar el índice de corrosión, mientras que la adición de bromuro de zinc eleva rápidamente el índice de corrosión.

1.3 PRINCIPALES CARACTERÍSTICAS FISICOQUIMICAS DEL AGUA⁸

Es importante definir cuáles son las características más importantes a tener en cuenta en cualquier programa de vigilancia y monitoreo de calidad de las aguas de producción en la extracción de hidrocarburos. A continuación describiremos tales parámetros.

- **Sabor:** Compuestos químicos presentes en el agua como fenoles, diversos hidrocarburos, cloro, materias orgánicas pueden dar olores y sabores muy fuertes al agua aunque estén en pequeñas concentraciones.
- **Color:** El agua no contaminada suele tener colores rojizos, pardos, amarillentos o verdosos. Las aguas contaminadas pueden tener diversos colores, pero en general no se pueden establecer relaciones claras entre el color y el tipo de contaminación.
- **Olor:** Las aguas residuales tienen un olor característico desagradable, mientras que las aguas residuales sépticas tienen un olor muy ofensivo, generalmente producido por H_2S proveniente de la descomposición anaerobia de los sulfatos o sulfuros. Las aguas industriales residuales tienen a veces, olores característicos específicos del proceso industrial del cual provienen. Los olores de las aguas residuales constituyen una de las

⁸ JAIMES, Diana y PICO, María. Diseño de la planta de tratamiento de aguas residuales y de producción evaluando las diferentes alternativas nacionales y extranjeras-aplicación Campo Colorado, 2009, 228 p.

principales objeciones ambientales y su control en plantas de tratamiento es muy importante. Además del ácido sulfhídrico son causantes de olores ofensivos en aguas residuales los siguientes compuestos: aminas, amoníaco, diaminas, mercaptanos y sulfuros orgánicos.

- **Turbidez:** Es una medida del grado de oscuridad del agua. Indica que el agua no es clara por contener material insoluble tal como sólidos suspendidos, aceite disperso o burbujas de gas. Cuando el agua es muy turbia se puede presentar problemas de taponamiento.

- **Temperatura:** Es un parámetro importante de control por su efecto en la vida acuática y en la aplicabilidad del agua a usos industriales.

- **Sólidos:** Los sólidos pueden ser incorporados al agua por diversas actividades industriales y domésticas. La mayor parte de las partículas presentes en las aguas residuales están en los rangos de $1 \cdot 10^{-7}$ milímetros en adelante. Las partículas sobre 10^{-3} milímetros pueden ser removidas por procesos de sedimentación o filtración, por debajo de estas medida requieren ser removidas por procesos especiales. Por esta razón las pruebas analíticas, son comúnmente divididas en sólidos: sedimentables, suspendidos y disueltos.
 - **Sólidos Sedimentables:** Son aquellos que sedimentan bajo la acción de la gravedad. La determinación se realiza generalmente en un cono Imhoff dejando la muestra en reposo durante una hora. El resultado se reporta en ml/L. esta determinación evalúa la cantidad de sedimento que podría

eventualmente ser lanzada a la fuente receptora; sirve además para dimensionar un sistema de remoción.

- **Sólidos Suspendidos:** Pueden ser orgánicos e inorgánicos. Por lo general son partículas de óxido metálicos de la corrosión, hierro o manganeso presentes originalmente en el agua. Otros sólidos suspendidos pueden ser los sedimentos, arenas, arcillas o cuerpos bacterianos. En la práctica se identifican y se estima su tendencia al taponamiento haciendo uso de un filtro de membrana de 0.45 micras.
- **Sólidos Disueltos:** Se consideran aquellos que pasan a través de la membrana de filtración.
- **pH:** El valor de pH o potencial de hidrógeno es usado en cálculos de dióxido de carbono, sulfuro de hidrógeno y la tendencia a la formación de incrustaciones. Es importante resaltar que la presencia de H_2S y CO_2 disueltos en el agua tienden a disminuir el pH.

Un agua es neutra cuando su valor de pH es igual a 7 @25°C. La mayoría de las aguas en los campos petroleros presentan un pH que oscila entre 4 y 8.

Cuando el pH es mayor de 7, se dice que el agua es básica y entre más elevado es este valor se tiene una tendencia mayor a la incrustación. Cuando el pH es menor de 7, se dice que el agua es ácida y entre más reducido sea el pH aumenta la posibilidad de corrosión. Los valores extremos de pH ya sean altos o bajos limitan la existencia de vida biológica.

- **Alcalinidad:** La alcalinidad en el agua representa su habilidad para neutralizar ácidos. Las principales fuentes de alcalinidad en las aguas naturales son el ion hidróxido, el ion carbonato y el ion bicarbonato. Otros iones como fosfatos, boratos o iones silicatos están presentes en concentraciones muy bajas y por lo tanto no afectan la alcalinidad.

La alcalinidad se divide en alcalinidad P y M. la alcalinidad P es una medida del número de equivalentes ácidos requeridos para bajar el pH del agua a aproximadamente 8,3 y la alcalinidad M para bajar el pH a aproximadamente 4,5.

- **Distribución Del Tamaño De Partículas:** el conocimiento de la distribución del tamaño de partículas puede ser muy útil en la determinación de la selección para la filtración y el filtro.
- **Cationes**⁹: Es la sumatoria de todos los iones con carga positiva presentes en el agua. La concentración de cationes es una medida específica de la salinidad y dureza del agua en la industria petrolera. El alto contenido de cationes impide que el agua sea utilizada para el consumo humano o el ganado.
 - **Calcio:** El ion calcio es uno de los principales contaminantes de las aguas de los campos petroleros y puede presentarse en cantidades tan altas como 30000 mg/l. El ion calcio es de gran importancia debido a que fácilmente combina con los iones sulfatos y carbonatos produciendo incrustaciones de carbonato de calcio CaCO_3 y sulfato de calcio CaSO_4 . También forma sólidos suspendidos.

⁹ MANCILLA, Robinson; MESA, Henry. Metodología para el manejo de aguas de producción en un campo petrolero, página 51. 2012, p. 51

- **Magnesio:** El ion magnesio usualmente está presente en concentraciones más bajas que el calcio. Sin embargo, el problema resultante es el mismo que con el calcio.

- **Sodio:** Es el mayor constituyentes de las aguas de los campos, pero normalmente no causa ningún problema, con la única excepción de la precipitación de NaCl desde salmueras extremadamente saladas.

- **Hierro:** Su presencia en las aguas de inyección indica por lo general corrosión. El hierro puede estar presente en solución como ion férrico (Fe⁺) o ion ferroso (Fe⁺⁺) o en suspensión como un compuesto de hierro precipitado. El conteo del hierro se usa frecuentemente para controlar y monitorear la corrosión, los óxidos forman recubrimientos adherentes y pueden causar fallas en la tubería debido al sobrecalentamiento y deformación cáustica. Es importante resaltar que el contenido de normal de hierro en aguas de formación es bastante bajo.

- **Bario:** Al combinarse con el ion sulfato forman el sulfato de Bario BaSO₄, el cual es extremadamente insoluble y genera graves problemas por la dificultad de ser removido.

- **Estroncio:** El ion estroncio puede combinarse con el ion sulfato para formar sulfato de estroncio insoluble; aunque es

más soluble que el del bario. Generalmente se encuentra mezclado en las incrustaciones con sulfato de Bario.

- **Aniones:** Son iones con carga negativa presentes en el agua. La concentración de cloruros es una medida específica de la salinidad del agua en la industria petrolera. El alto contenido de cloruros impide que el agua sea utilizada para el consumo humano o el ganado. Altos porcentajes de cloruros en los cuerpos de agua también pueden matar a la vegetación circundante.¹⁰

- **Cloro:** El ion cloruro es el principal constituyente de las aguas de los campos petroleros y las aguas frescas. La mayor fuente de los iones cloruros es el NaCl, por lo tanto este ion es utilizado para medir la salinidad del agua. Según su concentración se puede clasificar de la siguiente manera¹¹:

⇒ Agua dulce: 0-2000 ppm

⇒ Agua salobre: 2000-5000 ppm

⇒ Agua salada: 5000-40000 ppm

⇒ Salmuera: >40000 ppm

El principal problema asociado con el ion cloruro es el incremento de la corrosividad a medida que la concentración de este ion aumenta.

¹⁰ MANCILLA, Robinson y MESA, Henry. Metodología para el manejo de aguas de producción en un campo petrolero. 2012, p. 51.

¹¹ LEWIS, E.L. Escala práctica de salinidad y sus antecedentes. Capítulo 1, 1980.

- **Carbonatos y Bicarbonatos:** Estos iones son importantes debido a que pueden formar incrustaciones insolubles. La concentración de ion carbonato es conocida como alcalinidad P y la concentración de bicarbonato como alcalinidad M.
 - **Sulfato:** El ion sulfato es un problema porque tiene habilidad para reaccionar con el calcio, bario y estroncio para formar sólidos insolubles.
- **Fenoles:** Son compuestos aromáticos presentes en aguas residuales de la industria del petróleo, del carbón, plantas químicas, entre otros. Los fenoles causan problemas de sabores en aguas de consumo tratadas con cloro; en aguas residuales se consideran no biodegradables, pero se ha demostrado que son tolerables concentraciones hasta 500 mg/L. Tiene una alta demanda de oxígeno.
- **Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO):** Mide la capacidad de las bacterias comunes para digerir la materia orgánica para obtener CO_2 y H_2S , generalmente en un periodo de incubación de 5 días @20 °C, analizando la disminución de oxígeno. Esta mide la materia orgánica biodegradable.
- **Demanda Química de Oxígeno (DQO):** Corresponde a la cantidad de oxígeno necesaria para oxidar la materia orgánica y otras sustancias reductoras presentes en el agua. Su valor es más alto que la DBO, pero está relacionada para un mismo sistema.
- **Aceites:** los efectos biológicos de los hidrocarburos por sus propiedades físicas generan contaminación física y sofocación, y por sus componentes

químicos, efectos tóxicos e impregnación. Las aguas aceitosas deterioran la vegetación, en especial la de los pantanos, ciénagas y manglares ya sea por obstrucción de las raíces o por cambios en el equilibrio de sales.

1.4 SÓLIDOS Y ACEITES EN EL AGUA¹²

El agua asociada transporta consigo impurezas tales como: materiales sólidos en suspensión, gotas de aceite dispersas en la fase agua y sólidos humedecidos con petróleo. Muchas de las aguas de producción y/o inyección poseen sólidos suspendidos básicamente pueden estar compuestos por: finos de formación, limos, arcillas, productos de corrosión, scale, sludge formados por las bacterias, cuerpos de bacterias muertas, etc. Algunos de los más importantes son:

- **Óxido De Hierro:** Son dos las fuentes de óxido de hierro encontradas en las operaciones de producción: por producción natural y por precipitación de hierro (ferroso). El óxido de hierro que se produce naturalmente no es muy común.
- **Sulfuro De Hierro:** Es un sólido bastante taponante, muchas veces producto de la corrosión del H₂S con el hierro disuelto en el agua o con el hierro de las estructuras de acero.
- **Arena y Limo:** Son encontrados en más del 90% de las aguas tratadas en los campos petroleros. La cantidad en la cual ocurren es variada y frecuentemente son tan altas como 50-60% del total de los sólidos contenidos en el agua. El tamaño de estas partículas se encuentra en el rango de 7 hasta 150 micras. Muchos equipos de superficie, excluidos los filtros, remueven partículas de 50 micras o más grandes. Partículas de este

¹² Programa de capacitación personal de producción Modulo 2: Circuito del agua. PERENCO COLOMBIA LTD. 2000.

rango estarán normalmente impregnadas con aceite y tienden a permanecer en suspensión debido a las velocidades de flujo o turbulencia en el sistema. El uso de surfactantes aumenta el remojo del agua de estas partículas y facilita su asentamiento.

Para tratar el agua y eliminar las impurezas que ella transporta, en la industria del petróleo, se hace uso de una serie de equipos de superficie, entre los cuales podemos enunciar: el oil skimmer, la IGF, el skim tank, los filtros entre otros. La forma de funcionamiento de estos equipos involucran mecanismos físicos tales como: la decantación, la flotación por medio de inyección de gas, la filtración, etc. Adicionalmente la eficiencia de las vasijas para tratar aguas puede ser mejorada con la inyección de productos químicos que actúen como rompedores de emulsión y/o clarificadores de agua.

1.3.1 Problemas ocasionados por los sólidos suspendidos y el aceite en agua¹³. A continuación se enunciarán algunos de los principales problemas ocasionados por los sólidos suspendidos y el aceite disperso en las aguas de tratadas :

- Incremento de la presión de inyección y disminución de las ratas de inyección ocasionada por el taponamiento de la cara de la formación.
- Cierres definitivos o parciales de los pozos inyectoros debido a daños severos en la formación.
- Necesidad de perforar o acondicionar nuevos pozos inyectoros para mantener los volúmenes de agua inyectada.

¹³ Programa de capacitación personal de producción Modulo 2: Circuito del agua. PERENCO COLOMBIA LTD. 2000.

- Pérdidas de producción ocasionados por el cierre de los pozos productores con alto BSW debido a la imposibilidad de disponer del agua asociada al crudo.
- Excesivos costos en el tratamiento químico del agua asociada a la producción ya sea para inyectarla y/o verterla al medio ambiente.
- Aumento del costo por barril de agua utilizada por otras fuentes cuando las mismas contienen cantidades elevadas del total de sólidos suspendidos (TSS).
- Desgaste excesivo de las piezas de las bombas de inyección de agua ya sea por abrasión de los sólidos o por sobre-esfuerzos cuando la presión de inyección se incrementa.
- Incremento de los costos operacionales por consumo de combustible y/o energía de los motores de las bombas ocasionados por el trabajo extra que deben realizar los mismos para inyectar el agua cuando la presión del pozo aumenta.
- Cuando un agua está demasiado emulsionada, esta puede llegar a transportar grandes cantidades de crudo, generando pérdidas de aceite.
- Disminución de los tiempos entre retrolavados de los filtros, para lograr mantener la calidad del agua en 2 ppm de aceite en agua y 2 ppm del total de sólidos suspendidos (TSS).

- Aumento de los tiempos de retrolavado de los filtros para lograr una buena limpieza de los mismos. Implementación del uso de varsol y/o jabones para descontaminar los medios filtrantes de los trenes de filtración.
- Perturbación de la calidad del tratamiento del crudo ocasionado por:
 - Acumulación de grumos en las interfaces de las facilidades de producción.
 - Recuperación excesiva de crudo en los desnates de las vasijas de tratamiento de agua, lo que ocasiona agitación en la entrada de los fluidos a los equipos.
 - Acumulación de solidos (óxido de hierro y sulfuro de hierro) en la interfase agua-aceite lo que obstruye la normal separación de las fases y el funcionamiento de los rompedores.
- Problemas en la calidad del agua inyectada y vertida al medio ambiente.
- Disminución en la capacidad y en el tiempo de retención de las facilidades de producción debido a la progresiva acumulación de arena en el interior de las mismas.

2. SISTEMAS Y EQUIPOS PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS DE PRODUCCIÓN

La producción de hidrocarburos trae consigo grandes volúmenes de agua que deben ser tratadas antes de su disposición final.

En mención de lo anterior, se cuenta con sistemas y equipos en superficie para ayudar a eliminar trazas de crudo, sólidos o partículas no deseadas para garantizar el cumplimiento de la normatividad u obtener la calidad deseada del agua. El agua después de haber sido tratada se podrá reinyectar, evaporar, verter a cuerpos de agua natural o usar en actividades agrícolas o del campo. Inicialmente, estas corrientes se pasan a través de equipos de separación por gravedad donde son removidos en un 90% los hidrocarburos disueltos y dispersos; pero se necesitan de nuevas tecnologías y otros equipos para remover las partículas más pequeñas presentes en las aguas de producción.

A continuación se presenta una breve descripción de los mecanismos de separación que influyen en cada uno de los equipos utilizados para el tratamiento de aguas de producción.

2.1 PRINCIPIOS DE SEPARACIÓN

Separación gravitacional, dispersión, coalescencia, coagulación, floculación, flotación y filtración constituye los principales procesos físicos involucrados en la operación de los equipos.

2.1.1 Separación gravitacional. La mayoría de los equipos de tratamiento de hidrocarburos dependen de la gravedad para que las gotas de aceite se separen de la fase continua de agua debido a la diferencia de densidad entre el crudo y el agua. Las gotas de aceite empiezan a ser más livianas que el volumen de agua que los está ejerciendo sobre ellas una fuerza de boyanza¹⁴. A este movimiento ascendente se opone la fuerza de fricción debida a la fase continua de agua. Cuando las dos fuerzas son iguales, se logra una velocidad constante de modo que se puede calcular por la ley de Stokes:

¹⁴ Fuerza de boyanza: Un cuerpo que se encuentre en un fluido, ya sea flotando o sumergido, es empujado hacia arriba por una fuerza igual al peso del fluido desplazado. La fuerza boyante o flotante actúa verticalmente hacia arriba a través del centroide del volumen desplazado y se le puede definir de manera matemática mediante el principio de Arquímedes.

$$Vt = \frac{1.78E10^{-6} * (\Delta SG)_{w/o} * (dm)^2}{\mu w}$$

Vt = velocidad final de ascenso, (ft/seg).

$(dm)^2$ = Diámetro de la gota de aceite, (micrones).

μw = Viscosidad de la fase continua de agua, (cp).

$(\Delta SG)_{w/o}$ = Diferencia en gravedad específica del aceite.

La ley de Stokes considera un fluido con flujo laminar y bajo número de Reynolds.

A partir de la ecuación anterior se puede deducir:

- A mayor tamaño de partícula del crudo mayor velocidad de ascenso a superficie, por lo tanto facilita su remoción.
- A mayor grado API del crudo, la diferencia de gravedades específicas se hace más grande, por lo tanto el aceite es más fácil de retirar del agua.
- A mayor temperatura, disminuye la viscosidad del agua, y aumenta la velocidad ascendente debido a la agitación molecular al añadir calor. Esto permite el tratamiento del agua a altas temperaturas.
- Si el diámetro de partícula no se encuentra disponible, se puede asumir un diámetro de partícula de 150 micras.

2.1.2 Dispersión. Cuando hay suficiente energía cinética no sólo para levantar las gotas de aceite sino para hacerlas oscilar, éstas se volverán inestables (se dispersarán) debido a la diferencia de tensión superficial entre una sola gota y dos gotas que se han agrupado. En el mismo instante en que ocurre este proceso, el movimiento de pequeñas partículas de aceites está causando coalescencia.

Debido a lo anterior se tendría que definir estáticamente una medida máxima de gota de aceite para una energía dada por una unidad de masa y tiempo, en la cual la tasa de fusión es igual a la tasa de dispersión.¹⁵ Se puede establecer una relación para el tamaño máximo de partícula que pueda estar en equilibrio usando la ecuación dada por Hinze:

$$d_{max} = 432 * \left(\frac{tr}{\Delta P}\right)^{2/5} * \left(\frac{\sigma}{\rho w}\right)^{3/5}$$

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

σ= Tensión superficial (dinas/cm²).

ρw= Densidad del agua (g/cm³).

ΔP= Caída de presión (psia).

tr= Tiempo de retención, (minutos).

Por la anterior ecuación se puede decir que entre mayor sea la caída de presión, menor será el diámetro máximo de la gota de aceite. Esto quiere decir que a mayor caída de presión ocurrida en una pequeña distancia a través del estrangulador, válvulas de control, desarenadores, etc., da como resultado gotas más pequeñas.

De la experiencia se puede inferir, para propósitos de diseño, que aun cuando ocurran altas pérdidas de presión todas las gotas de diámetro mayor que el máximo pueden dispersarse instantáneamente.

2.1.3 Coalescencia. Es la unión de pequeñas gotas para formar gotas de mayor tamaño. El proceso de coalescencia en sistemas tratadores de agua depende más del tiempo que de la dispersión. En la dispersión de dos líquidos inmiscibles, una coalescencia inmediata ocurre raramente cuando las gotas colisionan. Si el par de

¹⁵ LANDAZABAL PINZON, Gustavo. INFANTE MORENO, Marlon R. Definición de estándares operativos para el tratamiento de aguas residuales. 2007, p. 23.

gotas son expuestas a fluctuaciones de presión turbulenta y la energía cinética de oscilación inducida en el par de gotas fusionadas es mayor que la energía de adhesión entre éstas, el contacto se rompería antes que se complete la coalescencia. Después de un periodo inicial de coalescencia, un tiempo de retención adicional disminuye la capacidad de causar coalescencia de gotas de aceite.

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

$$t = \frac{(dm)_o^4}{2 * \emptyset * Ks}$$

$(dm)^4$ = Diámetro de la gota de aceite, (micrones).

\emptyset = Fracción en volumen de la fase dispersa de aceite.

Ks =Constante del sistema.

2.1.4 Coagulación-Floculación-Sedimentación convencional. Las prácticas convencionales de coagulación–floculación-sedimentación son pre- tratamientos esenciales para muchos sistemas de purificación de agua, especialmente los tratamientos de filtración. Estos procesos aglomeran entre sí a los sólidos en suspensión para formar cuerpos de mayor tamaño a fin de que los procesos de filtración física puedan eliminarlos con mayor facilidad. La eliminación de partículas por medio de estos métodos vuelve mucho más eficaces los procesos de filtración. El proceso a menudo se continúa con la separación por gravedad (sedimentación o flotación) y siempre es seguido por la filtración.

- **Coagulación.** es la desestabilización de las partículas coloidales causadas por la adición de un reactivo químico llamado coagulante el cual, neutralizando sus cargas electrostáticas, hace que las partículas tiendan a unirse entre sí y la sustancia que se coagula vaya al fondo para su posterior retiro.

Un coagulante químico, como sales de hierro, sales de aluminio o polímeros, se agregan al agua fuente para volver fácil la adherencia entre las partículas. Los coagulantes funcionan creando una reacción química y eliminando las cargas negativas que causan que las partículas se repelan entre sí.

Después, la mezcla coagulante-agua fuente se agita lentamente en un proceso que se conoce como floculación. Este agitado del agua induce que las partículas choquen entre sí y se aglutinen para formar grumos o “flóculos” que se pueden eliminar con mayor facilidad.

- **Floculación.** La floculación es un proceso químico mediante el cual, con la adición de sustancias denominadas floculantes, se aglutina las sustancias coloidales presentes en el agua, facilitando de esta forma su decantación y posterior filtrado.

Los compuestos que pueden estar presentes en el agua pueden ser:

- Sólidos en suspensión.
- Sustancias disueltas.
- Partículas coloidales (menos de 1 micra).

El proceso de floculación es precedido por la coagulación, por eso muchas veces se habla de los procesos de coagulación-floculación. Estos facilitan la retirada de las sustancias en suspensión y de las partículas coloidales.

La floculación es la aglomeración de partículas desestabilizadas en microflóculos y después en los flóculos más grandes que tienden a depositarse en el fondo de los recipientes construidos para este fin, denominados sedimentadores.

Los factores que pueden promover la coagulación-floculación son el gradiente de la velocidad, el tiempo y el pH. El tiempo y el gradiente de velocidad son importantes al aumentar la probabilidad de que las partículas se unan y da más tiempo para que las partículas descendan, por efecto de la gravedad, y así se acumulen en el fondo. Por otra parte el pH es un factor prominente en acción desestabilizadora de las sustancias coagulantes y floculantes.

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

2.2 EQUIPOS PARA EL TRATAMIENTO DE AGUA

Diversos equipos son utilizados en la industria con el fin de acondicionar la calidad del agua según nuestra necesidad. A continuación se mencionan los equipos principales usados para el tratamiento de aguas.

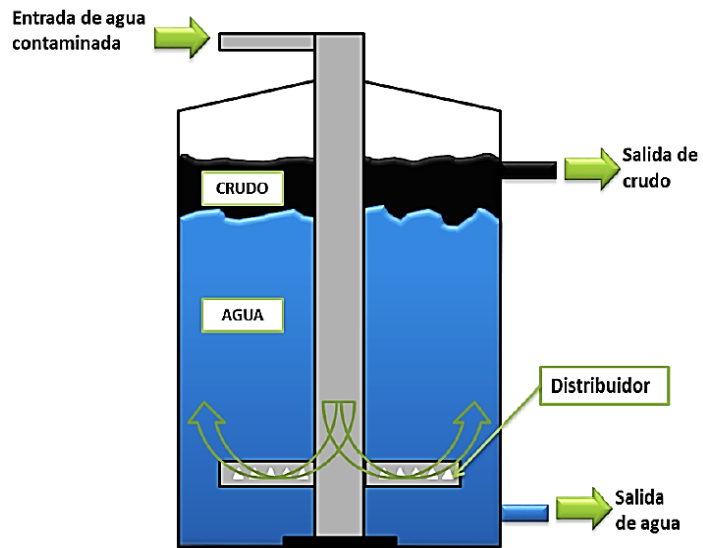
2.2.1 Tanque desnatador o Skim tank. El equipo más simple de tratamiento primario es un tanque desnatador. Se clasifican de acuerdo a su forma como cilíndricos o rectangulares y de acuerdo a su presión de operación en tanques atmosféricos o recipientes a presión. Son diseñadas para proporcionar un alto tiempo de retención durante el cual pueda ocurrir la coalescencia y la separación gravitacional. Para que ocurra la separación requieren de periodos largos de tiempo de residencia.

Los desnatadores pueden ser horizontales o verticales. En los verticales las gotas de aceite deben ascender en sentido contrario al flujo de agua que es descendente; algunos desnatadores verticales poseen propagadores en la entrada y colectores en la salida para ayudar a la distribución de flujo uniforme (Ver Figura 3).

El flujo entra y pasa a un tubo que lo dirige hacia abajo permitiendo que se liberen pequeñas cantidades de gas. La entrada inferior dirige el flujo a través de la capa de aceite a un sistema propagador para permitir que el agua continúe su flujo hacia abajo con la velocidad uniforme sobre toda la sección del área transversal en el tanque. En esta zona tranquila, entre el propagador y el colector de agua, puede ocurrir algo de coalescencia y la boyanza de las gotas de aceite causara que estas asciendan contra el flujo de agua. El aceite que se encuentra en la superficie se retira y se recoge en colectores.

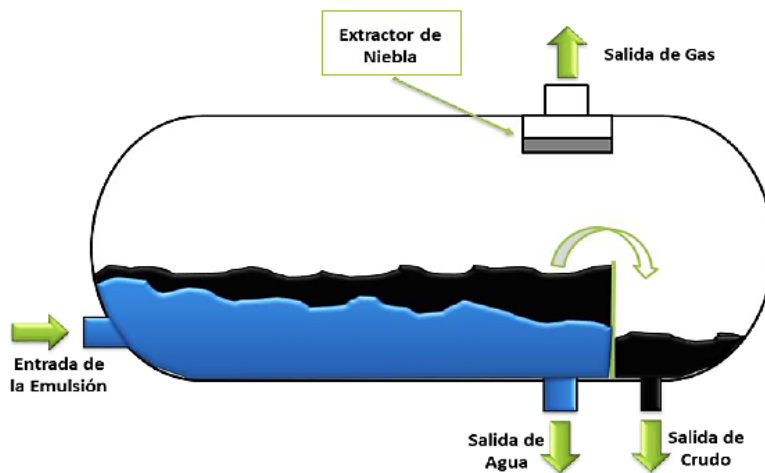
En un desnatador horizontal las gotas de aceite suben perpendicularmente al flujo de agua. El flujo fluye a través de una entrada inferior para permitir la separación del gas y llevar el flujo bajo la capa de aceite el agua entonces se revuelve y fluye horizontalmente a lo largo del tanque. Se pueden instalar platinas para restringir el flujo llamados "baffles". En esta sección del tanque las gotas de aceite coalescen y ascienden luego a la superficie donde son capturadas, agrupadas y posteriormente desnatadas sobre el vertedero de aceite. La altura de la espuma de aceite puede ser monitoreado por un control de interfase (Ver Figura 4).

Figura 3. Skim tank



Fuente: ARNOLD, Ken. STEWART, Maurice. Surface production operations, vol 1. 3 ed. Houston, 2008.

Figura 4. Skim tank horizontal



Fuente: ARNOLD, Ken. STEWART, Maurice. Surface production operations, vol 1. 3 ed. Houston, 2008.

Los tanques horizontales son más eficientes para el tratamiento de agua porque las gotas de aceite no tienen que fluir contra la corriente de flujo del agua. Sin embargo los verticales se usan donde se presente lo siguiente:

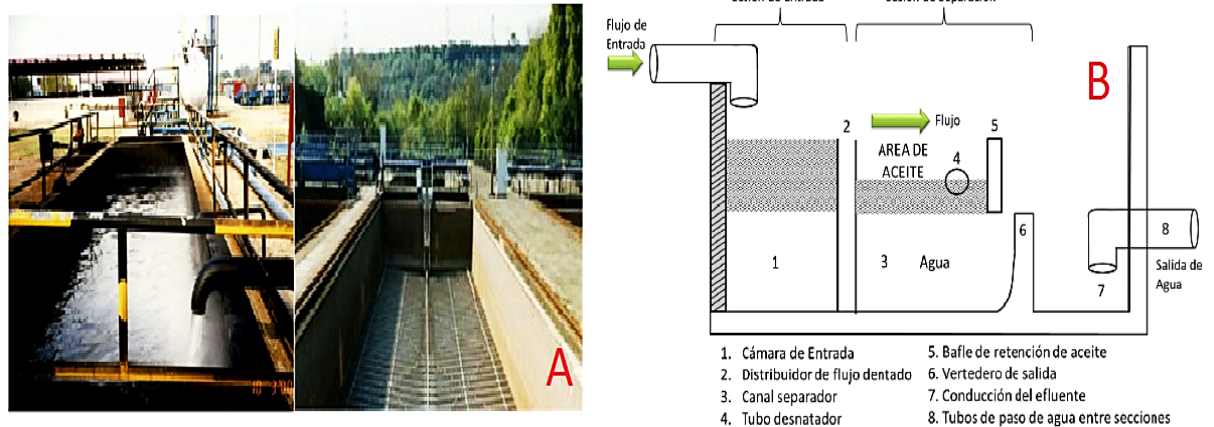
- Donde se necesita manejar arena y sólidos: Esto puede hacerse en tanques verticales con desagües o drenajes de arena en el fondo del mismo; sin embargo, estos drenajes en tanques horizontales no han sido satisfactorios.
- Donde se experimenta movimiento de líquidos: Las cámaras verticales son menos susceptibles a que se produzcan cierres en los niveles altos debido al movimiento de líquidos. Las olas y ondas internas que surgen en los tanques horizontales pueden dispersarse e igualar el nivel flotante, aunque el volumen de líquido entre el nivel de operación normal y el nivel alto de cierre sea igual o mayor que el de un tanque vertical.

2.2.2 Caja API o separador API. Este equipo es una piscina expuesta a la atmósfera la cual internamente presenta una serie de compartimientos. Su función es la de recuperar al máximo el aceite provenientes de los drenajes, reboses y disparos de las PSV (pressure safety valve), además de algunos de los equipos presentes en la facilidad de producción. Su principio de operación se basa en el tiempo de asentamiento y la diferencia entre las densidades del agua y el aceite. (Ver figura 5).

La mezcla agua-aceite entra por medio de un tubo con codo descendente el cual pasa el fluido a la sección de separación, en donde tiene un tiempo de retención que le permite la separación del aceite y el agua. El aceite forma una nata en la parte superior la cual es removida por medio de un colector cilíndrico que la envía a un compartimiento separado.

Este aceite recuperado es bombeado periódicamente a los tratadores y/o Gun barrels. Las cajas API constan de dos secciones: sección de entrada y sección de separación.

Figura 5. Esquema de una caja API y sus secciones.



Fuente: A) Ecopetrol. B) LANDAZÁBAL PINZON, Gustavo. INFANTE MORENO, Marlon. Definición de estándares operacionales para el tratamiento de aguas residuales, 2007.

2.2.3 Platinas coalescedoras. Son placas disponibles en módulos que se pueden adaptar generalmente a un separador convencional con modificaciones estructurales importantes. Se debe tener un equipo mecánico de remoción de sedimentos, ya que la remoción manual de estos puede requerir el retiro del paquete de placas y por lo tanto no sería eficiente.

La instalación de módulos de placas puede mejorar el funcionamiento de dos maneras:

- Proporcionan un aumento en el área superficial horizontal del separador.

- Crean una distribución más uniforme, características de flujo menos turbulento, proporcionando condiciones más favorables para la separación del aceite libre.

El oil skimmer cuenta con unas características de diseño específicas, y con un espacio que puede ser aprovechado para permitir el empleo de baffles o placas que aumentan el área de contacto con el fluido en un espacio relativamente pequeño, que al colocarlas en serie, paralelas, separadas a una corta distancia entre sí e inclinadas respecto a la horizontal en forma de un paquete, permiten aumentar la frecuencia de colisión entre las partículas, aglutinándose en partículas de mayor tamaño fáciles de capturar, coalescer y finalmente remover de la superficie. El espaciamiento entre platos y el ángulo de la placa son críticos para el apropiado funcionamiento del paquete de placas.

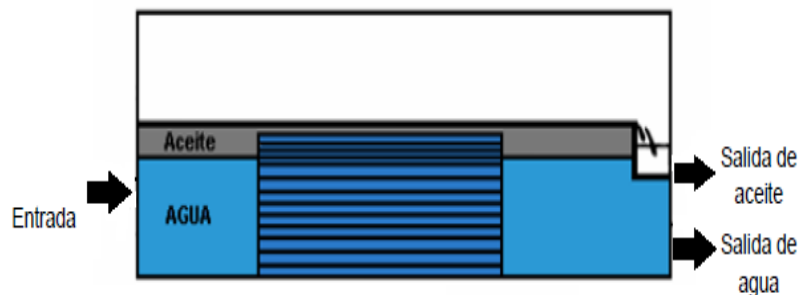
Entre las más comunes se encuentran:

PPI: interceptor de platinas paralelas.

CPI: interceptor de placas corrugadas.

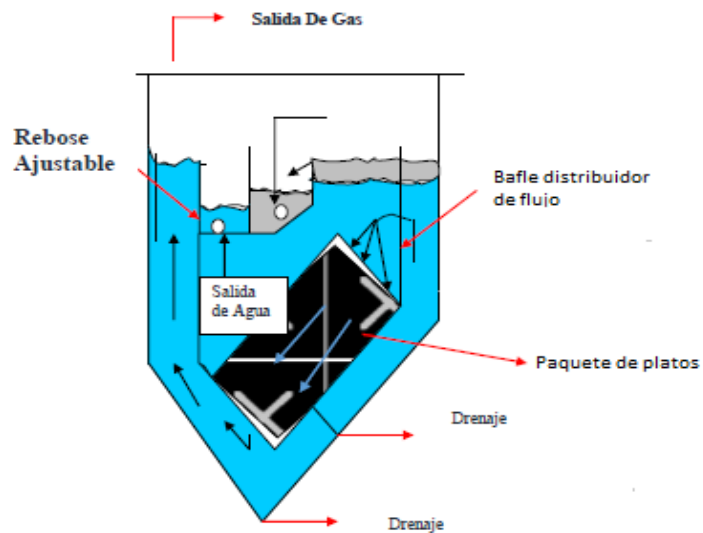
CFD: separador de flujo transversal o cruzado.

Figura 6. Esquema de un interceptor de platinas paralelas.



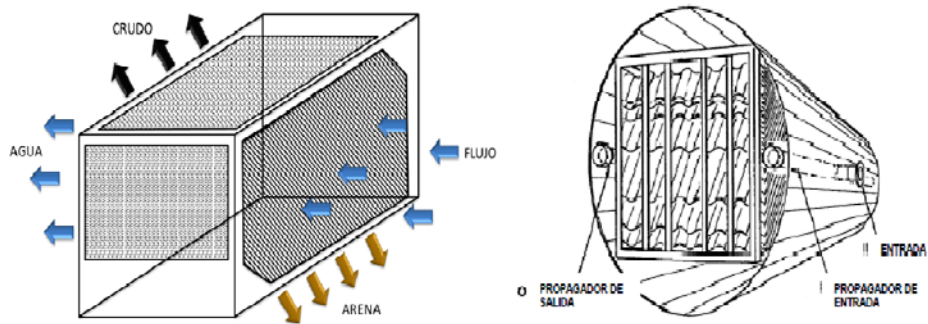
Fuente: ARNOLD, Ken. STEWART, Maurice. Surface production operations, vol 1. 3 ed. Houston, 2008, p. 525.

Figura 7. Esquema del flujo a través de un coalescedor de placas corrugadas.



Fuente: Tomado material de apoyo de la materia "Facilidades de superficie". Ing. Edison García.

Figura 8. Separador de flujo transversal o cruzado.



Fuente: ARNOLD, Ken. STEWART, Maurice. Surface production operations, vol 1. 3 ed. Houston, 2008, p. 531.

2.2.4 Paquetes de tubería en serpentina (S.P. PACKS). Los paquetes de tubería en serpentina son diseñados básicamente para generar turbulencia al interior del separador, generalmente son instalados en elementos de segregación gravitacional primarios, tales como los recipientes y los tanques desnatadores. Consta de una serie de tubos en forma de espiral a través del cual el flujo de agua

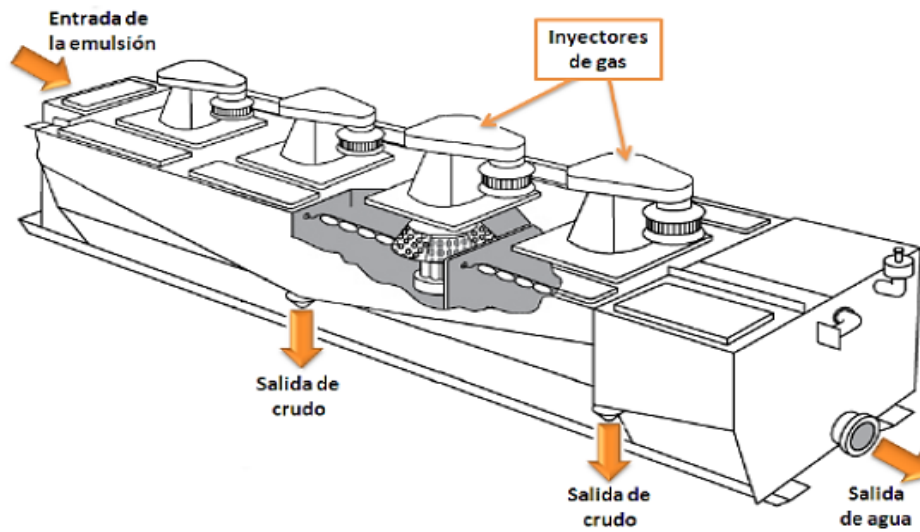
es forzado a pasar, permitiendo así a las gotas de aceite presentes en el agua agruparse y ascender a superficie de una forma más eficiente.

Como en todo sistema de separación primaria, la presencia de sólidos puede generar problemas de eficiencia por taponamiento, y abrasión en los equipos. De la misma manera, en estos elementos de optimización también ocurre y es necesario asegurarse que estos inconvenientes no se repetirán.

Son muy efectivos al implementarse en sistemas de tratamiento primario ya que éstos son diseñados para incrementar la distribución en el tamaño de la gota de aceite, mediante el crecimiento o la coalescencia, llevándola hasta un diámetro máximo de 1000 micras, haciendo más fácil la remoción.

2.2.5 Unidades de flotación. Las unidades de flotación son los únicos equipos de tratamiento de agua residual cuyo principio de separación se fundamenta en el arrastre por gas de las partículas de aceite, aunque también ocurre la separación gravitacional, pero en menor proporción. Las unidades de la flotación emplean un proceso en el cual pequeñas burbujas de gas son generadas y dispersadas en el agua, donde hacen contacto con las gotas del aceite y partículas sólidas. Las burbujas de gas incrementan la diferencia de densidades y ayudan a las gotas de aceite a ascender rápidamente a superficie para su posterior recolección. Coagulantes, polielectrólitos o desmulsificantes son agregados para optimizar el funcionamiento del equipo como el que se muestra en la figura 9.

Figura 9. Descripción de un equipo de flotación.



Fuente: BENAVIDES MURCIA, Jhon y JAIMES BELTRÁN, Yureynis. Factibilidad técnico-financiera de los usos alternativos del agua de producción en campo Escuela Colorado. 2014. Pág. 55

Cabe resaltar, que las unidades de flotación son sistemas de tratamiento secundario. Se pueden encontrar 2 clases de unidades de flotación diferenciados por el método de producción de burbujas de gas en el agua residual, tales como:

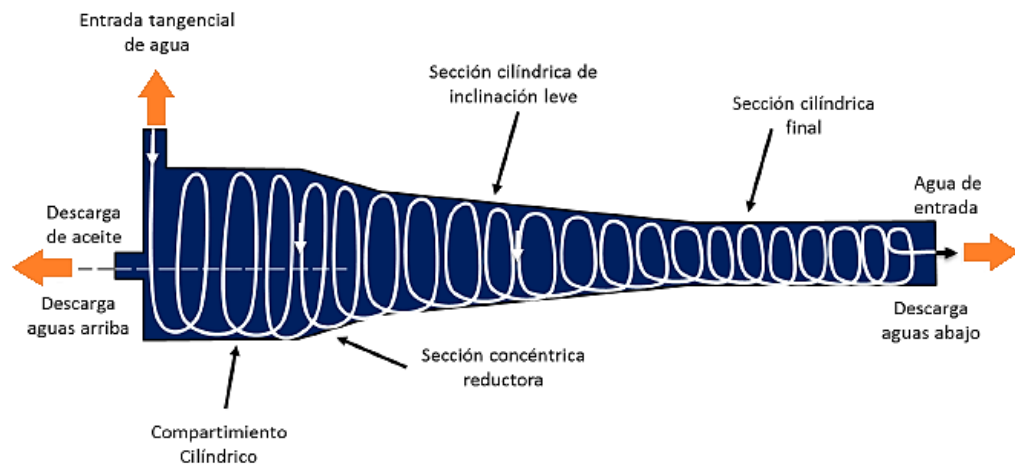
- Unidades de flotación por gas disuelto.
- Unidades de flotación por gas disperso.

2.2.6 Hidrociclones. Este tipo de unidades utiliza la fuerza centrífuga para remover las gotas de aceite presentes en el agua. el flujo entra al compartimiento de forma tangencial creando un remolino de alta velocidad, en el cual las gotas de aceite coalescen y fluyen en contracorriente. A medida que el fluido pasa a través de las secciones concéntricas de reducción (alto grado de inclinación) y decreciente (con ángulo de inclinación leve), se produce un incremento en la

velocidad. Luego, el fluido ingresa a una sección cilíndrica donde el caudal se mantiene constante. Las partículas de mayor tamaño son separadas en la sección decreciente, mientras que las partículas más pequeñas, son removidas en la sección final. Las partículas de aceite al tener menor densidad son arrastradas por la fuerza centrífuga hacia la zona de baja presión generada en el centro del cilindro, en donde fluyen en dirección contraria al flujo. El aceite es removido a través de un puerto de diámetro pequeño ubicado en la cabeza del hidrociclón, mientras que el agua sale por la parte baja del equipo.

Los Hidrociclones estáticos requieren una presión mínima de 100 psi para generar las velocidades requeridas. Algunos equipos son diseñados para operar a presiones más bajas, pero estos no son tan eficientes como los que operan a altas presiones. Los hidrociclones pueden remover partículas de aceite de diámetros entre 5 y 15 micras. Para cálculos de diseño se asume una remoción de aceite del 90%, aunque en la práctica este resultado no se representa.

Figura 10. Hidrociclón.



Fuente: ARNOLD, Ken. STEWART, Maurice. Surface production operations, vol 1. 3 ed. Houston, 2008, p. 573.

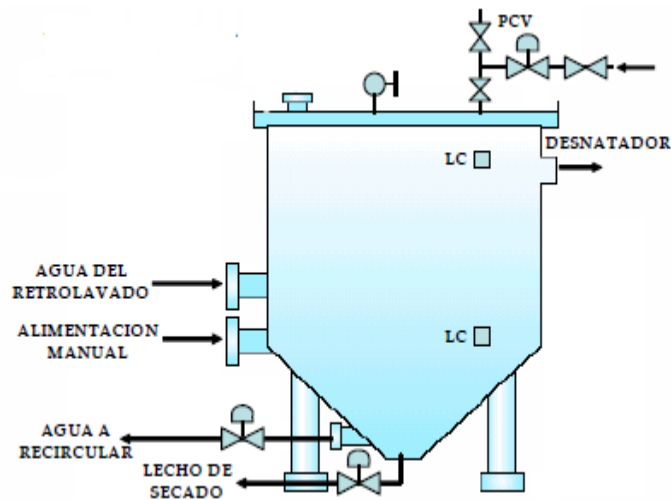
2.2.7 Piscinas para el tratamiento de aguas. Generalmente son espacios diseñados para el tratamiento secundario del agua residual con el fin de proporcionar un mayor tiempo de retención comparado con los demás equipos. Estas se pueden clasificar según su profundidad en:

- Piscinas aeróbicas.
- Piscinas anaeróbicas.
- Piscinas facultativas.
- Piscinas de sedimentación.
- Piscinas de oxidación.

2.2.8 Decantador. Es un tanque de fondo cónico con capacidad suficiente para mantener de dos a cuatro horas la totalidad del fluido descargado por el filtro en la etapa de retrolavado como el mostrado en la figura 11. Sirve para clarificar las aguas provenientes del retrolavado de las unidades de filtración, que luego se recircularan al sistema para ser tratadas en los equipos de tratamiento de aguas correspondientes a cada estación.

El volumen y tiempo de residencia dependen de las condiciones de diseño del proceso y del fluido en particular, de la frecuencia del retrolavado y de las condiciones en las que se requiere el fluido resultante. El agua aceitosa concentrada se eleva a la superficie, en donde puede ser removida para reciclarla. La mayor parte del contenido del tanque, generalmente agua, es enviada aguas arriba del filtro para procesarla. Los sólidos concentrados en el fondo cónico son enviados a secamiento y disposición.

Figura 11. Esquema de un decantador.



Fuente: www.eviromental-expert.com

Para su funcionamiento solo es necesario interruptores de nivel que controlan la actuación de las bombas asociadas al vaciado o llenado del tanque, temporizadores que aseguren residencia del fluido, según lo necesario.

2.2.9 Filtros de Membrana. Hay varios métodos para permitir que las partículas atraviesen una membrana. Tales 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 por membrana se puede dividir en micro-filtración y ultra-filtración por un lado y en nano-filtración y ósmosis inversa por el otro. 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 referencias 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.

Este 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.

3. UNIDADES DE FILTRACIÓN¹⁶

El sistema de tratamiento tiene como finalidad la optimización de la calidad del agua, para que sea lo más compatible con las formaciones a la que va a ser inyectada o vertida. Una parte importante en un proceso de tratamiento de aguas residuales es la existencia de las unidades de filtración.

Estas son tanques cerrados y a presión, que se usan para filtrar sólidos y aceites contenidos en el agua los cuales son indeseables o perjudiciales en la operación de inyección y/o vertimiento. Al pasar el fluido sucio a través del filtro, la mayoría de los sólidos y aceites son removidos. El fluido una vez ha sido filtrado fluye a la descarga de agua limpia. El flujo continúa de esta forma hasta que el lecho filtrante debe ser regenerado.

Según (KIRK, A REVIEW OF WATERFLOOD, 1964) la filtración se puede definir como el proceso de pasar un líquido que contiene material en suspensión, a través de un medio adecuado para eliminar eficazmente los sólidos en suspensión del líquido. Básicamente se trata de una acción mecánica y las partículas suspendidas

¹⁶ ARNOLD, Ken. STEWART, Maurice. Surface production operations, vol 1. Pages 615-660. 3 ed. Houston, 2008.

más grandes no pasarán a través de los orificios del medio filtrante debido a su tamaño; sin embargo, este proceso no es del todo eficaz, ya que algunos de los sólidos en suspensión son lo suficientemente pequeños para pasar a través de los medios filtrantes. Si hay turbidez apreciable en el efluente del filtro, la coagulación puede ser necesaria.

Durante el proceso de filtración, el agua entra por la parte superior de la unidad, luego los flujos bajan a través del lecho filtrante. El agua filtrada fluye a través del lecho y esta sale por la parte lateral inferior de la unidad, mientras que las gotas de aceite y partículas sólidas se quedan atrapadas dentro el lecho filtrante.

Los filtros se utilizan para eliminar los sólidos en suspensión y los hidrocarburos insolubles del agua de producción, las aguas superficiales, agua de mar, ríos, lagos y agua de pozo.

Las unidades de filtración pueden ser:

- De lecho suelto (arena, grava, antracita, carbón activado, cascarilla de nuez, otros) o de lecho fijo.
- De cartucho (plegado o enrollado), el cual es desechable y tiene baja capacidad de acumulación de sólidos y recubiertos donde la torta filtrante gastada se seca y se descarga.

3.1 MECANISMOS DE SEPARACIÓN

La filtración se puede utilizar para eliminar las partículas sólidas suspendidas en el agua, haciendo fluir esta por un medio poroso. A medida que el agua pasa a través de los pequeños poros del medio filtrante, las partículas más grandes quedan atrapadas. El tamaño de los poros determina las partículas más pequeñas

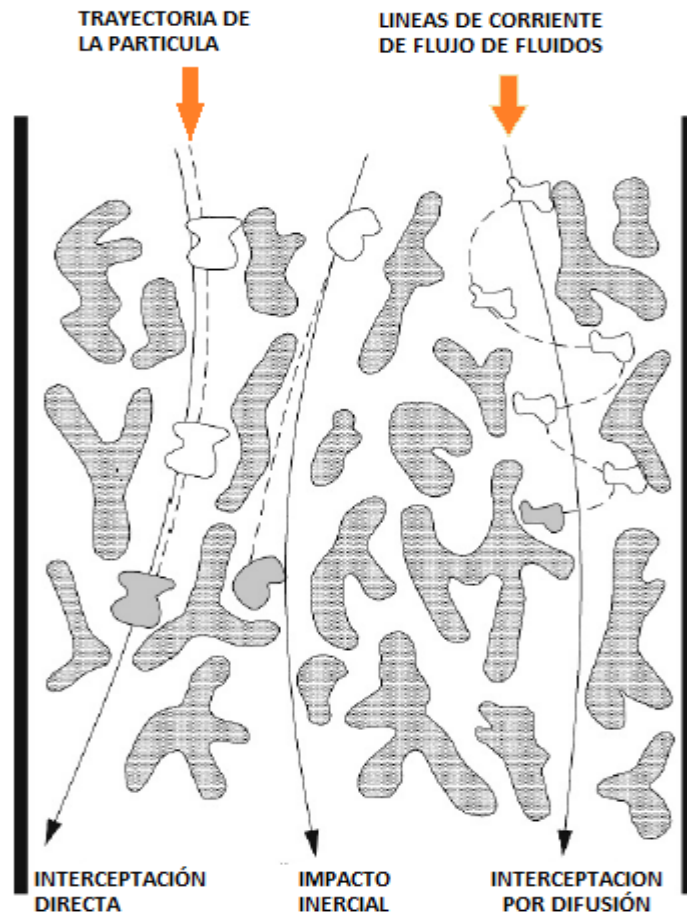
que pueden estar atrapadas. Los sólidos suspendidos se separan de los fluidos a través de tres mecanismos: impacto inercial, interceptación diferencial, y de interceptación directa.

3.1.1 Impacto inercial. Las partículas (1 a 10 micras) en una corriente de fluido tienen masa y velocidad y, por lo tanto, un momentum asociado con ellos. Como las partículas son arrastradas y pasan a través del medio filtrante, la corriente de líquido tomará el camino de menor resistencia al flujo y será desviada alrededor de la superficie del filtro. Las partículas, debido a su impulso, tienden a viajar en línea recta y, como resultado, las partículas situadas cerca del centro de la línea de flujo impactan sobre el medio filtrante y son eliminadas (Ver figura 12). La corriente de fluido, que se muestra como líneas continuas, fluye alrededor de las fibras del filtro, mientras que las partículas continúan a lo largo de su camino (líneas a trazos) y golpean las fibras. En general, las partículas más grandes se desviarán más fácilmente que las pequeñas. En la filtración de fluidos de estimulación, este mecanismo rara vez se produce porque las densidades de las partículas y el líquido son por lo general muy similares. Esto disminuye la desviación de la partícula desde la corriente de flujo de líquido anulando los beneficios de filtración por impactación inercial.

3.1.2 Interceptación por difusión. Para partículas que son extremadamente pequeñas, es decir aquellos con una masa muy pequeña y menos de 0,3 micras de diámetro, la separación puede ser el resultado de la interceptación por difusión. Este proceso se produce cuando las partículas extremadamente pequeñas se desvían de la corriente de flujo de fluido debido a las frecuentes colisiones que se producen entre las partículas y moléculas del líquido; este fenómeno se conoce como "Movimiento Browniano". Este movimiento provoca que las partículas más pequeñas tiendan a desviarse de las corrientes de flujo y por lo tanto aumenten la probabilidad de chocar contra la superficie del filtro y sean removidas. La figura 12

muestra el flujo de partículas que se caracterizan por el movimiento browniano y la colisión contra la superficie del filtro.

Figura 12. Mecanismos de separación.



Fuente: ARNOLD, Ken. STEWART, Maurice. Surface production operations, vol 1. 3 ed. Houston, 2008.

3.1.3 Interceptación directa. Es el método por el cual las partículas de un tamaño conocido se les prohíbe que fluyan a través de una abertura fija de un diámetro menor que el de las partículas¹⁷. Las mallas fijas utilizadas en las

¹⁷ HOUCHIN, L.R. DUNLAP, D.D. HUNDSON, L.M. Field mixing and filtration of acid stimulation fluids. Society of Petroleum Engineers [en línea], 1986 [citado 20 Diciembre 2014]. Available from www.onepetro.org: OTC 5244.

pruebas de análisis de tamices son un ejemplo de eliminación de partículas por interceptación directa. Además de filtrar todas las partículas más grandes que la abertura del filtro, un volumen significativo de partículas más pequeñas también se conservan. Este fenómeno puede explicarse por partículas que actúan de "puentes" en un orificio del filtro. Aunque todo el vacío no puede ser bloqueado, el filtro se obstruirá parcialmente, generando una filtración de partículas más finas. Este tipo de filtración se considera el más eficaz para los sistemas de estimulación y está presente sólo en los filtros de clasificación absolutos. La figura 12 describe el proceso.

3.2 TIPOS DE FILTROS

Un sinnúmero de medios filtrantes disponibles proporcionan diferentes tamaños de poro para la remoción de sólidos. Dependiendo de su construcción, los medios filtrantes pueden ser divididos en estructura fijas, estructuras no fijas y medios superficiales.

3.2.1 Estructura de medio poroso no fija. Dependen principalmente de los mecanismos de impacto inercial y / o interceptación por difusión para atrapar partículas dentro de los espacios de su estructura interna. Las variaciones en la caída de presión en filtros de estructura no fija pueden causar pequeñas deformaciones o el movimiento del medio poroso, ocasionando el cambio de tamaño de algunos de los poros del medio filtrante (de ahí el nombre de "medio poroso no fijo").

Esta estructura representa el tipo de filtros más común. Se incluyen los siguientes:

- Cartuchos de fibra de vidrio no adherentes.
- Cartuchos de celulosa moldeados.

- Cartuchos de polipropileno.
- La arena y otras lechadas de medios granulares.
- Filtros de tierra de diatomeas.

Los filtros de estructura porosa no fija no sólo dependen de la captura, sino también en la capacidad de absorción con la que se retienen las partículas. Mientras la fuerza de desprendimiento ejercida por el fluido sea menor que la fuerza de retención de la partícula, esta permanecerá unida al medio. Sin embargo, cuando un filtro de este tipo funciona por un largo periodo de tiempo y ha recogido una cierta cantidad de materia en partículas, un aumento repentino en el flujo y / o presión puede superar estas fuerzas de retención y causar la liberación aguas abajo de algunas de las partículas, es decir, que las partes del medio filtrante se desprenden y continúan, contaminando el efluente (fluido que ha pasado a través del filtro).

3.2.2 Estructura de medio poroso fija. Dependen en gran medida del mecanismo de interceptación directa para hacer su trabajo y se construyen de forma que las partes estructurales del medio no puedan cambiar y que la corriente de flujo por el medio sea tortuosa.

Es cierto que tales filtros retienen algunas partículas por adsorción como resultado de la impactación inercial y la interceptación por difusión. También es verdad que tienen poros más grandes que su grado de filtración. Sin embargo, el tamaño de poro se controla en la fabricación de manera que la extracción cuantitativa de partículas mayores de un tamaño dado se puede asegurar. Se construyen de tal manera que el tamaño de poro no cambie.

Estos filtros representan tecnología relativamente nueva en la construcción de su medio filtrante para uso de campos petroleros, en donde se incluyen los siguientes:

- Cartuchos de celulosa impregnadas con resina.
- Cartuchos de fibra de vidrio con resina en condiciones de servidumbre.
- Cartuchos de polipropileno continuos.

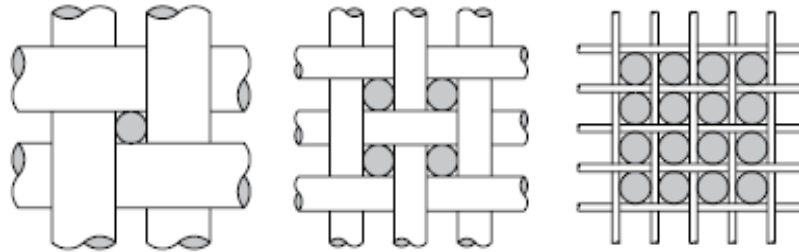
Como los sólidos se encuentran atrapados en la superficie del medio poroso filtrante, algunas de las vías de flujo disponibles están bloqueadas. Esta obstrucción provoca un aumento de la caída de presión a través del filtro y puede causar el movimiento de menor importancia en el medio filtrante, que puede resultar en la descarga y / o la migración de este. (La descarga se refiere a sólidos previamente atrapados siendo liberados aguas abajo; la migración se refiere a las partes del medio poroso a ser liberadas aguas abajo.) La migración del medio filtrante casi siempre tiene algo de la descarga asociada con la liberación de material. Estos dos fenómenos suelen causar una disminución repentina en la caída de presión a través del filtro. Cabe señalar que, por definición, un filtro de poro fijo no exhibe descarga o migración del medio poroso.

Con el tiempo, un filtro recoge sólidos hasta que la caída de presión es demasiado grande para un funcionamiento continuo. En este punto, el material filtrante se debe reemplazar o limpiar. La cantidad de sólidos que un filtro puede eliminar por unidad de volumen es referida como carga de sólidos. Diferentes tipos de filtros pueden tener diferentes capacidades de carga de sólidos.

La Capacidad de carga de sólidos de un filtro es afectada por el diseño del filtro y el medio en concreto utilizado. La Figura 13, por ejemplo, muestra porciones de tres filtros utilizando diferentes mallas de fibra, que pueden ser de fibra de vidrio, celulosa, algodón, o polipropileno. Las tres secciones representan la misma área

de filtro con los mismos tamaños de poro. La única diferencia entre los tres es el diámetro de la fibra usada para formar el medio. El lado derecho representa un filtro con 16 veces el número de poros por unidad de volumen; así su carga de sólidos debe ser mucho más grande.

Figura 13. Diferentes tipos de mallas para el filtrado.



Fuente: ARNOLD, Ken. STEWART, Maurice. Surface production operations, vol 1. 3 ed. Houston, 2008, p.620.

3.2.3 Medio superficial. Un filtro de superficie o pantalla es uno en el que todos los poros descansan en un plano único, que por lo tanto depende en gran medida de la interceptación directa para separar partículas de un fluido. Sólo algunos filtros en el mercado hoy en día, por ejemplo, malla de alambre tejido, tela tejida, y algunos filtros de membrana, califican como filtros de superficie.

Un filtro de superficie detendrá todas las partículas más grande que la apertura de los poros. Mientras que las partículas más pequeñas pueden ser detenidas debido a factores discutidos anteriormente (puentes, etc.), no hay ninguna garantía de que tales partículas no pasarán aguas abajo. Filtros de malla de alambre tejido están actualmente disponibles con aberturas de hasta 5 micras.

3.3 CLASIFICACIÓN SEGÚN SU REMOCIÓN.

Varios sistemas de clasificación han evolucionado para describir las capacidades de filtración de elementos filtrantes. Desafortunadamente, no hay un sistema de clasificación generalmente aceptado, lo que tiende a confundir al usuario del filtro. Varios de los sistemas de clasificación actualmente en uso se describen a continuación.

3.3.1 Clasificación nominal. Muchos fabricantes de filtros se basan en una clasificación nominal del filtro, que ha sido definido por la National Fluid Power Association (NFPA). Los estados de la NFPA, que la capacidad nominal del filtro es "un valor arbitrario en micras asignado por el fabricante del filtro, en base a la eliminación de un porcentaje de todas las partículas de un tamaño dado. Rara vez es bien definido y no reproducible".

En la práctica, un contaminante asociado al flujo se introduce aguas arriba del filtro, y posteriormente el flujo de efluente (flujo aguas abajo del filtro) se analiza microscópicamente. Una calificación nominal dada de un filtro significa que 98% en peso del contaminante por encima del tamaño especificado se ha eliminado; 2% en peso del contaminante ha pasado aguas abajo.

Tenga en cuenta que esta es una prueba gravimétrica en lugar de una prueba de recuento de partículas. Contando partículas aguas arriba y aguas abajo es una forma más significativa de medir la eficacia del filtro. Los problemas típicos son los siguientes:

- La eliminación del 98% de contaminantes en peso se determina mediante el uso de un dispositivo de contención específica a una concentración y flujo dado. Si cualquiera de las condiciones de la prueba se cambia, los resultados de las pruebas podrían ser alterados significativamente.

- El 2% de los contaminantes que pasa a través del filtro no es caracterizado por la prueba. No es raro para un filtro con una capacidad nominal de 10 micras, que aguas abajo pasen partículas que varíen en tamaño de 30 a más de 100 micras.
- Los datos de prueba a menudo no son reproducibles, especialmente entre diferentes laboratorios.
- Algunos fabricantes no basan su capacidad nominal en la eliminación del 98% en peso de los contaminantes sino su eficiencia es de 95%, 90%, o incluso inferior. Por lo tanto, a menudo sucede que un filtro con una calificación absoluta de 10 micras en realidad es más fino que el otro filtro con una capacidad nominal de 5 micras. Por lo tanto, siempre es recomendable comprobar los criterios en que se basa un filtro nominal.
- Las concentraciones altas de contaminantes aguas arriba utilizados para tales pruebas no son típicos de las condiciones normales del sistema y producen valores de alta eficiencia engañosas. Es común que un medio filtrante de malla de alambre con tamaño de poro de 15 micras sea mejor en vez de uno de 10 micras en especificación nominal. Sin embargo, a las contaminaciones normales del sistema, este mismo medio filtrante pasará casi todas las partículas de 10 micras.

3.3.2 Clasificación absoluta. La NFPA define una calificación absoluta de la siguiente manera: "Es el mayor diámetro de partícula que pase a través de un filtro en las condiciones de ensayo especificadas. Es una indicación de la abertura más grande en el medio filtrante".

En todos los casos los filtros han sido valorados por un sistema de "variación". Para la prueba, se bombea un fluido de un contaminante que sea reconocido

fácilmente (por ejemplo, perlas de vidrio o una suspensión bacteriana) y tanto el afluente como el efluente son examinados para conocer la cantidad de contaminante.

Las pruebas de variación son pruebas destructivas, es decir, el filtro no se puede utilizar después de la prueba. En consecuencia, se han establecido pruebas de integridad de filtros, que son no destructivas y se busca correlacionar los resultados con la prueba de provocación destructiva. En otras palabras, si el filtro mantiene su integridad en la prueba no destructiva, eso significaría que pasaría la prueba de provocación destructiva.

3.3.3 Sistema de clasificación Beta (β). Si bien las calificaciones absolutas son claramente más útiles que las características nominales, un sistema más reciente para expresar la capacidad de filtración es la asignación de valores de la relación Beta.

La relación Beta se determina utilizando la "prueba de rendimiento de los filtros Oklahoma State University OSU F-2". La prueba, desarrollada originalmente para su uso en filtros de aceite hidráulico y lubricantes, ha sido adaptada por muchos fabricantes para las pruebas semi-automatizado rápida de filtros para el servicio con líquidos acuosos, aceites, u otros fluidos.

El sistema de clasificación Beta es simple en concepto y se puede utilizar para medir y predecir el rendimiento de una amplia variedad de lechadas filtrantes en condiciones específicas. El sistema de clasificación se basa en la medición de las partículas totales, tanto en el afluente como en el efluente. Un perfil de la eficiencia de eliminación viene establecida por el fabricante del filtro.

El valor de Beta está definido así:

$$\beta_x = \frac{\text{Número de partículas totales en el afluente}}{\text{Número de partículas totales en el efluente}}$$

Donde X es el tamaño de la partícula, (micras).

El porcentaje de eficiencia de remoción para un tamaño de partícula dado puede ser obtenido directamente del valor de Beta y puede ser calculado con la siguiente expresión:

$$\% \text{ eficiencia de remocion} = \frac{\beta - 1}{\beta} * 100$$

Tabla 1. Comparación entre el valor de Beta y el porcentaje de eficiencia de remoción.

FILTRO	AFLUENTE	EFLUENTE	RELACION BETA	% EFIENCIA REMOCIÓN
A	10000	5000	2	50
B	10000	100	100	99
C	10000	10	1000	99,9
D	10000	2	5000	99,98
E	10000	1	10000	99,99

Fuente: ARNOLD, Ken. STEWART, Maurice. Surface production operations, vol 1. 3 ed. Houston, 2008, p. 624.

La relación entre los valores de Beta y el porcentaje de eficiencia de remoción se muestran en la tabla 1. Usualmente un Beta= 5000 se puede utilizar como una definición operativa de una calificación absoluta.

3.4 CONSIDERACIONES IMPORTANTES AL ELEGIR UN FILTRO

Entre los factores más importantes que deben tenerse en cuenta al elegir un filtro para una aplicación particular son el tamaño, la forma y la dureza de las partículas a retirar, la cantidad de esas partículas, la naturaleza y el volumen del fluido a filtrar , la velocidad a la que fluye el fluido, si el flujo es constante, variable, y / o intermitente, la presión del sistema y si la presión es constante o variable, la

presión diferencial disponible, la compatibilidad del medio con el fluido, la temperatura del fluido, las propiedades del fluido, el espacio disponible para la recogida de partículas, y el grado de filtración requerido. Vamos a examinar cómo algunos de estos factores afectan la selección del filtro.

3.4.1 Naturaleza del fluido. Los materiales del medio filtrante, del cartucho, y la carcasa del filtro deben ser compatibles con el fluido que se filtra.

Los líquidos pueden corroer el núcleo de metal de un cartucho de filtro o un recipiente a presión, y la corrosión a su vez, contaminar el fluido que se filtra. Por lo tanto, es esencial para determinar si un líquido es ácido, alcalino, acuoso, aceite o a base de disolvente, etc.

3.4.2 Tasa de flujo. La velocidad de flujo a través de un filtro depende de dos parámetros generales, la caída de presión disponible (ΔP) y la resistencia al flujo en el medio filtrante (R). El caudal depende directamente de la caída de presión e inversamente a la resistencia. Por lo tanto, para una constante R , cuando mayor es la presión, mayor será el flujo. Para un P constante, la reducción de la resistencia aumenta el flujo.

La caída de presión puede generarse por diferentes motivos y por lo general se expresa como libras por pulgada cuadrada (psi) o bar. Todos los demás factores son iguales, si la caída de presión disponible para un fluido se incrementa, entonces la tasa de flujo de fluido a través del medio filtrante se incrementará.

La viscosidad es la resistencia de un fluido al movimiento de sus moléculas entre sí; en otras palabras, es una medida del espesor o "capacidad de flujo" de un fluido. Agua, éter y alcohol tienen viscosidades bajas; a diferencia de los aceites pesados que tienen altas viscosidades. La viscosidad afecta la resistencia directamente. Si todas las demás condiciones se mantienen constantes, el flujo a través del medio poroso es laminar duplicando la viscosidad en un sistema de filtro

ofreciendo el doble de la resistencia original al fluir. En consecuencia, a medida que aumenta la viscosidad, la presión requerida aumentara para mantener iguales las tasas de flujo. Centipoises es la unidad de medición de la comparación de la viscosidad de un fluido con la del agua, que tiene una viscosidad de 1 centipoise a 70 °F.

3.4.3 Temperatura. La temperatura a la que se producirá la filtración puede afectar la viscosidad del fluido, la velocidad de corrosión de la carcasa, y la compatibilidad con el medio filtrante.

Los fluidos generalmente se vuelven menos viscosos a medida que aumenta la temperatura. Si un fluido es demasiado viscoso, puede ser aconsejable precalentar el fluido y la instalación de bandas calientes en el filtro. Por lo tanto, es importante para determinar la viscosidad de un fluido a la temperatura a la que se producirá la filtración.

La alta temperatura también tiende a acelerar la corrosión y debilitar las juntas y sellos de la carcasa de los filtros. Muy a menudo los medios filtrantes desechables no pueden soportar altas temperaturas, particularmente durante períodos prolongados de tiempo. Es por esta razón que se debe elegir filtros de materiales inoxidables porosos y filtros lavables.

3.4.4 Caída de presión. La resistencia a fluir a través de un filtro limpio será causada por la carcasa del filtro, el cartucho, y el medio filtrante. Para un fluido de viscosidad dada, cuanto menor sea el diámetro de los poros o aberturas del medio, mayor será la resistencia al flujo. Cuando un fluido encuentra resistencia en un filtro, el resultado es una caída en la presión aguas abajo de dicho filtro, y la medición de la caída de presión a través de este se llama la presión diferencial, o ΔP . Por lo tanto, para todos los propósitos prácticos, el término "de caída de presión", "presión diferencial" y " ΔP " son sinónimos.

Cuanta más resistencia ofrezca el medio al flujo de fluido, mayor será la presión diferencial a flujo constante. Dado que el flujo está siempre en la dirección de la presión más baja, la presión diferencial hará que el fluido fluya. Por lo tanto, es la presión diferencial que mueve el fluido a través del conjunto de filtro y supera la resistencia al flujo y ΔP .

La caída de presión máxima permisible es el límite donde el filtro puede fallar estructuralmente y se debe aplicar presión adicional al sistema para mantener un flujo adecuado. Este límite siempre es especificado por el fabricante del filtro.

En la elección de una fuente de presión, hay que tener en cuenta la resistencia al flujo de los filtros de ambos componentes constantes de resistencia (cuerpo del filtro y del material del equipo) y los componentes de resistencia variable de la torta de filtro y el medio. Como la filtración tiene lugar a flujo constante, habrá un aumento en la caída de presión formado por un componente constante y un componente variable. Finalmente, el componente de caída de presión es cada vez mayor que, o bien el flujo se reduce por debajo de los niveles de diseño, o el filtro está dañado estructuralmente. La caída de presión a través del sistema de filtración se puede reducir aumentando el tamaño del sistema. Esto permite un mayor número de elementos de filtro para ser instalado que a su vez aumenta el rendimiento total.

3.4.5 Área superficial. La vida de la mayoría de las mallas de soporte y de las estructura de medio poroso de los filtros, aumenta considerablemente a medida que se incrementan sus áreas de superficie. Basta una sencilla regla de tres simple para determinar que el área superficial está influenciada a la durabilidad de operación de estos dispositivos.

El beneficio de optar por un conjunto de filtro con una gran área de superficie se puede expresar como sigue:

$$T_1 = T_2 \left(\frac{A_1}{A_2} \right)^n$$

T_1 y T_2 = Volumen de líquido a tratar, (ft³)

A_1 y A_2 = área superficial, (ft²)

n es un factor de extensión de la vida útil entre 1 y 2. Esta variable, n , se acercará a 2, cuando:

- La torta del filtro no es compresible. Si la torta de filtro es compresible, n tenderá a estar más cerca de 1.
- La torta de recogida no se convierta en un filtro más fino que el propio medio (es decir, recoger sólidos más finos a medida que se acumula). En la medida en que la torta de filtro actúa como un filtro más fino que el propio medio, n tenderá a aproximarse a 1.
- Los sólidos recogidos son relativamente uniforme en diámetro de partícula.

De lo anterior es evidente que un aumento en el área superficial producirá al menos un aumento proporcional en la vida de servicio. En circunstancias favorables, la relación de la vida de servicio puede acercarse al cuadrado de la relación de área. En la mayoría de los casos, un usuario del filtro va a ahorrar dinero en el largo plazo, pagando el costo inicial de un conjunto de filtro más grande.

3.4.6 Volumen poroso. El volumen poroso es siempre de gran importancia. Todos los demás factores son iguales; el medio con el mayor volumen de huecos es más conveniente porque va a producir la vida más larga y la más baja caída de presión inicial por unidad de espesor. A medida que el diámetro de la fibra disminuye, aumenta el volumen poroso, asumiendo tamaño de poro constante.

Otros factores, sin embargo como la fuerza que aplica la compresibilidad en presión (que reduce el volumen poroso), la compatibilidad del medio con el fluido que se filtra, el costo del medio filtrante, el costo de la construcción de ese medio en un filtro utilizable, etc., todos deben ser considerados en el diseño de un filtro para una aplicación particular.

3.4.7 Grado de filtración. El filtro elegido para una aplicación dada debe ser capaz de eliminar la suciedad de la corriente de fluido en el grado requerido por el proceso en cuestión. Una vez que el tamaño de los contaminantes a eliminar ha sido determinado, es posible seleccionar un filtro con las características de eliminación de partículas necesarias para hacer el trabajo. La elección de un filtro con un tamaño de poro más fino que la requerida puede ser un error costoso. Recuerde, entre más fina es la filtración, más rápida será la obstrucción y más alto el costo será.

El filtro seleccionado debe ser capaz de retener partículas eliminadas del fluido a tratar. Filtros de estructura no fija cuyos poros pueden aumentar de tamaño a medida que aumenta la presión están sujetos a la descarga. Con los filtros de superficie o filtros de estructura fija, se selecciona un medio que no va a cambiar su estructura bajo estrés producido por el sistema.

3.4.8 Pre-filtración. El propósito de un pre-filtro u otro dispositivo para eliminar partículas de mayor tamaño es para reducir el costo operativo global mediante la ampliación de la vida útil del filtro final. La extensión de la vida del filtro final puede no ser en sí misma suficiente para justificar la filtración previa; pero la reducción de los costos suele ser la principal consideración.

La experiencia de campo indica que para la mayoría de aplicaciones en las que los sólidos son de tamaño uniforme es mejor aumentar el área del filtro final en lugar de proporcionar un pre-filtro. Aumentar el área del filtro final siempre produce

un ciclo más largo y menores costos operativos, y además extenderá la vida útil del equipo en 2 0 4 años más. Por otra parte, la instalación de dispositivos de sedimentación, desarenadores de hidrociclón o filtros de arena de espacios porosos grandes (ubicadas aguas arriba de los filtros diseñados para eliminar las partículas muy pequeñas) es a menudo una solución más económica que aumentar el tamaño del filtro final.

3.4.9 Coagulantes y floculación. La materia suspendida en el agua puede contener partículas muy pequeñas que no se asientan por gravedad o que puedan pasar a través de filtros. Estas partículas pueden ser eliminadas por un proceso de coagulación y floculación. La coagulación es el proceso de desestabilización por la neutralización de la carga, y la floculación es el proceso de reunir a las partículas desestabilizadas o coagula para formar un aglomerado más grande, o floculo.

Los resultados de coagulación y floculación son difíciles de predecir en base a un análisis del agua; por lo tanto, se realizan pruebas de laboratorio para simular la condición de coagulación y floculación. Los datos de laboratorio se usan entonces para determinar la base para el diseño y la operación eficiente. Las pruebas se realizan para establecer:

- El pH óptimo para la coagulación.
- Coagulación más efectiva y la ayuda de la coagulación.
- Dosis y orden en la adición de productos químicos para mejorar la efectiva de coagulación.
- Coagulación y tiempo de floculación.
- Tiempo sedimentación.

Los productos químicos utilizados incluyen:

- El cloro.
- Bentonita (para agua de baja turbidez).
- Coagulantes inorgánicos primarios.
- Productos químicos de ajuste de pH.
- Los polielectrólitos.

La adición de cloro puede ayudar a la coagulación mediante la oxidación de contaminantes orgánicos que tienen propiedades dispersantes. Las aguas con alto contenido orgánico requieren alta demanda coagulante. El uso de cloro antes de la adición del coagulante de alimentación puede reducir la dosis de coagulante requerida.

El término "polielectrólitos" se refiere a todos los polímeros orgánicos solubles en agua utilizados para la clarificación de agua por coagulación. Los polímeros solubles en agua disponibles pueden ser clasificados como tensoactivos aniónicos, catiónicos, o acercarse a carga neutra. Por lo general son de cadena larga, polímeros de alto peso molecular con muchos sitios de carga para ayudar en la coagulación y la floculación. La mezcla violenta de polielectrólitos puede romper las cadenas y hacer que sea menos eficaz. Sin embargo, se requiere algo de mezcla para asegurar que el producto químico y los sólidos entren en contacto. El flujo turbulento en las tuberías proporciona una mezcla suficiente si el producto químico se inyecta aguas arriba, lo suficientemente lejos del equipo.

Los productos químicos pueden añadirse al agua en los clarificadores, que son tanques que tienen mezcladores que causan turbulencia suficiente para crear contacto entre el producto químico y los sólidos. Productos químicos de coagulación / floculación también se pueden añadir en unidades de flotación para ayudar en la fijación de burbujas de gas a las partículas sólidas. Los polielectrólitos añadidos a la corriente de alimentación en las unidades de filtración han demostrado ser eficaces en el aumento de la eficiencia de filtración.

3.5 FILTROS EXISTENTES EN LA INDUSTRIA.

A continuación conoceremos brevemente los diferentes tipos de filtros existentes en la industria y sus principales características.

3.5.1 Filtros de gravedad. Básicamente, este tipo de filtro consiste en un recipiente adecuado que pueda hacerse de madera, cemento o metal y puede ser redonda, cuadrada o rectangular. El agua a filtrar entra en la parte superior del filtro a través de un sistema de distribución. Esto es para facilitar la igualdad de distribución del agua a través de la parte superior del medio filtrante.

El agua entra en aproximadamente 3 a 4 pies por encima de la superficie del medio, y por lo tanto proporciona un arrastre positivo en el filtro. El agua se filtra hacia abajo a través del material filtrante hasta llegar al sistema de drenaje. Dado que este tipo de filtro debe confiar en la fuerza de la gravedad para la operación, por lo general es necesario situar los tanques para el agua cruda o tratada a una altura tal para mantener un arrastre positivo en los filtros en todo momento, o si tal elevación no está disponible una bomba de transferencia float-activado puede ser utilizada; en cualquier caso, normalmente es necesario instalar una válvula de flotador que funciona en la línea de agua de entrada para evitar que desborde los filtros.

Figura 14. Filtro de operación por gravedad.



Fuente: filtro de malla de gravedad, Copersa. Disponible en:

http://www.copersa.com/es/catalogo/odis-filtros-de-malla-de-gravedad/filtros-de-malla-de-gravedad-serie-18800/_p:97/

Una ventaja del filtro de gravedad es la facilidad con la que el medio filtrante puede ser examinado; cualquier problema se puede observar fácilmente, ya sea durante las operaciones de filtración o lavado a contracorriente. La principal desventaja del filtro de gravedad es el hecho de que se requieren bombas adicionales, para transferir el agua de punto a punto en el sistema.

3.5.2 Filtros de presión: El término se aplica a cualquier filtro que opera bajo una presión mayor en comparación al efecto de la gravedad. Los filtros de presión funcionan normalmente de 1 o 2 a 40 psi. Este es el prototipo más común, donde grandes cantidades de agua pueden ser filtradas. El equipo es una carcasa de acero cilíndrica cerrada con fondos cóncavos, que puede medir de 2 a 10 pies de diámetro y puede ser vertical u horizontal. Los verticales son el tipo predominante en los campos petroleros.

El agua entra en el filtro a presión por una línea en la parte superior de la carcasa donde impacta un deflector¹⁸ para evitar descargar directamente sobre la parte superior del medio filtrante. Una de las ventajas del filtro de presión es que se puede utilizar en un sistema cerrado. Otra ventaja es que el filtro de presión es capaz de operar a una tasa mayor, pero no debe ser operado a más de 3 gpm/m² de lecho filtrante en condiciones normales en campos petroleros. Las principales desventajas de un filtro de presión son la incapacidad del personal operativo para determinar el estado del filtro, ya sea durante el proceso de filtración o lavado a contracorriente, de ahí la necesidad de quitar el filtro de servicio para obtener una muestra del medio filtrante o para inspeccionar los sólidos retenidos.

3.5.3 Filtros de cartuchos desechables: Los filtros de cartucho son simples y relativamente ligeros; y pueden ser usados para satisfacer una variedad de requisitos de filtración. Un recipiente de filtro de cartucho típico se muestra en la Figura 15. El agua entra en la sección superior y debe fluir a través de uno de los elementos filtrantes para salir a través de la sección inferior del recipiente. La cabeza superior del recipiente está atornillada de manera que los cartuchos se puedan cambiar cuando la caída de presión a través de ellos alcance el límite permitido. Una válvula de alivio puede ser incluida en el recipiente para evitar la excesiva presión diferencial entre las secciones superior e inferior de la vasija.

Los cartuchos de filtro están disponibles en una amplia variedad de materiales, y que proporcionan una gama de opciones de rendimiento. Los cartuchos están disponibles desde tamaño de partícula de 0,25 micras a cualquier tamaño de partícula más grande.

En la industria de los hidrocarburos, los tamaños más populares son los cartuchos de 50 a 75 micras de diámetro. El cartucho va a ejercer una caída de presión de

¹⁸ Deflector: elemento en forma de plato que cambia abruptamente la dirección de flujo.

aproximadamente 2 psi y en caso de que sea sustituido el diferencial de presión alcanza los 40 psi.¹⁹

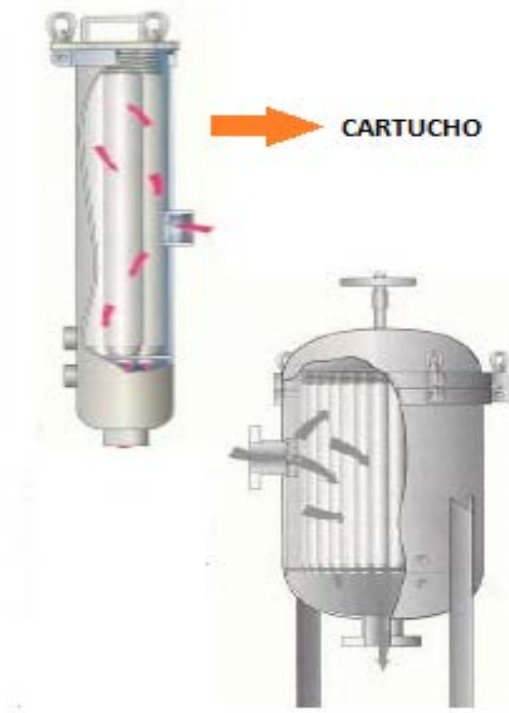
La eliminación de sólidos de los cartuchos de filtro y caudales admisibles varían mucho de un fabricante a otro, incluso si los cartuchos están hechos del mismo material. Por lo tanto, es difícil desarrollar relaciones generalizadas entre la tasa de flujo de agua y el área de filtro. Como resultado, es necesario confiar en la información de los fabricantes en la selección y dimensionamiento de un sistema de filtro de cartucho.

En el diseño de un sistema de tratamiento de agua que incluye filtros de cartucho, puede ser deseable seleccionar una estructura de medio poroso fijo y filtros de clasificación absoluta. Los cartuchos de medio poroso fijo proporcionan eficiencias más consistentes de remoción de partículas de un cartucho a diferencia de los cartuchos de medio poroso no fijas. Además impide la descarga de sólidos y la migración de material filtrante durante los períodos de alta presión diferencial.

Los cartuchos de estructura de medio poroso no fijas se pueden usar, pero la presión diferencial a través de los filtros deben ser monitoreados. Presiones diferenciales altas pueden causar la descarga de sólidos y la migración del medio. Los sólidos de la descarga se puede evitar mediante el uso de un conmutador de alta presión diferencial para controlar continuamente la caída de presión o cambiando los cartuchos cuando la caída de presión es todavía pequeña en comparación con la caída de presión máxima recomendada por el fabricante. El cambio frecuente de los cartuchos puede representar en costos de operación excesivas.

¹⁹ KIRK, Joseph. A review of Waterflood filtration. Society of Petroleum Engineers [en línea], 1964 [citado 5 Enero 2014]. Available from www.onepetro.org: SPE 850.

Figura 15. Esquema filtro de cartuchos.



Fuente: Disponible en: www.gopixpic.com

Puesto que los filtros de cartucho desechables tienen bajas capacidades de saturación de sólidos, es común instalar equipos primarios de remoción de sólidos aguas arriba. Los sistemas típicos incluyen ya sea un hidrociclón o un filtro de arena seguido por el filtro de cartucho. El equipo aguas arriba elimina los sólidos más grandes y reduce la cantidad de sólidos que los cartuchos deben eliminar, por lo tanto, extiende el tiempo entre cambios de cartucho.

Cuando se especifica una unidad de filtro de cartucho, la siguiente información debe incluirse:

- Caudal máximo de agua.
- El tamaño de partícula que se puede remover y el porcentaje de eliminación ofrecido.

- Concentración de sólidos en el agua de entrada.
- Presión de trabajo del filtro.
- Máxima caída de presión disponible.

3.5.4 Filtros de Cartuchos Retrolavables. Están disponibles en una variedad de diseños que utilizan pantallas de metal, cerámica permeable y arena consolidada como medio filtrante. Los filtros de este tipo son simples y ligeros como los filtros de cartucho desechables, pero tienen la ventaja adicional de ser retrolavables. Los medios utilizados en los filtros de retrolavado eliminan partículas entre 10 y 75 micras.

Estos filtros tienen bajos límites de carga de sólidos; por lo tanto, tienen intervalos cortos entre los ciclos de lavado a contracorriente. Es importante no operarlos cuando el diferencial de presión es mayor a 25 psi porque las partículas pueden incrustarse profundamente en los poros dificultando el lavado a contracorriente. Con el mantenimiento adecuado y lavado repetido, este tipo de filtro puede durar hasta dos años.

La regeneración o lavado a contracorriente implica que fluye agua limpia a través del filtro en la dirección opuesta de la filtración normal. A menudo requieren un lavado a contracorriente ácido también. Los sólidos atrapados en el medio filtrante son entonces forzados a salir del filtro y son arrastrados junto al fluido de lavado a contracorriente. Este proceso es más rápido y puede ser menos costoso que el cambio de cartuchos. La velocidad de flujo de fluido requerido para lavado a contracorriente se especifica por el fabricante.

La desventaja de estos filtros es la disposición final del agua contaminada del lavado a contracorriente. Generalmente debe disponerse de tanques o piscina de

almacenamiento para evitar posibles daños ambientales. Las especificaciones técnicas de estos equipos son iguales a las de los filtros con cartucho desechable.

3.5.5 Filtros de medio granular o filtros de arena. Los términos "filtros de medio granular" y "filtro de arena" se refieren a un número de diseños de filtros en la que el fluido pasa a través de un lecho de medio granular.

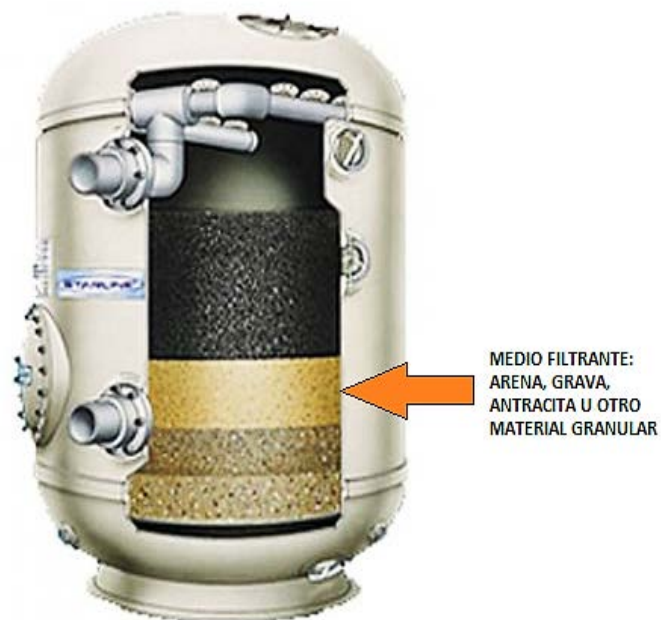
Por lo general, estos filtros consisten en un recipiente a presión lleno del material granular, como se muestra en la figura 16. Es necesario el uso de mallas que sirvan de soporte al material granular o filtrante para evitar que se pierda o sea eliminado por el fluido. Principalmente se utilizan como prefiltros en inyección de agua y en métodos EOR (Enhanced Oil recovery). Raramente se sustituye el medio filtrante o granular.

El agua a filtrar puede fluir ya sea hacia abajo (Down flow) o hacia arriba (Up flow) a través del medio filtrante. A medida que el agua pasa a través del medio granular, los pequeños sólidos son atrapados en los pequeños poros entre las partículas del medio. De acuerdo al diseño, existen 2 configuraciones de filtros de flujo descendente (Down flow): tipo convencional y los de alto caudal. Los convencionales están normalmente diseñados para un rango de caudal aproximado de 1 a 8 gpm/ft² (2,5 a 20 m³/ hr m²), mientras que los de alto caudal pueden tener velocidades de flujo de hasta 20 gpm/ft² (249 m³/ hr m²). La ventaja del filtro de alto caudal sobre el filtro convencional es que, a velocidades más altas, se consigue una penetración más profunda de la lechada, lo que permite una carga de sólidos más alto (peso de sólidos atrapados por pie cúbico de lechada o medio filtrante). La desventaja es que, con una penetración más profunda, el inadecuado lavado a contracorriente puede permitir la formación de grumos de sólidos permanentes que disminuyen gradualmente la capacidad del filtro. Si el ensuciamiento es grave, la lechada debe limpiarse con la utilización de químicos o en su defecto sustituirse. Los filtros de flujo ascendente (Up flow) se

limitan a menos de a 8 gpm/ft² (20 m³/ hr m²) porque las tasas de flujo más altas pueden fluidizar el lecho del medio.

La decisión de utilizar filtros de flujo descendente o de flujo ascendente normalmente se rige por la carga de sólidos suspendidos totales en el afluente y el tiempo preferido entre los ciclos de lavado a contracorriente. Los filtros de flujo descendente se utilizan normalmente cuando el contenido de sólidos suspendidos del afluente está por debajo de 50 mg/l, y los filtros de flujo ascendente se utilizan para una gama de contenido de sólidos en suspensión de 50 a 500 mg/l.²⁰

Figura 16. Filtro de medio granular.



Fuente: Disponible en: www.clasicity.com.ar

²⁰ MORRISSEY, Susan. HASHEMI, Reza. Disposal of filter media used in exploration and production operations. Society of Petroleum Engineers [online], 1992. Available from www.onepetro.org: SPE 24567.

Los filtros de medios granulares deben ser limpiados periódicamente por retro lavado para eliminar los sólidos. El proceso implica la fluidización del lecho para eliminar los sólidos de los pequeños espacios de los poros durante la filtración. El medio filtrante puede ser lavado por el agua que fluye hacia arriba a través del filtro a una velocidad alta o mediante la introducción del agua a través de una boquilla que produce altas velocidades y la turbulencia dentro del recipiente de filtro. Bombas de recirculación se pueden utilizar para inyectar agua a través de la boquilla para disminuir el volumen total de agua requerida.

La distribución del tamaño de poro dentro de un filtro de medio granular es variable, dependiendo de la distribución al azar de los sólidos en el medio filtrante después de lavado a contracorriente. Debido a su tamaño de poro variables, filtros de medios granulares no se puede clasificar como absoluta. Típicamente, estos equipos pueden eliminar aproximadamente el 95% de todas las partículas iguales o mayores a 10 micras; el uso de productos químicos pueden elevar en cierto grado la eficiencia de estos equipos.

El medio granular puede estar hecho de un solo material o de varias capas de diferentes materiales para aumentar la carga de sólidos forzando el agua a través de los poros progresivamente más pequeños. Los más comunes son los de arena y carbón de antracita.

Comentario: El uso de carbón de antracita como medio filtrante está ganando popularidad considerable en el campo de petróleo por varias razones. 1. El carbón es aproximadamente la mitad tan pesada como la arena, lo que significa que la cantidad de medios necesarios se reduce sustancialmente. 2. Los granos de carbón son muy irregulares en forma y ofrecen una mayor superficie por unidad de volumen, que se capturen más flóculos 3. Debido a su peso más ligero se requiere una tasa de lavado a contracorriente inferior para limpiar eficazmente. Por lo general, el carbón de antracita debe tener un tamaño efectivo de 0,5 a 0,6 mm y

un coeficiente de uniformidad de no más de 1,6. La gravedad específica debe ser aproximadamente 1,57. La dureza debe ser 3 a 3,75 en la escala de Mohs. Profundidades normales de medios son el mismo que para la arena (44 a 48 in.) Y están en grados que van desde 1 5/8X13/16 in. Para el grueso a los medios superior, que es de 0,5 a 0,6 mm de tamaño efectivo. Debido que la tasa de lavado a contracorriente para el carbón de antracita es considerablemente menor que la de la arena, el intercambio de un medio para el otro se debe hacer con cuidado y el ajuste adecuado se hará en la tasa de lavado a contracorriente. Una tasa más alta es necesaria para arena y grava.²¹

3.5.6 Filtros de tierras diatomeas. La filtración con tierra de diatomeas (DE) se ha utilizado con eficacia para el tratamiento de agua potable desde 1942 cuando fue adoptado como método estándar para el ejército de Estados Unidos. El filtro de DE fue seleccionada debido a su portabilidad y la eficacia en la eliminación de quistes de Entamoeba histolytica (Negro y Spaulding, 1944). Estos quistes son omnipresentes en algunas partes del mundo y son difíciles de controlar con desinfectantes solos. La capacidad de filtración DE para eliminar eficazmente las partículas se aplica igualmente a las últimas preocupaciones de Cryptosporidium y quistes de Giardia en el traslado de quiste de aproximadamente 6 registros han sido alcanzados (Ongerth y Hutton, 1997). Los filtros DE son comúnmente llamados filtros con pre-capa, debido a la capa preliminar de las hojas de filtro que inicie cada ciclo de funcionamiento. Aunque DE es el material más común usado para la capa preliminar, otro material tal como la planta perlita funciona tan bien en muchas aplicaciones.

²¹ KIRK, Joseph. A review of Waterflood filtration. Society of Petroleum Engineers [en línea], 1964 [citado 5 Enero 2014]. Available from www.onepetro.org: SPE 850.

El uso de acero inoxidable y plásticos en la fabricación de equipo ha cambiado de manera significativa la capacidad de rendimiento de los filtros mediante la mejora de su facilidad de operación y mantenimiento.

DE se extrae de los restos fósiles de plantas microscópicas llamadas diatomeas, depositados en lo que eran las camas de los antiguos océanos. Un medio en polvo se fabrica a partir de los depósitos de diatomita que es sílice casi puro. Uno de los medios de diatomita más comunes usados para tratamiento de agua potable tiene un tamaño medio de partícula de 22,3 micras con el 80% de las partículas que varían en tamaño 5 a 64 micras. Este medio, cuando se deposita en el septum²² del filtro, tiene un tamaño medio de poro de aproximadamente 7 micras.

Operación del filtro DE

Como se ilustra en la Figura 17, las operaciones de un filtro DE se producen en tres pasos²³:

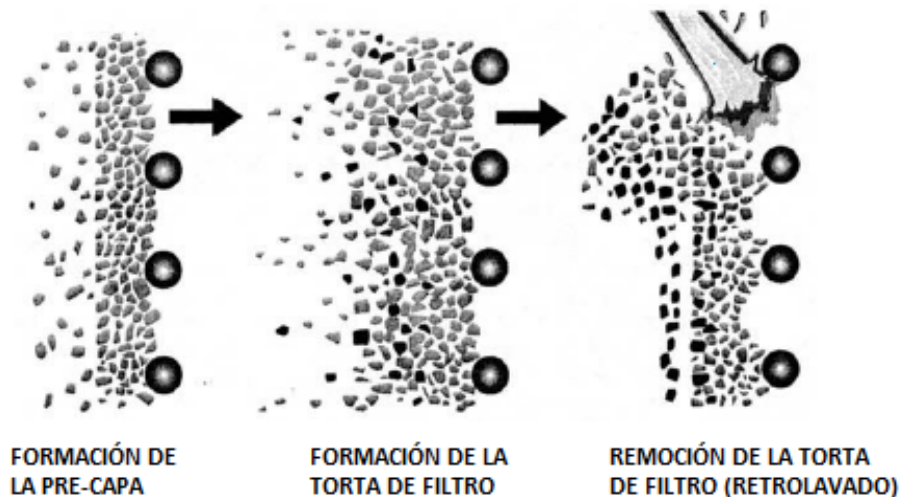
- a) Un recubrimiento previo de aproximadamente 1/8 pulgada (3 mm) se deposita en el filtro. La suspensión se prepara mezclando DE con fluido limpio (agua fresca).
- b) Después que la capa preliminar se ha depositado, el filtrado comienza, y al mismo tiempo se añade una pequeña cantidad de material (llamada body feed) a la fuente de agua para mantener la porosidad y permeabilidad consistente del medio filtrante. Esto es necesario porque los sólidos suspendidos sin filtrar pueden formar una torta impermeable que puede disminuir considerablemente la duración de la filtración.

²² Septum: es el dispositivo que incluye una malla o tejido fibrilar, generalmente una malla de acero inoxidable, y es recubierto por una lámina que la protege del medio hostil dentro del filtro.

²³ COOK, William; YOUNG John. New concept – high density brine filtration utilizing a diatomaceous earth filtration system. SPE 10648. 1982.

- c) Partículas en la fuente de agua están atrapadas en la capa preliminar hasta que se alcanza la máxima caída de presión (ΔP), momento en el cual se termina la carrera de filtración y el material del medio poroso se limpia del septum.

Figura 17. Operación del filtro DE.



Fuente: AMERICAN WATER WORKS ASSOCIATION, AMERICAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS. Water treatment plant design. 4th edition. 2005, p. 235.

Tipos de filtros

Dos grupos o sistemas básicos se encuentran disponibles para los filtros DE. A continuación se mencionan:

- Sistema de filtros a presión: Las principales ventajas de este sistema son:
 1. La capacidad de operar a tasas de aplicación de hasta 3 gpm/ft² (7,8 m/h) requiere un menor número de unidades de filtro para procesar una cantidad dada de agua.
 2. Las unidades de filtración cerradas, generalmente hacen una instalación más limpia con un mínimo de mantenimiento de limpieza.
 3. Una amplia gama de tamaños de unidades

de presión están disponibles, desde pequeñas hasta aproximadamente 3000 ft² (280 m²).

Las principales desventajas del sistema es que tienen un costo relativamente alto, comparado con el de las unidades de filtro y los costos de energía son altos para la operación debido a la presión de funcionamiento.

- Sistema de filtros al vacío: Las principales ventajas del sistema de filtro de vacío son las siguientes: 1. Para las plantas pequeñas, el costo inicial es aproximadamente un tercio del coste de un filtro de presión de acero inoxidable de la misma capacidad. 2. Es fácil observar la acumulación de la precapa y la torta porque la unidad está abierta. 3. La precapa, los ciclos de filtro, y el agua para drenaje pueden ser operadas manualmente porque la unidad está abierta. 4. Operación y mantenimiento de las unidades por lo general requiere menos habilidades.

Las principales desventajas son las siguientes: 1. La tasa de filtración relativamente baja requiere grandes unidades con mantenimiento de presión. 2. Las unidades de filtro deben ser protegidas de la intemperie porque el viento, la lluvia, hielo y la luz del sol perturban la torta de filtro y promueven el crecimiento de algas.

3.6 RECOPIACIÓN DE EQUIPOS REFERENTES A LA TECNOLOGIA EXTRANJERA²⁴

Las compañías de servicios extranjeras ofrecen un catálogo variado de dispositivos dependiendo la necesidad del usuario. El importar esta tecnología al sector petrolero colombiano genera grandes gastos. Enseguida conoceremos las características de los principales equipos en el mercado.

²⁴ JAIMES, Diana y PICO María. Diseño de la planta de tratamiento de aguas residuales y de producción evaluando las diferentes alternativas nacionales y extranjeras-aplicación Campo Colorado, 2009. Pág. 96-132.

3.6.1 Filtro presurizado de arena de bajo caudal marca Unicel. En la tabla 2 se observan las especificaciones de diseño del filtro presurizado de arena de bajo caudal marca Unicel:

Tabla 2. Especificaciones de diseño filtro presurizado de arena de bajo caudal.

MODELO	CAPACIDAD (GPM)	CAPACIDAD (BWPD)
USF-1	70	2 400
USF-2	125	4 300
USF-3	200	6 800
USF-4	300	10 300
USF-5	400	13 700
USF-6	500	17 000
USF-7	650	22 300
USF-8	800	27 500
USF-9	950	32 500
USF-10	1100	37 700
USF-11	1300	44 500

Fuente: www.c-a-m.com/content/pet/index.cfm

Ventajas:

- Excelente remoción de aceites y sólidos.
- Presurizado (10 gpm/ft²).
- Sistemas de montaje móvil: Bajo costo de instalación.
- No hay partes móviles para reemplazar: Bajo costo de mantenimiento.
- Diseños de gas disponibles: No se liberan vapores a la atmósfera.

3.6.2 Filtros marca Metrol Auto-Felt. Los filtros marca Metrol ® Auto-Felt ® están diseñados para proporcionar alta eficiencia de remoción de partículas del

agua bajo una variedad de condiciones. Con tamaño de filtración eficaz de hasta 2 micras, estas unidades de filtro son notables por su bajo peso, mínimas necesidades de mantenimiento y capacidades de eliminación de partículas. La unidad viene con una capacidad de retrolavado, que puede operar ya sea en automático o el modo manual.

Beneficios y Ventajas

- Alta eficiencia con sólo un pequeño componente químico
- Bajo costo de mantenimiento.
- Alta eficiencia de retrolavado con bajo uso de agua.
- Retrolavado automático, mientras está en línea.
- Bajo peso y mínimas necesidades de espacio.

3.6.3 Filtros duales marca Metrol. Es un filtro de paquetes modulares para la eliminación de materiales suspendidos de pequeñas dimensiones en altos flujos de filtración. Los filtros duales marca Metrol proporcionan la remoción de partículas en condiciones de altas tasas de filtración, usando capas de antracita y partículas de granate como el medio filtrante; estas unidades logran hasta un 98% de eliminación por debajo de 2 micras, y se diseñan de acuerdo a las necesidades del cliente. Estos incluyen una característica de retrolavado automático que emplea una combinación de aire y agua para mantener la eficiencia de la unidad.

Beneficios y Ventajas

- Paquetes diseñados para cada cliente.
- Retrolavado automático.
- Alta eficiencia de filtración garantizada.
- Capaz de operar a muy altas tasas de flujo.

- Protección absoluta de los filtros.

Aplicaciones

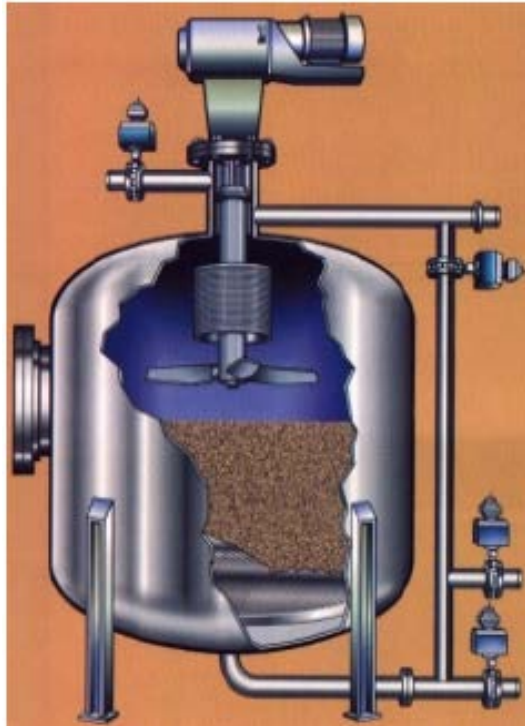
- Sistemas de inyección de agua.
- Calderas para agua de alimentación.
- Enfriamiento de agua de filtración.

3.6.4 Filtros de cáscara de nuez marca Hydromation. Filtros con cáscara de nuez de alto rendimiento para procesos de purificación de agua aceitosa y aguas residuales industriales.

Los filtros con cáscara de nuez marca Hydromation ® son para bajo flujo, donde ésta actúa como medio filtrante. A medida que el líquido pasa a través de este medio, el petróleo y los sólidos son retenidos de manera eficiente, y puede entonces ser fácilmente retrolavado el lecho. Este proceso de retrolavado es la mejor tecnología disponible para fluidizar el lecho, permitiendo así la fabricación de grandes unidades de flujo horizontal. No se requieren productos químicos ni surfactantes para el retrolavado.

Estos filtros dan el doble de la eficiencia de rendimiento de los lechos convencionales de arena. En condiciones normales de funcionamiento, elimina de 95 a 99% de sólidos en suspensión, y de 90 a 99% de hidrocarburos insolubles sin la utilización de productos químicos.

Figura 18. Filtros con cáscara de nuez marca Hydromation.



Fuente: www.c-a-m.com/content/pet/index.cfm

El ciclo de lavado previene que se acumule la suciedad en el filtro. Este ciclo de lavado se inicia automáticamente, cada vez que el filtro se carga de suciedad y se reporta un cambio en la presión diferencial a través de éste, o una señal automática de tiempo la cual activa el retrolavado. El diseño actual incorpora la alta intensidad de un mezclador para agitar vigorosamente el lecho durante el ciclo de lavado.

Características

- Remueve del 95% - 98% de sólidos superiores a 2 micras.
- Retiro del 90% - 95% de aceite (hidrocarburos insolubles).
- Permanentes diseños con cáscara nuez como medio filtrante lo cual reduce los costos de operación.

- Altas tasas de flujo: Doble arena o filtros de técnica mixta, minimiza el área necesaria para el filtro.
- Mejoramiento de diseño de retrolavado utilizando la mezcla minimiza los volúmenes de agua de retrolavado.
- Múltiples tamaños y modelos que manejan flujos de 100 gpm a 12000 gpm (23 m³/hr a 2730 m³/hr).

Aplicaciones

- Sector petrolero: Descarga de agua producida.
- Sector petrolero: Inyección de vapor de agua de las inundaciones.
- Sector petrolero: Filtración de agua de mar para el agua de inundación.
- Refinerías: Filtración de aceite de aguas residuales y de refrigeración.
- Proceso de clarificación de agua.
- Las centrales eléctricas: Torre de enfriamiento de agua.
- Plantas químicas: Protección y clarificador de desbordamiento.
- Recuperación de suelos: Aceite de agua subterránea.

Beneficios y Ventajas

- Proveen confiabilidad con muchas unidades que operan en todo el mundo en una amplia variedad de aplicaciones.
- Ciclos de lavado impiden la acumulación de suciedad en el filtro.
- Energía eficiente: Alta eficiencia minimiza el mantenimiento y el tiempo de inactividad.
- Reduce los costos de explotación.

- Genera un mínimo de 40000 gpm de la tasa de bombeo con sólo una pequeña cantidad de caballos de fuerza en el motor.
- El volumen de retrolavado es típicamente 0,5-1% de rendimiento para que el volumen de residuos sea mínimo.
- Más del 99% de rendimiento anualizado.

Gama de productos

- Estos sistemas de filtración dan el doble de rendimiento que los filtros convencionales.
- Modelos Horizontales y verticales disponibles.
- Petreco construye diez (10) modelos estándar vertical y seis (6) estándar horizontal.
- Los modelos verticales proporcionan un caudal de 70 gpm a 2800 gpm por unidad, mientras que los modelos horizontales proporcionan caudales de 1200 a 12000 gpm por unidad, cada uno en función de la solicitud necesaria.
- Las unidades son pre-ensambladas en la fábrica y pueden ser enviadas hasta el lugar de trabajo, montados en sistemas rodantes, listas para su instalación.
- Por otra parte, los tamaños más grandes pueden ser personalizados diseñados para satisfacer las necesidades de cada proyecto específico.

Rendimiento

En condiciones normales de funcionamiento, elimina del 95 a 99% de sólidos en suspensión, y 90 a 99% de hidrocarburos insolubles, sin la utilización de productos químicos. El mezclador proporciona un ahorro de más del 85% en el consumo de energía para el ciclo de retrolavado. También permite alta eficiencia de lavado que se hace dentro del filtro, lo que reduce los requisitos externos para válvulas,

tuberías, y la baja eficiencia de bombas de recirculación. Este diseño también proporciona un mayor ahorro en los costos de capital de equipamiento. La alta eficiencia minimiza el mantenimiento y el tiempo de inactividad. El diseño Hydromation, sistema con cáscara de nuez, asegura una máxima eficiencia y bajos costos de operación.

3.6.5 Filtros de cáscara de nuez marca Sabian. La tecnología de filtros marca SABIAN™, presenta una solución que sea creíble, competitiva y simple de operar y mantener. De este modo, se puede proporcionar ayuda para tener un mayor retorno sobre la inversión realizada, a objetivos de valor mínimo deseado aceite en agua y sólidos suspendidos totales (SST).

El objetivo de los filtros es limpiar suficiente el agua para las aplicaciones, y para eliminar las gotas de tamaño más pequeño posible. Estas aplicaciones pueden incluir la inyección en formaciones, precipitación química, ablandamiento, reducción de sílice, generación de vapor o el vertido directo. La filtración con cascara de nuez es una tecnología que utiliza la cascara de nuez para una gran zona de adsorción, con fácil adherencia de petróleo en la superficie de la misma. La exhibición de buena capacidad de retención de sólidos y la presencia de aceites incrementa la eficacia de eliminación de sólidos. Las conchas seleccionadas son de origen de cascara de nuez negra, a diferencia de la nuez inglesa, que es mucho más difícil de manejar en la filtración.

Los filtros BSW Sabian son capaces de manejar una gran variedad de caudales y pueden realizarse en una amplia variedad de situaciones. El beneficio de esta flexibilidad es la capacidad para diseñar el funcionamiento óptimo de las directrices de este proceso para la aplicación sobre el terreno.

Figura 19. Cáscara de nuez utilizada por los filtros Sabian.



Fuente: www.glr solutions.com/articles/cache/

Características

- Con el filtro Sabian la única pendiente de diseño, no es el tiempo necesario para retrolavado, ni el volumen de retrolavado debido a que es bajo y los patrones de flujo son tales que la superficie de filtración está optimizada, pero no se tiene un arreglo de zonas muertas que se producen durante el proceso de retrolavado.
- El filtro está dividido en el tanque en varias cámaras de tamaño igual. Las configuraciones de 2-4 están en función del caudal requerido para tratamiento. Varias salas de operaciones están dedicadas a una cámara, mientras permanece en el modo de disponibilidad siempre para recibir la entrada de agua cuando un ciclo de retrolavado comienza. Cada cámara pasa a través de un ciclo de rotación a fin de que cada cámara alterne su función de reserva.

Beneficios y Ventajas

- Bajo volumen de retrolavado.
- Los medios se limpian dentro de sí mismo del filtro y no es necesaria una transferencia fuera.
- No es necesaria rotación de los equipos, es decir la bomba de retrolavado o mezcladora.
- Reduce los costos operativos pues no es necesaria una bomba de retrolavado con gran poder.
- Simple filosofía de control, fácil de operar con alta fiabilidad.
- Los medios tienen un medio de vida más largo que los competidores de los productos que utilizan distintas cascaras de nuez negra.
- Construido con múltiples cámaras de diseño que incorpora una cámara de repuesto, por lo tanto no se requiere el aumento de la capacidad aguas arriba y también deja espacio para aumentar en el futuro si se manejan flujos adicionales previstos.

Propiedades del lecho filtrante

- Humectabilidad óptima para coalescencia del petróleo.
- No requiere largo plazo de coalescencia de petróleo para los medios para permitir la limpieza eficaz.
- Densidad específica similar a la de toma de agua de retrolavado, lo que hace una agitación eficaz.
- Homogeneidad de tamaño de las partículas.

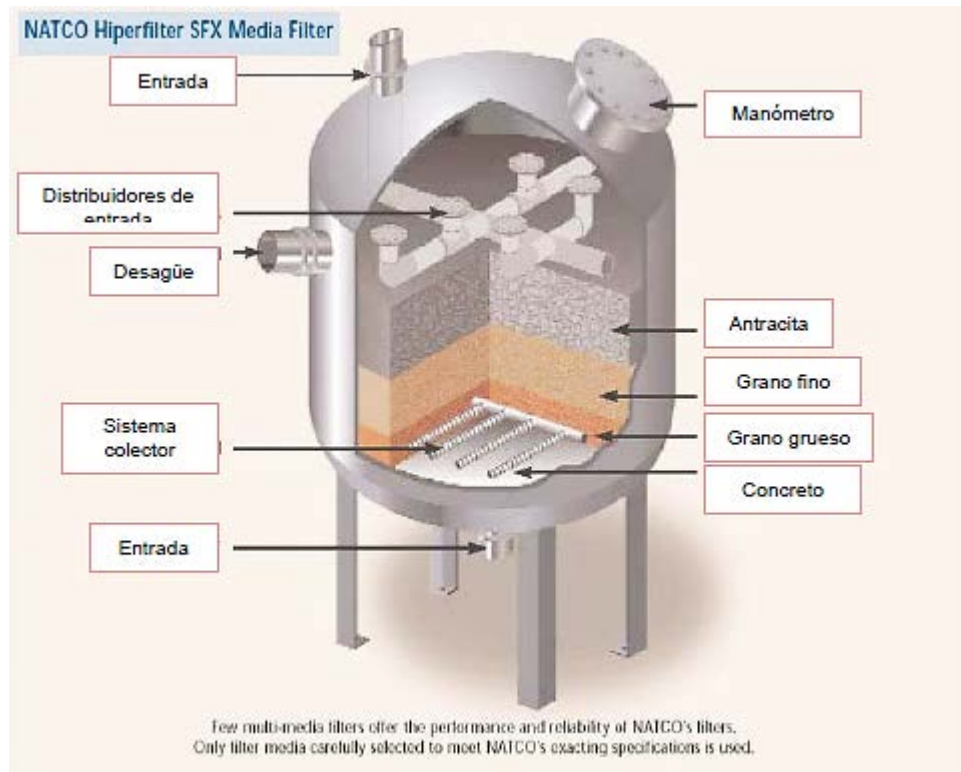
3.6.6 Filtro marca SFX. El filtro marca SFX ofrece todos los beneficios de doble filtro, específicamente para aplicaciones con altas cargas de sólidos. El diseño de la distribución superior e inferior elimina los puntos muertos y los problemas de

canalización, la falta de agua/calidad del efluente y la pérdida de los medios de filtración; a menudo se encuentran en menores diseños. Debido a la flexibilidad en el diseño de los filtros, las unidades pueden ser configuradas para lograr las cualidades del agua con eficiencia de eliminación de hasta el 98%.

Características

- Se requiere un bajo nivel de asistencia de operadores, lo que reduce sustancialmente los gastos de funcionamiento general y ofrece un ambiente de trabajo más seguro.
- El filtro SFX da un 30% más de ahorro de peso de más de los filtros convencionales y están diseñados para aplicaciones donde el espacio y el peso se encuentran en consideraciones primordiales, tales como las plataformas off-shore.
- También pueden ser utilizados para mejorar las instalaciones existentes, aumentando la capacidad que se requiere sin la adición de nuevos tanques.
- En caso de que el agua debe ser tratada en tierra, para reinyección o vertimiento en una zona ecológicamente sensible, el filtro marca SFX se puede usar y llegar a tener niveles por debajo de 5 ppm a la salida.
- En aplicaciones de gran capacidad, por lo general, más de 300000 bls/día, aproximadamente 2000 m³/hr, donde los grandes tanques de filtros verticales son poco prácticos, los filtros horizontales están disponibles. Diseñados con los mismos principios, normas y alta eficiencia que los filtros verticales, los filtros horizontales ofrecen al cliente una flexibilidad de configuración para satisfacer sus necesidades específicas.
- El tanque interno puede ser fabricado a partir de 316L y Super Duplex de acero inoxidable, titanio o 254 6Mo, haciéndolos ideales para los más duros de entornos.

Figura 20. Filtro marca SFX

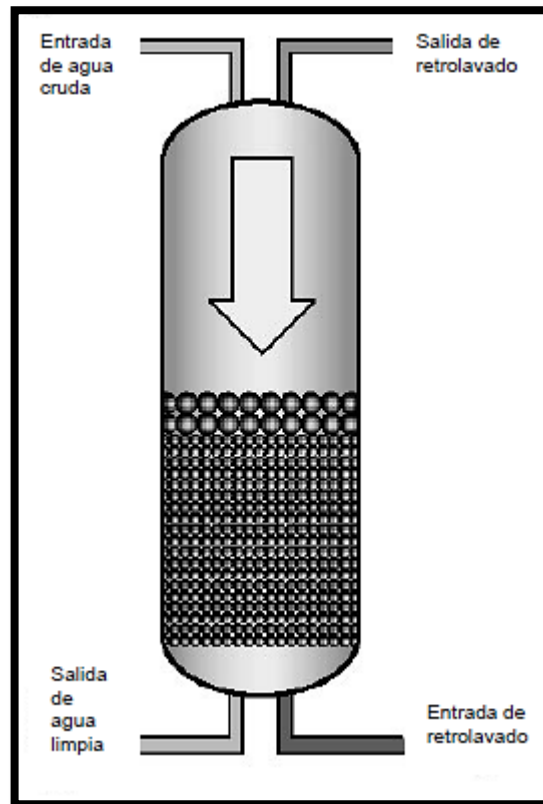


Fuente: www.natcogroup.com

3.6.7 Filtro de único flujo marca SFX. El filtro SFX™ de tratamiento químico es un diseño eficaz en la filtración de flujos bajos que combina la eficiencia del proceso de alta con la sencillez de operación y mantenimiento. Múltiples grados de filtración de los medios permite la eliminación eficiente de sólidos.

En el filtro SFX™, el agua cruda entra por la cima del equipo y fluye a través de una capa gruesa de carbón a una capa de granate y sale por la parte inferior a través de un sistema de desagüe. El sistema de filtro SFX™ puede manejar las tasas de flujo a 20 gpm/ft².

Figura 21. Filtro SFX de único flujo.



Fuente: www.natcogroup.com

Los revestimientos al interior están disponibles en varios materiales para una amplia gama de fluidos corrosivos. En caso de no tener ciertos revestimientos internos pueden ser fabricados o enchapados con aceros aleados.

Características

- El agua de retrolavado entra en el equipo a través de la parte inferior, fluidiza los medios de filtración y sale por la parte superior.
- Una capa gruesa superior impide formar una torta de sólidos sobre la superficie reduciendo así los requisitos de retrolavado. El alto flujo de

retrolavado utilizado por lo general durante el desgrasado no es necesario en este filtro.

- El sistema de filtrado SFX TM está diseñado para una fácil instalación. Controladores lógicos programables por el usuario están disponibles para el funcionamiento automático.
- Se han estandarizado los sistemas de filtrado para una amplia gama de tipos de proceso de flujo. Sin embargo, los sistemas de SFX TM pueden ser personalizados para necesidades especiales, incluidos los flujos de proceso único, filtro de los arreglos en serie o paralelo, etc.

Aplicaciones

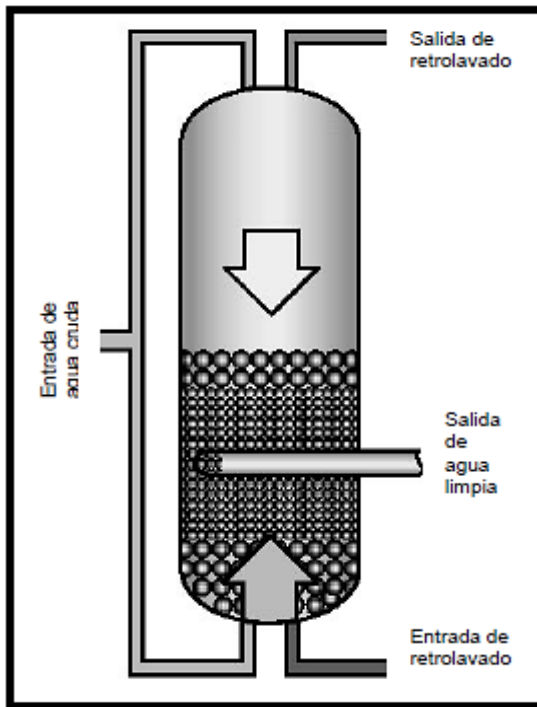
- Sólidos con petróleo humedecido.
- Sólidos estabilizados con gotas de aceite.
- Sólidos biológicos y aguas residuales.
- Precipitados y escalas.
- Arcilla y partículas minerales.

3.6.8 Filtro de doble flujo marca DFX. El filtro DFX de doble flujo, representa la tecnología avanzada de filtrado de líquidos contaminantes de las aguas de proceso. El filtro combina flujo arriba y abajo con filtración multimedia a través de un lecho.

El agua entra tanto en la parte superior e inferior del equipo y pasa a través de medios finos (lecho). El agua de la parte superior pasa a través de una capa gruesa de carbón a una de granate. El agua de la parte inferior pasa a través de una capa gruesa de granate a una capa fina de granate. El agua filtrada sale del equipo cerca de la mitad de los medios a través de una serie porosa lateral.

En la siguiente figura se señalan los principales componentes de un filtro de doble flujo marca DFX:

Figura 22. Filtro de doble flujo DFX



Fuente: www.natcogroup.com

El filtro DFX se encarga de filtrar hasta 40 gpm/ft². Eso es tanto como dos veces el flujo competitivo a través de los filtros de medios granulares. A solo 10" de diámetro puede manejar hasta 4,5 millones de gal/día, dependiendo del tamaño y el tipo de material que debe eliminarse.

Características

- Elimina partículas de dos micras de tamaño o más grandes. Con el pretratamiento químico se eliminan las partículas de una micra de tamaño o más grande.

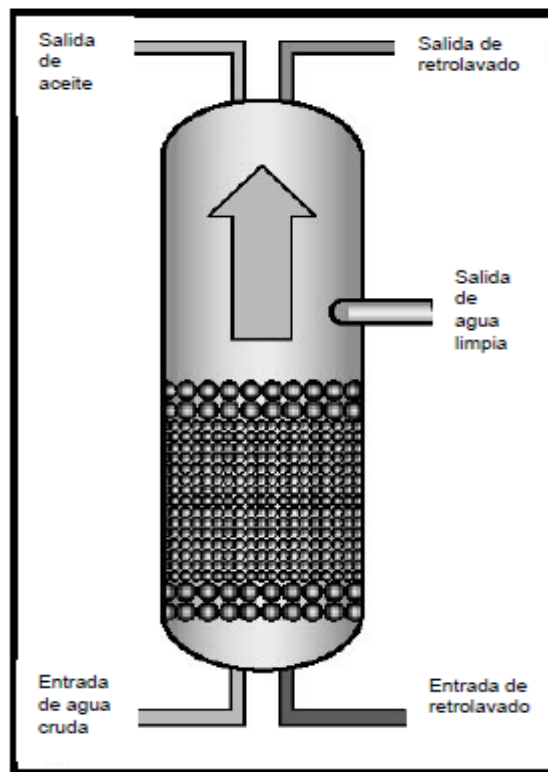
- Las capas gruesas en la parte superior e inferior del filtro permiten una filtración más profunda. Como resultado de ello se requiere retrolavar con menos frecuencia. Además, el agua cruda puede ser utilizada para el lavado de nuevo, el agua limpia almacenada se elimina.
- El alto caudal disponible con DFX™ significa un menor número de unidades más pequeñas obligatorias. El resultado final es un ahorro sustancial en gastos de capital, reducción de peso y de espacio para, válvulas, tuberías y equipos de control.
- El interior de los revestimientos están disponibles en varios materiales para una amplia gama de fluidos corrosivos. En caso de que los revestimientos internos no sean prácticos, el tanque DFX™ puede ser fabricado o enchapado en aceros aleados.
- El sistema de filtrado DFX™ está diseñado para una fácil instalación. Controladores PLC están disponibles para el funcionamiento automático. La fabricación y sitio de programación está disponible para satisfacer las necesidades de proceso.

Aplicaciones

- Sólidos con petróleo humedecido.
- Sólidos estabilizados con gotas de aceite.
- Sólidos biológicos y aguas residuales.
- Precipitados y escalas.
- Arcilla y partículas minerales.
- Cenizas volantes.

3.6.9 Filtro doble de flujo vertical marca VFX. Proporciona sistemas de filtración de separación múltiples en un solo equipo ofreciendo máxima recuperación. El exclusivo filtro VFX™ filtro vertical de sólidos/aceite es un proceso de acondicionamiento que recupera el agua libre, dispersa y emulsiona aceites, y quita los sólidos en suspensión del agua de producción, todo ello en un solo tanque.

Figura 23. Filtro doble de flujo vertical VFX.



Fuente: www.natcogroup.com

El filtro VFX™ utiliza un sistema de medios de filtración granular para filtrar los sólidos que se unen a las emulsiones de aceite. Esto ofrece un ahorro significativo sobre el espacio y la instalación, reflejándose en la reducción de capital. Incorporado en el sistema se tiene el retrolavado granular coalescente en los

medios de filtración que elimina el alto costo de la sustitución y el mantenimiento de cartucho.

El petróleo recuperado proporciona una recuperación de la inversión sobre la inversión inicial, independientemente de que se utilicen para la energía in situ, reutilizados en el proceso, o vendidos.

El filtro VFX™ proporciona la eliminación del petróleo y la recuperación de 98% o más, en rangos de hasta un máximo de 9 gpm/ft². Ha demostrado ser eficaz en numerosas aplicaciones:

- Disposición aceite/agua en aplicaciones de la industria del petróleo.
- Eliminación de orgánicos y sólidos suspendidos en los sistemas de extracción por solvente para la industria de la minería.
- Limpieza de hidrocarburos de petróleo y el agua subterránea contaminada.
- Se recomienda el filtro VFX™ para caudales de 2,5 a 7,5 gpm/ft².

Características

- Cuando el proceso lo requiere y/o cuando la diferencia de presión a través de los medios de filtración aumenta debido a que aumenta la carga de sólidos, los medios de filtración son retrolavados de una manera similar a la de un filtro convencional de arena. Durante el retrolavado, el agua entra en la distribución de cabecera lateral para evitar la canalización. El agua fluye hacia arriba a través de los medios, expandiéndose alrededor del 30. La duración del retrolavado en general requiere menos de 15 minutos. Después de un ciclo de retrolavado el efluente puede ser reciclado hasta que la calidad del efluente se estabilice. Las altas tasas de flujo que se utilizan durante el retrolavado en el desgrasado de los filtros VFX™ son innecesarias.

- Proporciona un coalescedor, filtro de aceite y/separador de agua en el tanque para reducir el espacio y costos de instalación.
- El filtro VFX™ utiliza un sistema granular de retrolavado que tiene una vida indefinida, en contraste con otros medios.
- Tapones de puro petróleo son fácilmente manipulados por el sistema de filtro VFX™. El diseño de cama profunda tiene una alta capacidad de retención de los sólidos lo que requiere menos retrolavado.
- El sistema es automatizado por lo general, eliminando así la necesidad de personal de operación. Controladores de lógica programable se encuentran disponibles y el sitio de programación para adaptarse a requisitos del proceso.
- Los sistemas pueden ser montados sobre patines para la reducción de los costos de instalación y rápida puesta en marcha.

3.6.10 Filtro marca Suretrap. Están diseñados para eliminar la suciedad, a escala de gasoductos, y otros contaminantes sólidos de líquidos en el proceso. Proporciona la mayor superficie de filtración para un determinado tamaño. Esto aumenta la capacidad de retención de suciedad, reduce al mínimo la caída de presión y extiende la vida de servicio.

Los filtros marca SureTrap™ son una composición de materias inorgánicas; compuesto de microfibras de diversos diámetros de la sección transversal diseñado para maximizar la eficiencia y la capacidad de retención de suciedad y reducir al mínimo la caída de presión. La correcta relación de los diferentes diámetros de fibra se mezcla para producir una matriz con el deseado tamaño de poro.

La eficiencia de los filtros marca SureTrap™ se mide en β . Calificación beta es una medida de los elementos de eficiencia para eliminar las partículas más

grandes que un tamaño especificado del fluido de proceso que está representado por el SSX. El valor se determina por:

$$SSX = Nu/Nd$$

Nu =Número de partículas por unidad de volumen de líquido aguas arriba del filtro, (micras).

Nd =Número de partículas por unidad de volumen de líquido aguas abajo del filtro, (micras).

Este método de ensayo ha sido internacionalmente aceptado para la presentación de informes de eficiencia de filtración, ya que proporciona datos de prueba reproducible para evaluar el rendimiento de la filtración de un elemento filtrante. Este sistema es importante porque todos los filtros que se clasifican de esta manera se han evaluado de acuerdo con un sistema estándar. Esto permite un grado razonable de las expectativas de rendimiento por el filtro con elementos equivalentes a las puntuaciones beta.

Datos operativos

- ΔP inicial recomendada: <2 psi
- Cambio ΔP : 20- 25 psi
- Temperatura máxima de funcionamiento: 300 ° F aprox.

Ventajas

- Un rendimiento fiable, absoluta eliminación de sólidos a cualquier micrón de tamaño especificado.

- Alta Integridad, construcción de poro fijo impide que las partículas se emitan de nuevo en el flujo de líquido durante el flujo o aumentos de presión repentinos.
- Vida más larga y unos costos más bajos, con gran superficie se tiene alta capacidad de retención de suciedad.
- Capacidad de productos químicos, estos medios de filtración son compatibles con la mayoría de procesos de fluidos y productos químicos.

3.6.11 Filtros con cáscara de nuez marca Silver Band. Los filtros Silver Band poseen un buen rendimiento para la corriente por el filtro de cáscara de nuez. Puede eliminar típicamente 98% de los sólidos en suspensión y los hidrocarburos insolubles en la mayoría de las aplicaciones.

La limpieza se realiza mediante un proceso de bombeado y fluidización de petróleo y contaminantes en los medios. Este proceso elimina la necesidad de usar desnatado gas/petróleo, tensoactivos, o grandes volúmenes de agua de retrolavado.

El diseño de este filtro proporciona una eficiencia mayor en la separación de aceite y contaminantes sólidos de los flujos de líquido. En el sistema, el acero inoxidable soporta la pantalla la cual se encuentra en la parte inferior del tanque. Una boquilla de fluidización se sitúa en la parte superior central del filtro y se extiende hasta la parte inferior del medio. Dentro de la fluidización se encuentra la boquilla de acero inoxidable la cual se encarga de lavar la pantalla. Esta pantalla permite salir el líquido sucio, pero mantiene el medio.

El diseño simple y automático del sistema se traduce en bajos costos por varias razones:

- El sistema requiere menos espacio que otros sistemas de bombeado de fluidización en filtros de lecho profundo.

- La tasa de flujo del diseño de 13,5 a 15 gpm/ft² requiere filtros pequeños y en menor cantidad para aplicaciones de altos caudales.
- Los filtros usan agua cruda de entrada para la regeneración, eliminando la necesidad de uso de agua limpia para el retrolavado de los tanques de almacenamiento.
- Cada filtro contiene su propia bomba de retrolavado, eliminando la necesidad de bombas grandes auxiliares de retrolavado, tuberías asociadas y controles.
- No son normalmente requeridas sustancias químicas para mejorar la eficacia de eliminación o limpieza de los medios durante la filtración o la regeneración.

3.6.12 Filtros de carbón activo. Constituyen la mejor elección para la decoloración del agua, para la eliminación de plaguicidas, herbicidas, materia orgánica, geosmina, etc., presentes en el agua a tratar.

Se tiene a disposición del mercado una línea de filtros de carbón activo, formada por tres series diferentes:

SERIE FMC

Características

- Tanque construido en vinilester protegido interiormente por una funda de polietileno.
- Capacidades de producción: desde 1,1 m³/h hasta 3 m³/h.
- Carbón activo granular de alta capacidad y baja pérdida de carga.
- Válvula multivía, construidas en Noryl o bronce, en función del modelo.

SERIE FPC

Características

- Tanque construido poliéster reforzado con fibra de vidrio.
- Capacidades de producción: desde 3,3 m³/h hasta 17,5 m³/h.
- Carbón activo granular de alta capacidad y baja pérdida de carga.
- Válvulas automáticas de maniobra neumática, de membrana o de mariposa, en función del modelo, para dirigir el agua por los diferentes circuitos necesarios para las operaciones de servicio y lavado.

SERIE FIC

Características

- Tanque construido en acero protegido interior y exteriormente por una pintura epoxi.
- Capacidades de producción: desde 18,4 m³/h hasta 106 m³/h.
- Carbón activo granular de alta capacidad y baja pérdida de carga.
- Válvulas automáticas de maniobra de mariposa, para dirigir el agua por los diferentes circuitos necesarios para las operaciones de servicio y lavado.

3.6.13 Filtros bicapa y tricapa. Estos equipos de filtración tienen capacidades de producción unitarias desde 0,4 m³/hr hasta 140 m³/hr, en la gama estándar, que permiten la eliminación de sólidos en suspensión, otros contaminantes presentes en el agua bruta, así como permiten la reducción del SDI como pretratamiento en instalaciones de ósmosis inversa.

FILTROS BICAPA

Constituyen la mejor elección para conseguir un elevado grado de filtración usando filtros de presión, además de trabajar con velocidades de filtración

elevadas. Son, además, una especial garantía para reducir el SDI cuando se usan como pretratamiento en instalaciones de ósmosis inversa.

Pone a disposición una línea de filtros bicapa, formada por dos series diferentes:

SERIE FPAB

Características

- Filtro con tanque construido en poliamida.
- Capacidades de producción desde 2,1 m³/h hasta 12,3 m³/h.
- Válvulas automáticas de maniobra neumática, de membrana o de mariposa, en función del modelo.

SERIE FIB

Características

- Filtro con tanque construido en acero, protegido interior y exteriormente por una capa de epoxi.
- Capacidades de producción desde 12,3 m³/h hasta 70,7 m³/h.
- Válvulas automáticas de maniobra neumática, o de mariposa, en función del modelo.

FILTROS TRICAPA

Constituyen la mejor elección para conseguir un elevado grado de filtración usando filtros de presión, además con la ventaja de trabajar con velocidades de filtración elevadas. La elección de las granulometrías y la ingeniería del diseño permiten la floculación en línea lo que aumenta el grado de filtración hasta las 20 micras.

Son, además, una especial garantía para reducir el SDI cuando se usan como pretratamiento en instalaciones de ósmosis inversa. Pone a disposición del mercado una línea de filtros tricapa, formada por tres series diferentes:

Figura 24. Filtros bicapa y tricapa.



Fuente: www.veoliawaterst.es/es

SERIE FMT

Características

- Tanque construido en vinilester protegido interiormente por una funda de polietileno.
- Capacidades de producción desde 0,7 m³/h hasta 4,4 m³/h.

- Válvula multivía para las operaciones de servicio, retrolavado y aclarado. La serie FMT tiene, además una gama manual y otra para agua caliente.
- Tres capas filtrantes principales (antracita, sílex y granate) y 3 gravas de soporte para evitar la fuga del mineral filtrante y distribuir el flujo durante la etapa de retrolavado.

SERIE FPAT

Características

- Tanque construido en poliamida.
- Capacidades de producción desde 4,3 m³/h hasta 24,5 m³/h.
- Válvulas automáticas de maniobra neumática (de membrana o mariposa según modelo).
- Tres capas filtrantes principales (antracita, sílex y granate) y 3 gravas de soporte para evitar la fuga del mineral filtrante y distribuir el flujo durante la etapa de retrolavado.

SERIE FIT

Características

- Tanque construido en acero, protegido interior y exteriormente por una capa de epoxi.
- Capacidades de producción desde 18,4 m³/h hasta 106 m³/h.
- Válvulas automáticas de maniobra neumática de mariposa.
- Tres capas filtrantes principales (antracita, sílex y granate) y 3 gravas de soporte para evitar la fuga del mineral filtrante y distribuir el flujo durante la etapa de retrolavado.

3.6.14 Filtros marca Hydrotech. Los filtros marca HYDROTECH son un sistema de filtración superficial por gravedad de gran eficacia y versatilidad, que utiliza microtamices para la eliminación de sólidos en suspensión y turbidez. Son filtros de gran capacidad de tratamiento en un reducido espacio de trabajo. Así, por ejemplo, 108 m² de área de filtración, tan sólo requieren 13,6 m² de superficie de implantación.

Ventajas y beneficios

- Amplio rango en la concentración de sólidos del agua a tratar.
- Malla filtrante desde 10 a 1000 micras, según aplicación.
- Equipos con caudales de producción desde 10 a 5400 m³/h.
- Diseño compacto que requiere hasta un 75% menos de superficie de trabajo comparado con un filtro convencional de arena.
- Bajos costos de inversión, gracias al diseño compacto.
- Minimización de los costos de energía, ya que la filtración se realiza por gravedad.
- Funcionamiento en continuo, incluso en fase de lavado.
- Muy fácil accesibilidad a todos los elementos del filtro.
- Fácil operación y mantenimiento.

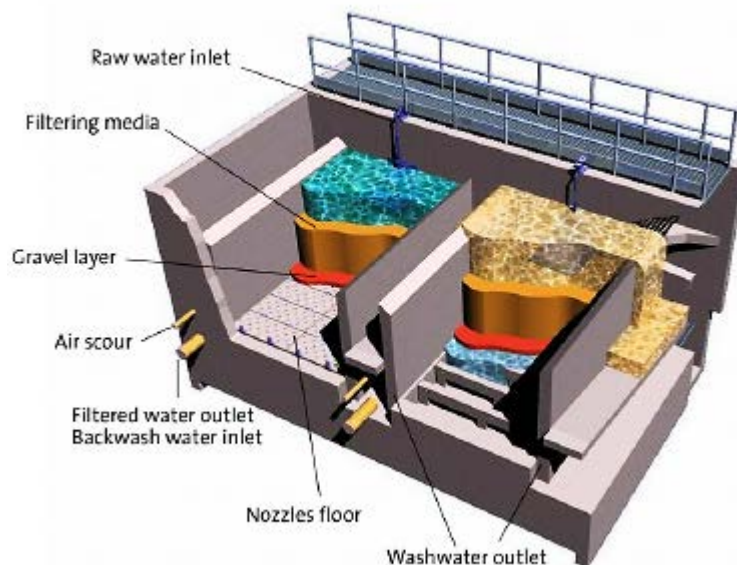
Aplicaciones

- Tratamiento terciario de aguas residuales municipales.
- Pretratamiento agua potable.
- Tratamiento agua de tormentas.
- Tratamiento de agua de procesos industriales.

3.6.15 Filtro marca Filtraflo. Todos los filtros marca Filtraflo™ emplean el mismo principio básico que implica una filtración rápida gravitacional de agua cruda a través de los medios granulares. El filtrado está compuesto de una o dos capas.

Dependiendo de la calidad de las aguas a ser tratadas y de los objetivos del filtrado, diferentes medios para filtrar pueden ser empleados: arena, carbón activado, antracita, piedra pómez, shale, caliza, etc.

Figura 25. Configuración del filtro Filtraflo.



Fuente: www.veoliawaterst.com/solutions

Los filtros Filtraflo™ se diferencian por sus características tecnológicas pues se adaptan a las demandas de tratamiento de aguas y el tipo de agua a tratar, y facilitan la integración en la línea de producción de agua.

Principio de funcionamiento

Dependiendo de la capacidad de la planta, la filtración puede lograrse con una presión abierta o la presión de filtro. Un rendimiento óptimo del proceso de filtración se efectúa por conducto ordinario de retrolavado con agua filtrada y el aire. Cada filtro se retrolava de forma independiente, por lo tanto, se presenta garantía de abastecimiento continuo.

Características y Beneficios

- Los filtros Filtraflo™ ofrecen una solución avanzada de filtración que involucra una rápida filtración de agua cruda a través de un determinado medio; el filtrado está compuesto de uno o varios medios de capas.
- Los filtros Filtraflo™ se adaptan bien a medianas y grandes plantas. Cuando el arsénico se encuentra ya presente en una planta de tratamiento de agua, puede ser fácilmente instalado aguas abajo los filtros de doble medios.

Aplicaciones

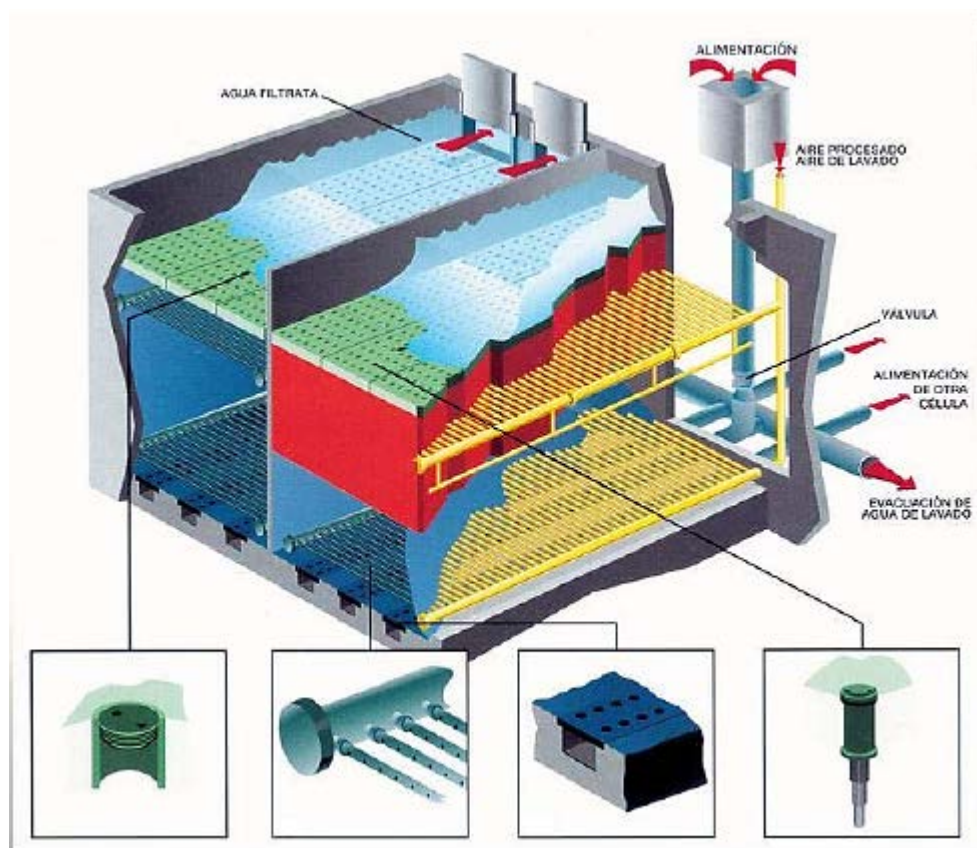
- Proceso de dos etapas: Coagulación / floculación y Filtración de arena.
- Se adapta a las altas concentraciones.
- Se adapta a agua cruda con alta turbidez.

3.6.16 Filtro marca Biostyr. Es un proceso de biofiltración de flujo ascendente por agua y aire que requiere reducido espacio de implantación y que tiene ausencia de olores y aerosoles, por lo que permite su implantación en zonas residenciales sin perjuicio para los habitantes. El efluente obtenido tiene calidad de terciario, que puede ser empleado directamente para riego. Además, es un proceso flexible, que permite su ampliación o instalación en plantas ya existentes.

Los filtros Biostyr™ elimina nitrógeno, materia orgánica (DQO, DBO) y sólidos en suspensión. La principal característica del proceso es la utilización de un medio filtrante Biostyrene™, que permite la depuración biológica y filtración del agua al mismo tiempo, sin necesidad de un decantador secundario.

En la Figura 26 se observan algunos de talles de los filtros marca Biostyr.

Figura 26. Filtro marca Biostyr.



Fuente: www.veoliawaterst.com/solutions

Ventajas y beneficios

- Se obtiene un efluente con calidad de terciario que permite emplearse directamente para riego.
- Reducción del espacio de implantación, gracias a la compacidad y velocidad del proceso (tiempos de retención de 1-2 horas).
- Permite su ampliación o instalación en plantas ya existentes para aumentar su capacidad de producción o grado de depuración.
- Proceso muy respetuoso con el medio ambiente, ya que no emite olores ni aerosoles. Esta ventaja convierte a Biostyr™ en un proceso que permite su implantación en áreas residenciales, con mínima o nula zona de influencia.
- Alta estabilidad del proceso frente a tóxicos y variaciones de carga.

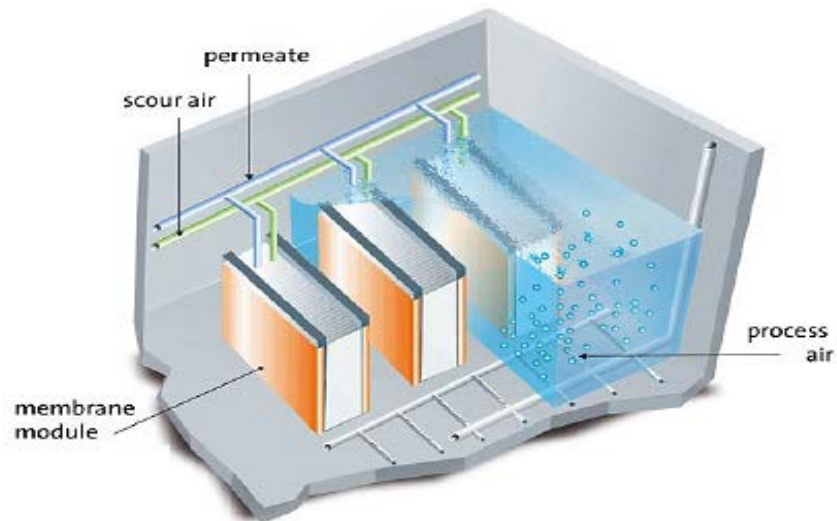
3.6.17 Filtro marca Biosep. Los filtros marca Biosep™ utiliza un tanque de aireación y un sistema de membrana donde se encuentran las membranas agrupadas en módulos. Estos módulos están directamente inmersos en el tanque aireado. El agua filtrada es extraída por medio de dos tubos y una tercera tubería se utiliza para extraer el aire desgrasado.

Las membranas de polímeros son las fibras huecas con una alta resistencia mecánica. Ofrece una combinación de alto rendimiento: Tratamiento biológico aeróbico de lodos activados usando filtración de membrana. Produce una buena calidad del agua, en pleno cumplimiento con las normas para las zonas de baño, reutilización del agua para el riego y aplicaciones industriales.

Aplicaciones

- Reducción significativa de carbono, nitrógeno y fósforo.
- Alta eliminación de las bacterias.

Figura 27. Filtro marca Biosep.



Fuente: www.veoliawaterst.com/solutions

Ventajas

- Alta calidad del agua tratada.
- Reducción significativa materia biodegradable.
- Alto rendimiento desinfección.
- Agua de regeneración: para uso de reciclado, caldera de alimentación, agua de proceso, otros.
- Optimización del consumo de O₂.
- Silencioso y sin olor.
- Reducción de lodos, energía y presión.
- Menos espacio necesario y fácil de instalar.
- Muy fácil de usar, diseño hidráulico.
- No presenta abrasión de la membrana.
- No requiere tratamiento previo necesario.

- Modularidad y flexibilidad operativa se ve facilitada por los sensores con los cuales funcionan los sistemas de automatización.

Principio de funcionamiento

Utiliza un tanque de aireación y un sistema de membrana donde se encuentran agrupadas en módulos. Estos módulos pueden estar directamente inmersos en el tanque aireado o en una cuenca.

Después de un tratamiento previo (por ejemplo, "screening"), las corrientes de agua cruda fluyen en el tanque aireado donde se elimina el carbono, nitrógeno y fósforo que contienen la contaminación.

La membrana de filtración luego separa el agua depurada de los fangos activados: el agua tratada se ha sacado mediante una baja presión de la bomba. Los lodos retenidos por la membrana crean un pastel de lodo en la superficie de la membrana. El exceso de lodos es directamente eliminado del tanque biológico de deshidratación. Mantener el rendimiento de filtración es el punto clave para el proceso, lo que se basa en diferentes funciones automatizadas: retrolavado, inyección de aire y productos químicos de limpieza.

Aquí se sustituye la fase de clarificación convencional por la separación de membranas la cual acaba con las limitaciones en torno a la solución de los lodos. Como resultado de ello, la línea de tratamiento es muy simplificada y los resultados del tratamiento optimizados.

Las membranas de filtración (membranas de hoja plana o fibras huecas orgánicas) se ponen en contacto directo con el tratamiento biológico de la biomasa y la

contaminación. Como resultado se tiene: Muy buena resistencia mecánica y producción de agua tratada de una excelente calidad bacteriológica.

Puede adaptarse a las variaciones de carga, garantizando al mismo tiempo la calidad del agua tratada.

3.6.18 Filtro marca Auto-jet.

Características y Ventajas

- Limpieza a presión en la hoja del sistema de filtro.
- Mantiene plenamente su capacidad nominal, aun cuando el lodo se encuentra pesado, pegajoso o excepcionalmente tenaz. Su eficiente sistema asegura una limpieza completa de cada pulgada cuadrada de superficie del filtro cada ciclo.
- Tiene hojas de características uniformes para la construcción de éstas en caso de intercambiabilidad, proporcionando uniforme filtración y acumulación de lodo.
- Está disponible en tamaños estándar que van desde 50-2000 ft², y pueden ser fabricados en diversos materiales de construcción incluyendo el acero inoxidable, níquel, y otros metales.
- Todos los tanques pueden ser construidos para que se ajusten a las especificaciones del Código ASME.
- Se puede tener completamente limpia la superficie en tres minutos o menos.

3.6.19 Filtro marca Filtra matic.

Características y Ventajas

- Están diseñados para grandes volúmenes de filtración de líquidos usando presión.
- Especialmente usado donde se desea una torta seca.
- Eficiencia operativa y fácil mantenimiento.
- Ofrece dos modelos básicos: Filtra RT-Matic con su singular tanque de retracción y Filtra PO-Matic con un paquete de diseño de retracción. Se tiene filtro de hojas para ambos modelos, son de pesados de construcción para proporcionar la máxima fuerza, así como la flexibilidad necesaria.
- RT-Matic: El paquete de hojas permanece estacionaria, mientras que el filtro se retrae en el propio buque. Todas las conexiones, incluida la salida de la boquilla de filtración, se encuentran en la sección frontal estacionaria. Como resultado de ello, las tuberías del proceso permanecen intactas durante la limpieza, eliminando problemas de alineación.
- Retracción del depósito expone todo el paquete de hojas para facilitar la inspección y el mantenimiento de las superficies de filtración.
- Este diseño también minimiza la torta dejada en el depósito durante el paso a la torta seca en el sistema de descarga.
- La configuración del tanque está disponible en forma cilíndrica o cónica.

3.6.20 Filtro marca Verti-jet.

Características y Ventajas

- La unidad de hojas rectangulares están montadas verticalmente sobre un colector de descarga en la parte inferior de la cisterna.
- Para inspeccionar las superficies de la hoja, la cubierta se deja abierta sin necesidad de dejarlas fuera del depósito.
- Se ofrecen tres diseños de filtro: 1. Ligeros, Se construyen las hojas con único centro en la malla para el drenaje cubierto por una fina malla exterior;

no se recomienda para revestimientos textiles de tela. 2. Normal, El centro-miembro de drenaje está cubierto por malla fina de tela o textiles. Está disponible con una pantalla de la capa intermedia entre el miembro de drenaje y la cobertura exterior. 3. Pesados, Las hojas constan de un metal corrugado, miembro que sirve como canal de desagüe y sus formas rígidas como una base para el montaje; se atan en cada lado de la base de la pantalla intermedio back-up para "amortiguar" el exterior de la malla fina que está cubierta por tela o textiles.

- Las boquillas de salida en los tres diseños están sellados a la salida del colector con una junta.

3.6.21 Filtro de cáscara de nuez Enviro-Shell. Enviro-Tech Systems (ETS) ofrece el filtro de cáscara de nuez Enviro-Shell, así como piezas de repuesto y asistencia técnica garantizada.

El filtro del lecho profundo de cáscara de nuez Enviro-Shell brinda importantes mejoras en la tecnología de filtración. Mediante la utilización de cáscara de nuez negra, como medio filtrante, el filtro elimina más del 98% de aceites y sólidos en suspensión de una corriente de agua.

Está específicamente diseñado para filtrar el agua utilizada para inundaciones en campos petroleros, corrientes de desecho de refinerías y plataformas acuáticas. También tiene aplicaciones en la industria química, petroquímica, metalúrgica, y de generación de energía.

Figura 28. Filtro Enviro-Shell.



Fuente: <http://s405644100.onlinehome.us/prodekuat/petr%C3%B3leo-y-gas.html>

4. USO DE OTRAS ALTERNATIVAS DE FILTRADO

En la búsqueda de economizar los costos de los equipos utilizados en la industria del petróleo, surge la necesidad de experimentar con nuevos lechos filtrantes que ofrezcan o garanticen tal propósito sin descuidar la calidad y eficiencia del proceso como también la protección al medio ambiente. En este capítulo se conocerán las diferentes propiedades y características de los materiales filtrantes a trabajar.

4.1 ALTERNATIVA 1: TIERRA DE DIATOMEAS

Las diatomeas son algas pardas unicelulares que reportan una valiosa ayuda en diferentes procesos industriales.

Las tierras de diatomeas o diatomita constituyen un recurso mineral biogénico. La creciente importancia económica que este recurso ha adquirido, la complejidad del material y su amplio espectro de aplicaciones abren interesantes posibilidades para el desarrollo de técnicas de análisis y geología especializada.²⁵

Importantes depósitos de tierra diatomea en Colombia se encuentra en el valle del Cauca, Zarzal y Obando principalmente (Sandoval, 1953), y no están siendo explotados adecuadamente ocasionando que la tierra tenga aplicaciones muy limitadas por sus características que no permiten cumplir las mínimas especificaciones industriales para su uso (Zapata, 1977).

Figura 29. Vista microscópica de la diatomita.



Fuente: Manosalva S, Naranjo M. Diatomitas y diatomeas. Boyacá, Colombia. 2011.

²⁵ BALLETT, Jorge. Tierras de diatomeas, curiosidad natural al servicio de la industria. Revista Creces, ciencia y tecnología. Div. Minerales Industriales, Eprom Ltda. Mayo, 2005.

4.1.1 Composición. En su aspecto físico, las tierras de diatomeas o diatomita se presentan como rocas silíceas sedimentarias, de color blanco. A no ser por el bajo peso específico de este mineral- del orden de 0,4 en roca-, los afloramientos naturales de diatomitas pueden confundirse con ocurrencia de caolines, dolomita o yeso. Visto el mineral al microscopio, sin embargo, su carácter único queda de manifiesto.

La diatomita esta constituida por restos fosilizados de plantas unicelulares acuáticas relacionadas con las algas, las diatomeas. Estos organismos prosperan comúnmente en medios lacustres o marinos de aguas poco profundas alrededor de los 40 metros, con contenido relativamente abundante de sílice soluble y boro. La presencia de diatomeas es visible incluso en lagunas de aguas quietas, en la forma de una nata iridiscente en la superficie, o una película gelatinosa de color café en las rocas y vegetación acuáticas.

Los depósitos actuales de diatomita, sin embargo, se originaron hace unos cincuenta millones de años, durante el periodo terciario, y generalmente están asociados a presencia significativa de cenizas volcánicas. Durante el lapso indicado se mantuvieron, en formaciones lacustres, condiciones excepcionalmente aptas para la multiplicación de las diatomeas, las que al morir se fueron depositando sobre el fondo a manera de una persistente llovizna, perdurando sus esqueletos o frústulas hasta hoy.

Como mineral, la diatomita está constituida esencialmente por sílice diatomea. Este apelativo circular se explica por las características de la sílice biogénica, que no son comunes a otras formas de sílice natural. En la diatomea, la sílice se encuentra en estado amorfo, hidratada, con un cierto grado de cristianización (en forma de alfa y beta cristobalita). La dureza del mineral oscila entre 4 y 5 en la

escala de Mohs, no siendo la determinación de este valor debido a la fragilidad del fósil silíceo de la diatomea²⁶.

Las impurezas constitutivas de la sílice diatomácea, esencialmente alúmina y hierro, así como los detritos sedimentarios que acompañan al mineral por su origen como deposición, distinguen aún más a la sílice biogénica de otras ocurrencias de minerales de sílice. Normalmente, un depósito de tierras de diatomeas de alta pureza contiene entre un 86% a un 92% de dióxido de silicio (SiO₂). Depósitos como los que existen en la provincia de Arica, asociados a la "Formación Lluta", con contenidos de SiO₂ de hasta un 96%, son considerados como excepcionalmente puros. (Ballet, 1985)

4.1.2 Propiedades físicas.²⁷

- Aspecto macroscópico: roca purulenta, fina y porosa con aspecto margoso.
- Color por lo regular blanco brillante.
- Alta porosidad.
- Volumen de muy baja densidad.
- Capacidad muy alta para absorber líquidos.
- Capacidad abrasiva suave.
- Conductividad térmica muy baja.
- Alta resistencia a la temperatura.
- Punto de fusión entre 1400 a 1750 °C.
- Índice de refracción 1,4 a 1,46.
- Químicamente inerte.
- El porcentaje de humedad varía de acuerdo al depósito.

²⁶ RUEDA, María y VEGA, Karen. Determinación del carácter puzolánico de laterita níquelífera, pumita, diatomita, y su efecto como aditivo en el comportamiento del cemento portland tipo I. 2012, p. 56.

²⁷ MANOSALVA S, NARANJO M. Diatomitas y diatomeas. Boyacá, Colombia. 2011. P. 47.

4.1.3 Usos industriales. La diatomita es utilizada como material abrasivo, filtrante, soporte inerte de explosivos y en las industrias del caucho, papel, cartón, pegantes, pinturas, detergentes y abrasivos, cosmética, como absorbente, material refractario, aislante de calderas y tubos. Además, las tierras diatomáceas pueden ser utilizadas como puzolana en la fabricación del cemento, en aplicaciones en la agricultura y en la elaboración de ladrillos.²⁸

Por ser químicamente inertes y exhibir una gran área superficial por unidad de masa, las tierras de diatomeas son excelentes portadores y dispersantes de productos químicos. En agua, la diatomita es capaz de absorber hasta 2,5 veces su peso. De este modo, líquidos de transporte riesgoso, como los ácidos sulfúricos o fosfóricos, pueden ser convertidos en un polvo de porteo considerablemente más seguro. Uno de los primeros usos, para este efecto, fue el de portador de la explosiva nitroglicerina.

4.1.4 Geología. Las diatomeas son algas muy comunes tanto en los cursos de aguas como en los ambientes límnicos y marinos actuales, se conocen desde la edad Jurásica (150 a 200 millones de años atrás). Una importancia económica, sin embargo, tienen solo aquellos yacimientos de épocas geológicamente modernas, vale decir desde el Terciario (50 millones de años atrás) hasta el Holoceno (actual). La mayoría de las especies existentes en el periodo Terciario han perdurado hasta la actualidad.

4.1.5 Aspectos económicos. A escala mundial, la industria de las tierras de diatomeas procesa aproximadamente un millón de toneladas al año. El alto costo de transporte agravado por la baja densidad del mineral procesado (5 m³/Tonelada) ha incentivado la descentralización productiva. Países tradicionalmente importadores como Australia, Sudáfrica; y Brasil han desarrollado

²⁸ TAYLOR, H. la química de los cementos. Urmo de ediciones. Vol. 1. España, 1978.

o están en vías de establecer instalaciones locales para explotar y procesar tierras de diatomeas.

El costo de una planta de capacidad intermedia -50000 toneladas por año- se ha estimado en US\$ 8 000 000. Debido a que la tecnología de proceso no es estándar y está íntimamente ligada a las características de los depósitos minerales, una fracción considerable de la inversión debe dirigirse hacia prospecciones altamente especializadas, adaptación y desarrollo de técnicas de proceso adecuadas a la materia prima local.²⁹

4.2 ALTERNATIVA 2: CÁSCARA DE NUEZ

La nuez es el fruto del nogal, de forma redondeada u ovoide, con una cáscara dura y rugosa de color pardo rojiza. La parte comestible de su interior tiene un sabor dulce particular.

4.2.1 Origen. Procedente de Persia (región del Himalaya), según unos autores, o de China y Japón, según otros; fue transportado a Grecia y luego a Italia y a los demás países de Europa. Existen evidencias fósiles de la presencia del nogal *J. regia*, en la Península Ibérica, que se remontan al Paleolítico.

El nogal se encuentra vegetando en estado silvestre en la Europa oriental y Asia Menor, asimismo en Norteamérica, formando un cierto número de especies más o menos cultivadas.

El nombre del género deriva del latín “*iuglans*”, nombre romano del nogal y de la nuez, que es una abreviatura de “*lovis glans*”; bellota de Júpiter, a su vez versión latina del griego “*Dios bálanos*”, nombre de la nuez y de la castaña, que significaba literalmente: bellota o castaña de Zeus.

²⁹ BALLETT, Jorge. Tierras de diatomeas, curiosidad natural al servicio de la industria. Revista Creces, ciencia y tecnología. Div. Minerales Industriales, Eprom Ltda. Mayo, 2005.

4.2.2 Distribución geográfica. Es un árbol de gran importancia económica, tanto por la producción de los frutos como por el leño, siendo una de las especies frutales más rentable actualmente.

La mayoría de los países productores de nueces han aumentado su escala operativa para reducir el coste en la adquisición de los insumos, así como para el procesamiento de la nuez, donde se ha logrado avanzar tanto en la presentación del producto como en la diversificación de usos para lograr un producto diferenciado.

En general, la mejora de la competitividad en el cultivo del nogal, ha reflejado el aumento de la superficie cultivada. La producción mundial es de 1 200 000 toneladas aproximadamente y China es el primer país productor.

En Colombia, los departamentos de Quindío, Risaralda y Valle del Cauca son los principales cultivadores y productores del fruto de cáscara de nuez. En total el área cosechada es de 260 hectáreas y la producción de 960 toneladas al año.³⁰

Tabla 3. Producción mundial del fruto de Nuez.

CONTINENTE	MILES DE TONELADAS	%
AFRICA	18	1
ASIA	619	51
EUROPA	274	23
NORTEAMERICA	274	23
SUDAMERICA	22	2
TOTAL	1207	100

Fuente: Organización de las Naciones Unidas para la alimentación y la agricultura (F.A.O)

4.2.3 La planta. El nogal es un árbol que puede alcanzar hasta 30 metros de altura, de hoja caduca y copa redondeada. Es muy vigoroso.

³⁰ MINISTERIO DE AGRICULTURA DE COLOMBIA. Mapa agrícola de Colombia: Agronet. Área cosechada del fruto de Nuez en Colombia.2013. Disponible en: <http://www.agronet.gov.co/agronetweb1/Agromapas.aspx>

El árbol que produce el fruto es conocido comúnmente por nogal y pertenece a la familia de las Juglandáceas, siendo la especie *Juglans regia* la más cultivada en Europa; es muy vigoroso y alcanza hasta 30 metros de alto, porte erguido durante los primeros 40 años y después pendular. Es de hoja caduca, de copa redondeada, elevada, ramosa y extendida y su tronco, derecho y cubierto con una corteza cenicienta y gruesa, en las ramas jóvenes lisa y de color rojo oscuro y en las viejas agrietada y parda.

El sistema radicular es pivotante, con un desarrollo en superficie de raíces horizontales y tanto éstas como la raíz vertical son muy extendidas.

Las hojas son grandes, imparipinnadas, de color verde opaco, glabras, de olor agudo y desagradable, bastante ricas en taninos, como todas las demás partes de la planta. Cada hoja consta de 5 a 9 hojitas ovales llamadas foliolos, en general enteros, con los nervios del envés salientes, de peciolo corto, prácticamente opuestos, de 6 a 12 cm de largo y de 3 a 6 cm de ancho.

En el nogal se diferencian flores masculinas y femeninas. Las flores masculinas están dispuestas en amentos largos, de 6 a 8 cm, casi siempre solitarios, de color verde pardusco e insertadas en la parte superior de las ramillas nacidas el año anterior, que en la floración están desprovistas de hojas. Las flores femeninas son solitarias o agrupadas en un número de una a cinco, en espigas terminales.

4.2.4 Propiedades fisicoquímicas de la Cáscara de nuez:³¹

- Dureza: 2,5 Mohs³²
- Peso específico: 0,95 kg/L

³¹ Moliendas Chana. [Citado 16 de Enero 2015]. Disponible en: www.moliendaschana.com/productos.htm

³² Escala de dureza de minerales.

- Es biodegradable
- Es seguro para la salud
- Durante su combustión produce dióxido de carbono
- Color: marrón
- No es soluble en agua
- Su Ph es neutro
- No se combustiona a temperaturas menores de 270 °C
- El manejo de la cáscara molida requiere el uso de máscaras con filtro

4.2.5 Requerimientos edafoclimáticos.³³

- **Temperatura.** Deben evitarse lugares cuyas temperaturas primaverales puedan descender a menos de 1,1°C, ya que pueden ocasionar daños por heladas en las inflorescencias masculinas, brotes nuevos y pequeños frutos. El nogal es muy sensible a las heladas de primavera, que mermarán sustancialmente la cosecha, pero también a las heladas precoces de otoño que interfieren muy negativamente en la formación los primeros años; durante este periodo juvenil pueden llegar a producirse la muerte de toda la parte aérea del plantón.

Si se dan temperaturas superiores a los 38°C acompañadas de baja humedad es posible que se produzcan quemaduras por el sol en las nueces más expuestas. Si esto sucede al comienzo de la estación, las nueces resultarán vacías, pero si es más tarde las semillas pueden arrugarse, oscurecerse o adherirse al interior de la cáscara.

En climas muy templados y en situaciones bajas, afectadas por vientos secos y cálidos procedentes del sur, además de provocar la caída

³³ Agricultura. El cultivo de la Nuez. Toda la información agrícola al día. Disponible en: www.infoagro.com/frutas/frutos_secos/nogal2.htm

prematura de las hojas, difícilmente puede salvarse la cosecha por las puestas del lepidótero *Cydia pomonella*, causante del agusanado del fruto.

- **Agua.** A pesar de su rusticidad, es muy sensible a la sequía, siendo impropio para ser cultivado en las tierras de secano y de naturaleza seca. Para que su cultivo sea posible necesita de precipitaciones mínimas de 700 mm, siendo de 1000-1200 mm para explotaciones intensivas. Si la pluviometría es insuficiente o está irregularmente repartida, habrá que recurrir al riego para conseguir un desarrollo normal de los árboles y una buena producción de nuez.
- **Suelo.** Es un árbol que se adapta muy bien a suelos muy diferentes aunque prefiere suelos profundos, permeables, sueltos y de buena fertilidad. El drenaje vendrá determinado por subsuelos formados por caliza fisurada, cantos rodados, etc. Para una buena retención de agua se precisan suelos con un contenido en materia orgánica entre el 1,2 y 2% y un 18-25% de arcilla. El nogal se desarrolla en suelos con pH neutro (6,5 – 7,5). Según las características de los suelos se emplearán diferentes tipos de patrones, destacando *J. nigra* para suelos ácidos y *J. regia* para los más calizos.

4.2.6 Particularidades del cultivo.

- **Preparación del terreno.** Es preciso preparar el suelo antes de la plantación. En suelos profundos bastará con un desfonde de unos 0,6 m. Si el suelo es superficial y el subsuelo no facilita el desarrollo de las raíces entonces se efectuará un subsolado en dos o más pasadas cruzadas. Estas labores se realizarán con el terreno seco y varios meses antes de la plantación.

En las labores de riego y suelos muy arcillosos es preciso evitar que el agua quede encharcada, por lo que se realizará el movimiento de tierras

oportuno.

La plantación se realizará durante el reposo vegetativo (en otoño, después de la caída de las hojas) en hoyos de dimensiones 0,60 x 0,60 x 0,40 para que permitan una buena disposición de las raíces. Es importante que el pivote principal de las raíces no sufra daños ya que entonces facilitaría el desarrollo de parásitos y el debilitamiento de la planta. El punto de injerto quedará sobre la superficie. Los hoyos se taparán con tierra fina y aireada. Será preciso un riego post-plantación de 40 a 50 litros/árbol.

- **Marcos de plantación.** El grado de intensificación del cultivo dependerá del tipo de producto (madera o fruto) a conseguir:

En plantaciones extensivas requieren una densidad de 70 a 90 árboles por hectárea a un marco que puede variar de 10 x 12 m a 12 x 12 m. Este tipo de plantaciones están destinadas a un aprovechamiento mixto de fruto y madera.

Las plantas muy intensivas, destinadas a la producción de frutos, requieren una fuerte densidad de árboles (150-200 árboles/ha), a un marco de 7 x 7 m o de 8 x 8 m. Se pretende conseguir un máximo de producción en un tiempo muy corto.

Las plantaciones intensivas requieren una densidad de 100 a 140 árboles por hectárea a un marco que varía entre los 9 x 8 m a los 10 x 10 m. Estos marcos permiten un buen desarrollo y producción de los árboles.

- **Riego.** La práctica correcta del riego es fundamental para obtener un desarrollo rápido y homogéneo del árbol y la obtención de una producción importante de nuez de calibre regular. El tamaño de la nuez dependerá de las disponibilidades de agua durante las seis semanas que siguen a la floración. El nogal es una especie de regadío y prácticamente todas las nuevas explotaciones cuentan con aportes hídricos. El riego por aspersión

no se utiliza, pues favorece el desarrollo de bacteriosis. El riego localizado, por goteo, es el más habitual.

En producciones intensivas el árbol no debe sufrir escasez de agua durante la formación del fruto ni durante el engrosamiento del mismo. Esto tiene lugar de mayo a julio y el aporte de agua será de 40 a 50 m³/hectáreas por día. Cuando lignifique la cáscara (agosto y septiembre) las necesidades serán de unos 30 a 35 m³/hectáreas por día.

- **Fertilización.** Se realizará un abonado de fondo antes de la plantación en función del análisis de suelo realizado previamente para determinar la composición y carencia de nutrientes del mismo. El nogal es muy exigente en nitrógeno y más moderado en cuanto a fósforo y potasio. En suelos muy ácidos se añadirá cal en dosis moderadas con el fin de evitar el bloqueo de otros elementos, en función del pH y textura del suelo. En general, en una plantación adulta, la fertilización con un abono de proporción 100-80-100 podría ser un estándar. Además del abonado de fondo, es preciso fertilizar con regularidad para obtener una buena producción de nueces.

4.2.7 Usos³⁴. Es utilizada en la industria alimentaria, en la industria de las pinturas y tinturas. también es usado para la inyección en los pozos de petróleo para evitar las fugas de gas y petróleo a raíz de las fracturas en la perforación del mismo, evitando la pérdida de gas y petróleo que son contaminantes. Para el granallado y limpieza de tanques en buques, camiones, tanques y todo tipo de recipiente que necesite ser removido su superficie interna limpiando las incrustaciones, para la confección de baldosas plásticas, materiales termoformables, etc.

³⁴ MARTE ROSARIO, Marlenin. Utilización de la cáscara de nuez Chandler en el yeso. Master en innovación tecnológica en edificación. Universidad politécnica de Madrid. 2011, p. 103.

Como carga acompañando a resinas plásticas para hacer todo tipo de pisos, juntas, barras de alto poder anti abrasivo.

Mezcla con óxido de silíceo para hacer piezas abrasivas.

4.3 ALTERNATIVA 3: CASCARILLA DE PALMA AFRICANA³⁵

La palma africana (*Elaeis guineensis*) tiene su origen en el occidente de África en el golfo de Guinea, siendo actualmente una de las industrias más prosperas en Malasia, Indonesia y América.

En América el Noli o Noli, nativa de Colombia, Panamá, Costa Rica, Venezuela y Brasil; fue identificada por los investigadores como *Elaeís Melanocodea* y luego como Corozo Oleífera, fue designada como la palma de aceite pero con productividad inferior de aceite, con una porción líquida mayor y un crecimiento más lento de la palma. Lo anterior ha dado origen a que genetistas estén estudiando híbridos en Colombia con el fin de sustituir en un futuro las semillas importadas.

4.3.1 Antecedentes de cultivo de palma africana en el país: La palma africana, fue introducida en 1932 por el doctor Florentino Claes, director del jardín botánico de Bruselas, Bélgica. Las primeras palmas se plantaron en la estación experimental de Palmira, en el valle del Cauca.

En 1949, la United Fruit Company plantó en la zona bananera del Magdalena, 172 hectáreas con material traído de Sumatra, Indonesia.

En 1957, el gobierno propicio la creación de plantaciones pilotos de palma africana, con la participación financiera del estado e inversiones particulares. El

³⁵ ARIAS, Carlos Augusto y DELGADO Luis. Separadora de almendra y cáscara del fruto de la palma africana. Diseño, construcción y prueba de un prototipo. Bucaramanga, 1992. 164 p.

gobierno encomendó el fomento e investigación de este cultivo al Instituto de Fomento Algodonero (IFA) quien en 1960 inicio las primeras plantaciones comerciales (a finales de 1961 se habían plantado 3400 hectáreas. Al desaparecer el IFA en 1968, el instituto Colombiano Agropecuario (ICA), se encargó de los programas de investigación y parte del fomento del cultivo.

4.3.2 Características del cultivo: Las condiciones ecológicas óptimas para el cultivo de la palma africana se resumen en la tabla siguiente:

Tabla 4. Características del cultivo de palma africana.

CONTENIDO	ESPECIFICACIÓN
Temperatura	25 – 28 °C
Pluviosidad	1800-2200 mm
Horas sol	1000-2300/año
Densidad	143 palmas/Ha
Suelos	Fértiles, drenados y planos

Fuente: ARIAS, Carlos Augusto y DELGADO Luis. Separadora de almendra y cáscara del fruto de la palma africana. Diseño, construcción y prueba de un prototipo. Bucaramanga. 1992, p. 87.

4.3.3 Proceso de obtención de la cascarilla de palma africana: Los racimos cosechados de las palmas se deben llevar a una planta de beneficio cercana al cultivo para ser procesados tan frescos como sea posible.

Allí se refinan y se fraccionan tales aceites para producir las oleínas y las estearinas de palma y de palmiste, que sirven en la fabricación de múltiples productos comestibles y no comestibles incorporados a la vida diaria de la población mundial. De igual manera, la torta del palmiste obtenida al extraer el

aceite de las almendras, se aprovecha para la fabricación de concentrados para la alimentación animal.

Los frutos sueltos se transportan a unos cilindros verticales provistos de agitación a baja revolución, llamados digestores. Ahí se desprende la pulpa de las nueces y se rompen las celdas para liberar el aceite que ellas contienen.

La masa desaceitada que expele la prensa comúnmente se llama torta, la cual está compuesta básicamente por fibras, nueces y humedad. Luego de secarse, la torta pasa al proceso de desfibración, donde las fibras son arrastradas por una corriente de aire y las nueces son separadas, para someterlas a las etapas de acondicionamiento y rompimiento que permiten recuperar la almendra o palmiste.

En algunas plantas de beneficio se cuenta con el equipo para procesar la almendra, de la cual se obtiene el aceite de palmiste y la torta de palmiste. El aceite de palmiste es de características y composición química diferente al aceite de palma, y como este, tiene diversos usos. La torta de palmiste, por su parte se emplea para la alimentación animal como ya se anotó. La fibra (CASCARILLA) pasa a las calderas, donde se quema como combustible.³⁶

4.3.4 Aplicaciones de la cascarilla de palma africana

- Remoción de aceite de aguas residuales producto de la industria petrolera principalmente.
- Lecho filtrante en filtros de lecho vegetal.
- Aditivo en lodos de perforación, para detener o disminuir perdidas de circulación y para remover las arcillas pegajosas en la parte inferior de la sarta.

³⁶ ARIAS, Carlos Augusto y DELGADO Luis. Separadora de almendra y cáscara del fruto de la palma africana. Diseño, construcción y prueba de un prototipo. Bucaramanga, 1992. 164 p.

- Combustible para precalentamiento de calderas.
- Reemplazo de arena en procesos de limpieza por abrasión.
- Material para reacondicionamiento de vías terciarias.

4.3.5 Uso de la cascarilla de palma africana como medio filtrante

Esta cascarilla posee propiedades oleofílicas y de adsorción que le permiten atrapar los aceites y junto con estos, los sólidos presentes en el agua. Sus propiedades de adsorción se deben a la superficie porosa que posee. Esta cascarilla es apta para ser utilizada en la remoción de contaminantes de aguas residuales industriales y en el tratamiento de potabilización.

La adsorción es un fenómeno, que ocurre en la superficie, en el cual se involucran un adsorbato y un adsorbente. Este fenómeno es posible debido a la aparición de fuerzas de interacción entre ellos.

5. VIABILIDAD TÉCNICA Y ECONÓMICA

La oferta de productos extranjeros es amplia y variada de acuerdo a la necesidad del proceso de filtración. En Colombia estos equipos son de alto valor comercial debido a la necesidad de importación de tales equipos. Estos equipos trabajan con materias primas de otros países, de allí su alto valor adquisitivo.

Colombia es un país rico en minerales vitales para el desarrollo económico y dado su fácil obtención, surge la necesidad de experimentar con materia prima nacional. En este capítulo se analizará tanto económica como técnicamente el uso de las materias prima mencionadas en el capítulo anterior para determinar la posibilidad de uso de estos materiales y así producir estos equipos en el país.

5.1 FASE EXPERIMENTAL

Para cumplir con los objetivos planteados en este proyecto fueron necesarias las siguientes etapas de trabajo.

5.1.1 Fase de revisión y análisis bibliográfico. Esta fase se basó en revisión de archivos bibliográficos la cual se realizó precisamente al proceso de desarrollo y elaboración del proyecto. Dentro de la bibliografía y documentos consultados en este proyecto, están la base de datos de la página de OnePetro, material bibliográfico recopilado en la biblioteca de la Universidad Industrial de Santander, además de libros y proyectos de grado, revistas científicas, proporcionando información útil acerca del estado del arte de la utilización de los filtros en la industria de los hidrocarburos, consideraciones técnicas importantes para simular las condiciones de operaciones de estos aparatos y para llevar a cabo un buen análisis de resultados.

5.1.2 Fase de caracterización del material. Para esta fase se procedió a la búsqueda de las materias primas a trabajar (arena diatomea, cáscara de nuez y cascarilla de palma africana) como también a las adecuaciones y normas de seguridad mínimas en el área de trabajo.

5.1.2.1 Materiales utilizados. Estos fueron los materiales utilizados en la práctica:

- Arena diatomea. Empacada en sacos de polipropileno laminado por 25 kilos. En la siguiente tabla se muestran algunas de sus características:
- Cascara de nuez. presentación por 40 kilos.

Tabla 5. Composición mineralógica y características generales de la arena diatomea para la práctica.

COMPOSICIÓN MINEROLÓGICA	
Terrígenos	Alquímicos
Cuarzo (SiO ₂): 1.0%	Fitolitos opalinos (SiO ₂ +H ₂ O): trazas%
Limonita (FeOOH): 1.8%	Frústulas de diatomea (SiO ₂ +H ₂ O): 81.2%
Arcilla caolinitica Al ₂ Si ₂ O ₅ (OH) ₄ : 13.0%	Espículas (SiO ₂ +H ₂ O): 1.5%
Arcilla illitica (K,H ₃ O) (Al,Mg,Fe) 2(Si,Al) 4O ₁₀ [(OH) ₂ , (H ₂ O)]: 1.5%	
CARACTERÍSTICAS GENERALES	
Textura: organogénica	% absorción: (H ₂ O): 210
Color: beige grisáceo claro	Máximo % de humedad: 2.6
Características distintivas: material pulverizado, amorfo e inodoro, untuoso al tacto y bajo peso aparente	Punto de fusión: 1400 °C +/- 50 °C
Grado de meteorización: nulo	Combustibilidad: nula
PH: 4.7	Conductibilidad térmica: nula
Humedad: 2.60%pp	Granulometría: <38 micras
Retención de humedad: 143.18% pp	Corrosividad: no corrosivo
C.I.C: 32.73 meq/100grs	Estabilidad: muy estable, químicamente inerte
Densidad aparente: 0.3-0.5 gr/cm ³	Solubilidad: no soluble en agua

- Cascarilla de palma africana. presentación por 40 kilos.
- Agua. características y condiciones del acueducto de Bucaramanga. Cantidad 25 galones.
- Muestras representativas en volumen de aguas de producción y salmueras. Muestras seleccionadas aleatoriamente de algunos campos. A continuación

la tabla ilustra algunas características físicas de las muestras antes de ser utilizadas en la práctica. Cantidad 10.

Tabla 6. Características físicas de las muestras.

	PH	TEMPERATURA (°C)	CONTENIDO SOLIDOS TOTALES (mg/L)	Turbiedad (NTU)	MAXIMO TAMAÑO DE PARTICULA (micras)	CONTENIDO DE ACEITES (mg/L)
MUESTRA 1	7.66	24	10583	975	85	362
MUESTRA 2	7.89	25	5215	890	75	500
MUESTRA 3	7.3	23	2943	720	90	550
MUESTRA 4	7.39	26	862	550	100	480
MUESTRA 5	7.56	30	768	390	110	600
MUESTRA 6	7.8	29	492	270	130	800
MUESTRA 7	7.1	22	324	160	150	300
MUESTRA 8	8	26	167	160	60	450
MUESTRA 9	7.55	27	63	110	50	516
MUESTRA 10	7.0	28	51	45	63	624
METODO/ NORMA	Potenciómetro/ SM 4500B	Termométrico/SM 2550B	Gravimétrico/SM 5220D	Nefelométrico/SM 2130B	Método de la pipeta.	Extracción líquido líquido/ SM 5520B

- Lámina o malla de acero inoxidable. La tela metálica es fabricada con hilos de alambre en acero inoxidable, en aleaciones de primera calidad, asegurando una alta resistencia a la corrosión y larga duración. Tipo de tejido asargado (Los alambres de la trama pasan por encima y por debajo

de dos alambres alternados, la Abertura es cuadrada, es menos rígido que el tejido liso, utilizado para filtración menor a 63 Micras). Cantidad 3.

- Recipiente cilíndrico cerrado de fibra de vidrio. Representación del cascaron de un filtro convencional. Cantidad 3.
- Tanque de almacenamiento de líquido de 25 galones. Cantidad 1
- Acoples de P.V.C para la instalación de ductos.

Figura 30. Materiales utilizados



5.1.2.2 Equipos utilizados

Los equipos utilizados en la práctica fueron:

- Una bomba. Graduable. Capacidad máxima de 30 gpm. Cantidad 1
- Un manómetro. Manómetro de laboratorio para el registro de la caída de presión. Sensibilidad de 0.5 psi. Rango: 0 a 30 psi. Cantidad 3.
- Peso digital. Capacidad máxima de 25 kilos. Cantidad 1
- Turbidímetro. PCE-TUM 20, el rango de medición es de 0 a 1000 NTU. Cantidad 1.
- Vaso de precipitado y pipetas de laboratorio.
- Paletas de laboratorio.

Figura 31. Equipos utilizados en el proyecto.



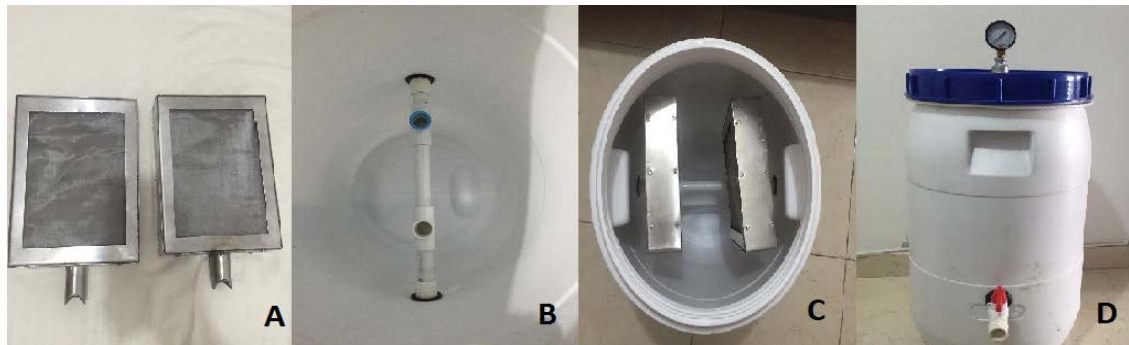
5.1.3 Fase de reproducción de condiciones de operación del filtro. La última fase del proyecto consistió en reproducir las condiciones de operación de un equipo de filtración para monitorear el rendimiento de cada una de las alternativas planteadas anteriormente. A continuación se describe paso a paso el proceso de armado.

5.1.3.1 Alternativa 1. Inicialmente se define las características del equipo. Para esta alternativa el equipo será vertical y su flujo será descendente con el fin de garantizar la estabilidad de la torta formada en los septum. Un flujo ascendente

corre el riesgo de desprender y fluidizar la torta; además restringe el flujo de trabajo.

Seguidamente es definido el número de mallas o el área de filtrado de la arena diatomea, siendo este valor lo que determine el tamaño del equipo. Por practicidad se ajusta el modelo con 2 septum cada uno con área de 1 ft^2 ($1/2 \text{ ft} \times 1 \text{ ft}$ por cada cara del septum) puestos en paralelo a una distancia de 0.4 ft entre ellos; en total son 2 ft^2 de material filtrante disponible. Los septum son soportados por un segmento tubular de P.V.C. Este soporte le brinda estabilidad al conjunto cerrado compuesto por la malla de acero inoxidable y la arena diatomea, y además por allí será el corredor del agua limpia una vez ha sido filtrada como se observa en la figura 32.

Figura 32. Configuración alternativa 1



A) Vista frontal de los septum B) Soporte tubular al interior del recipiente C) Vista superior de los paneles D) Recipiente herméticamente cerrado

Una vez armados los paneles, se procede al armado de los ductos internos del recipiente y posteriormente es sellado con goma especial para evitar el escape o pérdida de presión a través de este. Luego de garantizada la condición anterior, es adaptado el resto de elementos y piezas del sistema como se muestra en la figura 33.

Figura 33. Funcionamiento de esquema alternativa 1.



El recipiente cilíndrico consta de 5 agujeros o aberturas. Cada agujero está herméticamente sellado gracias a la instalación de bandas de cauchos para evitar fugas. En cuatro de los agujero son instaladas unas válvulas que son utilizadas como salida y entrada de agua limpia y sucia; y en el quinto agujero un manómetro es instalado para registrar las variaciones en la presión de operación. Al momento de la operación de filtración se mantienen abiertas 2 válvulas; las otras 2 válvulas se mantienen cerradas y son utilizadas únicamente para el retrolavado del equipo.

Luego es necesaria una verificación rápida del recipiente; se bombea agua con el fin de corroborar que no haya fugas o en su defecto algún ducto se encuentre taponado.

Para lograr que la torta de material filtrante se adherida eficientemente a las mallas se siguen los pasos siguientes: a) Un recubrimiento previo de aproximadamente 1/8 pulgada (3 mm) se deposita en el septum. La suspensión se prepara mezclando DE con fluido limpio como se observa en la figura 34 b) Después que la capa preliminar se ha depositado, el filtrado comienza, y al mismo

tiempo se añade una pequeña cantidad de material (llamada body feed) a la fuente de agua para mantener la porosidad y permeabilidad consistente del medio filtrante. Esto es necesario porque los sólidos suspendidos sin filtrar pueden formar una torta impermeable que puede disminuir considerablemente la duración de la filtración.³⁷ Para ello, se debe tener en cuenta que es necesario 10 a 20 lbs/100 ft² de arena diatomea para un óptimo funcionamiento del equipo.

Figura 34. Formación de torta de arena diatomea.



- A) Suspensión homogénea para precapa B) recubrimiento previo de arena diatomea C) Septum listos para el proceso de filtrado.

Cuando se ha formado y estabilizado la precapa se inicia el bombeo de las muestras de aguas de producción y salmueras al equipo; a una tasa constante de 1 gpm/ft². Esta tasa de alimento es logrado gracias que la bomba posee una válvula que permite regular el flujo del fluido. Finalmente se toman muestras del agua una vez ha sido filtrado para su posterior evaluación.

³⁷ COOK, William; YOUNG John. New concept – high density brine filtration utilizing a diatomaceous earth filtration system. SPE 10648. 1982.

Figura 35. Parámetros de operación y diseño para un filtro DE típico.

Operating and Design Parameters for a Typical DE Filter	
A. Operating Parameters	
Service rate	1.2 to 2.4 m ³ /hr m ² (0.5 to 1 gpm/ft ²)
DE bodyfeed	2 to 5 ppm DE/ppm suspended solids
Regeneration time sequence	
Drain	1 to 5 minutes
Sluice	5 minutes
Fill and add precoat	3 minutes
Circulate	5 to 15 minutes
DE precoat:	
Amount	0.5 to 1.0 kg/m ² (10 to 20 lb/100ft ²)
Filter slurry	30 to 60% water
Circulate rate	2.4 to 4.9 m ³ /hr m ² (1 to 2 gpm/ft ²) (4.5 fps)
B. Design Parameters	
Service rate	1.2 m ³ /hr m ² (0.5 gpm/ft ²)
Inlet solids	< 20 ppm
Inlet oil	< 10 ppm
Total outlet solids	< 1 ppm
Regenerate at 20-psig pressure drop across filter	

Fuente: ARNOLD, Ken. STEWART, Maurice. Surface production operations, vol 1. 3 ed. Houston, 2008, p. 663.

5.1.3.2 Alternativa 2. Primero se debe elegir la configuración que más se adapte a nuestras necesidades. Se dispone de 2 opciones: filtrado aguas abajo (descendente) o filtrado aguas arriba (ascendente). En esta ocasión es útil reproducir las condiciones operativas de un filtro de presión aguas abajo debido que la dirección del flujo descendente facilita el lavado entre ciclos. Además el filtrado en dirección ascendente no es recomendado para el manejo de grandes cantidades de agua.

Seguido, se arma una figura, en forma de caja, con la malla de acero de inoxidable donde estará almacenado la cascara de nuez con el fin de evitar el escape del material filtrante. El tamaño de esta caja dependerá de la cantidad de material filtrante a utilizar. La figura 36 muestra el tamaño y forma de las cajas que almacenarán el material.

Figura 36. Configuración alternativa 2



A) Malla de acero inoxidable en forma de caja B) Soporte para la estabilidad del filtro C) Vista superior de la configuración interna D) recipiente sellado y listo para trabajar.

Luego, se adecuan los ductos necesarios para el soporte y desplazamiento del agua dentro del recipiente. Finalmente se instala la caja anterior en el recipiente de fibra de vidrio. Se disponen de 5 aberturas al igual que el equipo descrito anteriormente. La figura 37 ilustra el esquema de trabajo de esta alternativa.

Figura 37. Esquema de trabajo alternativa 2.



A) Medición del flujo de trabajo B) Esquema de filtración alternativa 2

En cuestiones de operatividad, se recomienda un flujo constante entre 8 a 20 gpm y la carga de sólidos oscila de 1,5 a 4 lb/ft²; para el desarrollo de la práctica el flujo es de 8 gpm y la carga de solidos de 1,7 lb/ft². Ver figura 38.

Figura 38. Típica operación y parámetros de diseño específicos de un filtro aguas-abajo

Typical Operating and Design Parameters for a Specific Down-Flow Filter	
A. Operating Parameters	
Service rate	11.0 m ³ /hr m ² (4.5 gpm/ft ²)
Chemical treatment	20 ppm blend of cationic polyelectrolyte and sodium laminate
Regeneration	
Backwash	4 minutes at 41.6 m ³ /hr m ² (17 gpm/ft ²)
Rinse	4 minutes at 11.0 m ³ /hr m ² (4.5 gpm/ft ²)
B. Design Parameters	
Service rate	4.9 m ³ /hr m ² (2 gpm/ft ²)
Inlet solids	< 20 ppm
Inlet oil	< 10 ppm

Fuente: ARNOLD, Ken. STEWART, Maurice. Surface production operations, vol 1. 3 ed. Houston, 2008, p. 659.

5.1.3.3 Alternativa 3. El procedimiento es completamente igual a la alternativa 2, la única variación está en el material filtrante a utilizar (ver figura 39). En esta ocasión se utiliza cascarilla de palma africana.

Figura 39. Lechos filtrantes alternativa 2 y 3



5.2 ANÁLISIS TÉCNICO

Una vez efectuado el montaje experimental, se da inicio a la prueba. La prueba consiste en hacer fluir las muestras de agua disponibles por cada uno de los 3 equipos de filtración descritos en el paso anterior. Antes y después de efectuada la prueba, son registrados los valores de algunas propiedades físicas de las muestras para su posterior análisis. La figura 40 ilustra la toma de muestras después que ha sido filtrada.

Para evaluar técnicamente estos materiales se requiere hallar el coeficiente Beta (β), posteriormente es calculada la eficiencia de remoción de partículas para cada alternativa planteada y por último son comparados los valores entre sí. Cabe recordar que en la industria no existe una norma o una ley estándar que regule la medición de la eficiencia de los lechos filtrantes; sin embargo, algunos fabricantes

de estos equipos han empleado el uso del número Beta (β) para cuantificar la eficiencia de los mismos. (Capítulo 3)

Figura 40. Toma de muestras después del filtrado.



El coeficiente Beta (β) está definido por la siguiente expresión:

$$\beta_x = \frac{\text{Número de partículas totales en el afluente}}{\text{Número de partículas totales en el efluente}}$$

Donde X es el tamaño de la partícula, (micras).

La eficiencia de remoción de partículas se deduce de la siguiente expresión:

$$\% \text{ eficiencia de remocion} = \frac{\beta - 1}{\beta} * 100$$

Adicionalmente fueron calculados otros valores como la eficiencia de remoción de aceites hidrocarburos, temperatura del fluido, grado de turbidez y el Ph con el fin de complementar y conocer la influencia de estas propiedades en el comportamiento de los lechos filtrantes.

El porcentaje de remoción de aceites hidrocarburos se obtiene:

$$\% \textit{remoción de aceites} = \frac{\textit{aceite inicial} - \textit{aceite final}}{\textit{aceite inicial}} * 100$$

A continuación se relacionan los resultados obtenidos para cada alternativa planteada.

Tabla 7. Resultados alternativa 1: Tierra de Diatomeas.

ALTERNATIVA 1											
MUESTRA	AFLUENTE	EFLUENTE	BETA (β)	EFICIENCIA REMOCION DE PARTICULAS	PH	ACEITES 1	ACEITES 2	REMOCION DE ACEITE	TEMPERATURA	TURBIEDAD 1	TURBIEDAD 2
1	10583	59	179,37	99,4%	7,66	362	14,5	96,0%	24,0	975	25
2	5215	25	208,60	99,5%	7,89	500	18	96,4%	25,0	890	24
3	2943	40	73,57	98,6%	7,3	550	23	95,8%	23,0	720	15
4	862	15	57,47	98,3%	7,39	480	20	95,8%	26,0	550	14
5	768	13	59,08	98,3%	7,56	600	25	95,8%	30,0	390	17
6	492	10	49,20	98,0%	7,8	800	33	95,9%	29,0	270	9
7	324	3	108	99,1%	7,1	300	12	96,0%	22,0	160	12
8	167	3	55,67	98,2%	8,0	450	19	95,8%	26,0	160	8
9	63	1	63	98,4%	7,55	516	21	95,9%	27,0	110	4
10	51	1	51	98,0%	7,0	624	24	96,2%	28,0	45	2
			PROMEDIO	98,6%		PROMEDIO		96,0%			

Tabla 8. Resultados alternativa 2: Cascara de Nuez.

ALTERNATIVA 2											
MUESTRA	AFLUENTE	EFLUENTE	BETA (β)	EFICIENCIA REMOCIÓN DE PARTICULAS	PH	ACEITES 1	ACEITES 2	REMOCION DE ACEITES	TEMPERATURA	TURBIEDAD 1	TURBIEDAD 2
1	10583	250	42,33	97,6%	7,66	362	7	98,0%	24,0	975	35
2	5215	120	43,46	97,7%	7,89	500	9	98,2%	25,0	890	33
3	2943	100	29,43	96,6%	7,3	550	11	98,0%	23,0	720	27
4	862	32	26,94	96,3%	7,39	480	10	97,9%	26,0	550	21
5	768	29	26,48	96,2%	7,56	600	12	98,0%	30,0	390	18,4
6	492	18	27,33	96,3%	7,8	800	17	97,9%	29,0	270	15
7	324	12	27	96,3%	7,1	300	6	98,0%	22,0	160	16
8	167	7	23,86	95,8%	8,0	450	13	97,1%	26,0	160	12
9	63	3	21	95,2%	7,55	516	7	98,6%	27,0	110	9
10	51	2	25,5	96,1%	7,0	624	12	98,1%	28,0	45	7
			PROMEDIO	96,4%		PROMEDIO		98,0%			

Tabla 9. Resultados alternativa 3: Cascarilla de Palma Africana

ALTERNATIVA 3											
MUESTRA	AFLUENTE	EFLUENTE	BETA (β)	EFICIENCIA REMOCIÓN DE PARTICULAS	PH	ACEITES 1	ACEITES 2	REMOCION DE ACEITE	TEMPERATURA	TURBIEDAD 1	TURBIEDAD 2
1	10583	130	81,41	98,8%	7,66	362	3,7	99,0%	24,0	5520	32
2	5215	67	77,84	98,7%	7,89	500	5	99,0%	25,0	2530	29
3	2943	76	38,72	97,4%	7,3	550	5,5	99,0%	23,0	880	26
4	862	23	37,48	97,3%	7,39	480	5	99,0%	26,0	550	23
5	768	20	38,40	97,4%	7,56	600	7	98,8%	30,0	390	16
6	492	13	37,85	97,4%	7,8	800	8	99,0%	29,0	270	14
7	324	8	40,50	97,5%	7,1	300	3	99,0%	22,0	160	12
8	167	5	33,40	97,0%	8,0	450	4	99,1%	26,0	160	13
9	63	2	31,50	96,8%	7,55	516	6	98,8%	27,0	110	10,5
10	51	1	51	98,0%	7,0	624	8	98,7%	28,0	100	5
			PROMEDIO	97,6%		PROMEDIO		99%			

CONVENCIONES

Aceite 1: Aceite presente en la muestra al inicio de la prueba.

Aceite 2: Aceite presente en la muestra al final de la prueba.

Turbiedad 1: Turbiedad medida a la muestra al inicio de la prueba.

Turbiedad 2: Turbiedad medida a la muestra al final de la prueba

5.2.1 Análisis de resultados

Una vez conocido los resultados del análisis y estudio técnico se puede afirmar que las alternativas anteriormente planteadas muestran resultados similares a la tecnología extranjera en cuanto a remoción de partículas mayores a 2 micras y aceites se refiere. La arena diatomea presenta mejores índices en la remoción de partículas mientras que las alternativas restantes registran altos valores en la retención de aceites e hidrocarburos; pero todas son muy buenas alternativas válidas en el tratamiento de las aguas de producción y salmueras.

Figura 41. Eficiencia de remoción de sólidos.

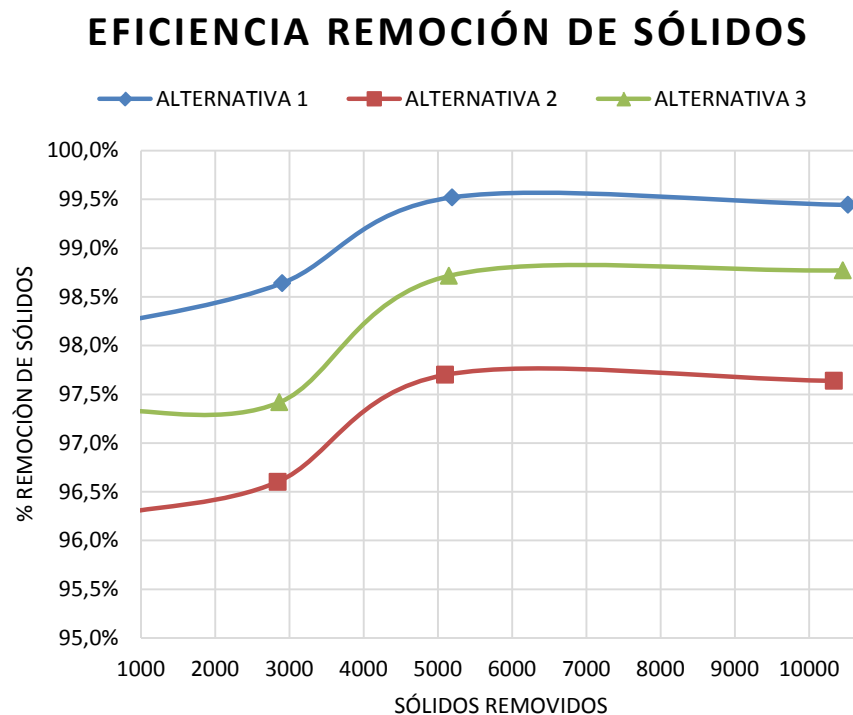
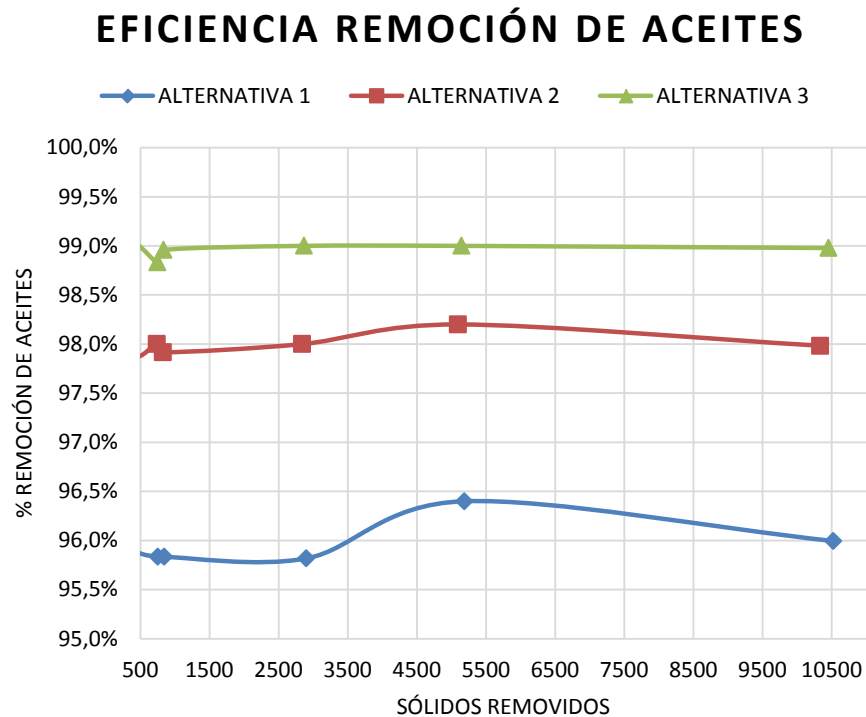


Figura 42. Eficiencia de remoción de aceites.



Cabe resaltar que la operación manual de los equipos filtrantes con los medios filtrantes mencionados anteriormente, aumenta la posibilidad de descarga en el retrolavado, es decir, el riesgo que el medio filtrante corra aguas abajo es alto. Además la falta de experiencia del operador o un error del mismo puede generar problemas en los dispositivos y un aumento significativo de los costos de tratamiento. En mención de lo anterior, las compañías prestadoras de servicios optan por la tecnología de punta, es decir, producen equipos automáticos para el manejo de estos aparatos reduciendo costos por operarios; y además cuenta con la ventaja de operarlos remotamente.

El control del tamaño de la partícula juega un papel muy importante. Las partículas mayores de 2 micrones fueron retenidas por el material filtrante; pero a medida que el tamaño de la partícula fue aumentando, la caída de presión a través del equipo fue más rápido. Sabiendo que estos equipos son de tratamiento terciario,

es recomendable el pre-tratamiento del agua antes de pasar por estos dispositivos, le permite garantizar que el tamaño de las partículas en esta fase no supera las 100 micras y el contenido de sólidos suspendidos totales sea menor a 100 ppm en esta etapa.

Otro factor que juega un papel muy importante es la caída de presión. Los resultados muestran que ΔP aumento a medida que lo hizo el tamaño de la partícula. Por otra parte, los fabricantes recomiendan que un filtro en óptimas condiciones registre un ΔP inicial igual a 2 psi y así mismo considere mantenimiento o el inicio de retrolavado cuando el ΔP alcanza los 25 a 30 psi.³⁸

Dado que el estudio se centraba en realizar los respectivos análisis a la arena diatomea, cáscara de nuez y cascarilla de palma, se puede inferir que estas materias primas colombianas se comportan o responde de igual manera al producto que se maneja en el extranjero. Estas alternativas arrojan los mismos resultados sin importar la cantidad de barriles de agua a tratar, tamaño y cantidad de sólidos pues estas variables dependerán exclusivamente de las configuraciones del fabricante. Es importante destacar, que los datos obtenidos permiten validar la teoría mencionada en diferentes investigaciones acerca de la eficiencia de remoción de estas alternativas de filtrado³⁹.

La eficiencia de remoción de estos medios filtrantes aumenta casi al 100% al ser combinados con tratamientos químicos. El uso de químicos aguas arriba permite la coalescencia de partículas más diminutas o menores de 2 micras y posteriormente la formación de grumos para ser retenidos fácilmente por las lechadas filtrantes. Una desventaja de los productos químicos en esta fase

³⁸ SHARP, Keith W. ALLEN, Barrington. Filtration of oil field brines- A conceptual overview. Society of Petroleum Engineers [online], 1982. Available from www.onepetro.org: SPE 10657.

³⁹ HOUCHIN, L.R. DUNLAP, D.D. HUNDSON, L.M. Field mixing and filtration of acid stimulation fluids. Society of Petroleum Engineers [online], 1986. Available from www.onepetro.org: OTC 5244

precisamente tiene que ver con la disposición final del agua contaminada con esta clase de productos.

Tabla 10. Criterios y condiciones para elección de la tecnología adecuada.

	ALTERNATIVAS DE MATERIAL FILTRANTE		
PARAMETRO	ARENA DIATOMEA	CÁSCARA DE NUEZ	CASCARILLA DE PALMA AFRICANA
Naturaleza del fluido	Compatible con el medio	Compatible con el medio	Compatible con el medio
Tasa de flujo			
Convencional	1-3 gpm/ft ²	1-8 gpm/ft ²	1-8 gpm/ft ²
Alto caudal	-----	20 gpm/ft ²	20 gpm/ft ²
Área superficial	3000 ft ²	1500 ft ²	1500 ft ²
Temperatura máx.	80 °C	80 °C	80 °C
Pre filtración	Si	Si	Si
Agentes químicos	Si	Si	Si
OPERATIVO			
Cantidad de material filtrante	10 a 20 Lb/ 100 ft ²	1,5-4 Lb/ft ²	1,5-4 Lb/ft ²
Cambio de material filtrante	Ocasional	Rara vez	Rara vez
Eficiencia de remoción de aceites y/o HC	96,0%	98,0%	99,0%
Eficiencia de remoción de solidos	98,6%	96,4%	97,6%
DISEÑO			
Tamaño de partículas	5-75 micras	<100 micras	<100 micras

Entrada de sólidos	670 ppm	550 ppm	580 ppm
Entrada de aceites y/o HC	650 ppm	800 ppm	900 ppm
Total sólidos a la salida	7 ppm	5 ppm	8 ppm
Caída de presión máx. del equipo	19-22 psi	25-30 psi	25-28 psi

Finalmente se deduce que la implementación de estas alternativas de filtrado es viable en la construcción de dispositivos o unidades de filtración en Colombia.

La tabla 10 describe las condiciones para cada tecnología planteada anteriormente. En ella se registran los principales parámetros y rangos de los parámetros a tener en cuenta a la hora de seleccionar la mejor alternativa para cierto escenario de trabajo.

5.3 ANÁLISIS ECONÓMICO

En todo proyecto es importante conocer los costos que acarrearán la implementación o el uso de servicios. En esta ocasión, es pertinente llevar a cabo el respectivo detalle económico en el uso de estas alternativas. A continuación conoceremos tales detalles en las siguientes tablas.

Tabla 11. Presupuesto y costos materia prima en Colombia.

DETALLE	VALOR COMERCIAL* (Dólares**)	PRESENTACIÓN
Arena diatomea	\$70,5	Empacado por 25 kilos
Cáscara de nuez	\$91,5	Empacado por 40 kilos
Cascarilla de palma africana	\$41	Empacado por 40 kilos

* Incluye gastos de transporte.

** \$1 dólar= 2128,68 pesos.⁴⁰

Tabla 12. Costos de construcción de un equipo de filtración en Colombia.

DETALLES	CAPACIDAD DEL EQUIPO (BVPD)					
	15 000	20 000	25 000	30 000	40 000	50 000
RECIPIENTE ACERO INOXIDABLE	50 600	56 200	65 340	67 830	77 280	82 614
MATERIAL FILTRANTE	270	270	360	450	550	550
ACOPLES	3 795	4 215	4 455	4 845	7 360	7 868
BOMBA DE ALIMENTO	8 855	9 835	10 395	11 305	14 720	15 736
PINTURA ESPECIAL RESISTENTE A LA CORROSIÓN	12 650	13 100	14 850	16 150	25 760	27 538
AUTOMATIZACIÓN DEL EQUIPO	93 610	93 610	93 610	101 300	124 800	124 800
MANO DE OBRA	10 120	11 240	11 880	12 920	16 560	17 703
TRANSPORTE DEL EQUIPO	12 650	14 050	14 850	16 150	18 400	19 670
INSTALACIÓN DEL EQUIPO	8 855	9 835	10 395	11 305	12 880	13 769
GASTOS OPERACIONALES	5 060	5 620	5 940	6 460	7 360	7 868
I.V.A	40 480	44 960	47 520	51 680	58 880	62 944
COSTOS TOTALES (Dólares)	253 000	281 000	297 000	323 000	368 000	393 400

Consideraciones:

- Los valores anteriores están expresados en dólares.
- Cálculos basados en un filtro de arena diatomea. La variación del material filtrante tiene un bajo impacto en el costo total debido que el valor de este no supera las 1 000 dólares.
- El recipiente debe estar sujeto a las especificaciones y condiciones de operatividad para recipientes bajo presión descritos en el código ASME (American Society of Mechanical Engineers)

⁴⁰ BANCO DE LA REPUBLICA DE COLOMBIA. Tasa de cambio representativa del mercado. Promedio noviembre 2014. Disponible en: <<http://www.banrep.gov.co/es/-estadisticas>>

Tabla 13. Análisis económico

	CAPACIDAD (BWPD)					
	15 000	20 000	25 000	30 000	40 000	50 000
VALOR EQUIPO NACIONAL	253 000	281 000	297 000	323 000	368 000	393 000
VALOR EQUIPO EXTRANJERO (PROMEDIO) ⁴¹	268 200	297 100	315 500	340 300	388 400	414 700
DIFERENCIA (DÓLARES)	15 200	16 100	18 600	17 300	20 400	21 700

5.3.1 Análisis de resultados

La fabricación de una unidad de filtración automática en Colombia oscila alrededor de \$250000 y \$400000 dólares más IVA; dependiendo la capacidad del equipo. La vida útil de estos equipos podría ser superior a los 10 años siempre y cuando se ejecuten los mantenimientos que requiere un equipo metalmecánico. La automatización de estos equipos garantiza el estricto y delicado proceso de retrolavado entre ciclos, daños en las lechadas filtrantes y además, disminución de gastos por concepto de operarios.

Cada equipo de filtración necesita de una bomba de alimento que se encargue de transportar el fluido de tratamiento hasta la entrada del dispositivo a una presión dada. La cantidad de bombas dependerá de la configuración o tamaño del equipo. Estas bombas de alimento requieren mantenimiento periódicamente. El consumo de energía de estos equipos es bajo. Solo se requiere energía para el ciclo de retrolavado del filtro y el funcionamiento de la bomba.

La viabilidad económica en el uso de las alternativas trabajadas en este proyecto es rentable al igual que la posible fabricación de los equipos. El costo de las materias primas es bajo en comparación con la oferta extranjera, pues la importación de tales productos (incluyendo costos por disposición, uso, transporte

⁴¹ COLORADO SCHOOL OF MINES. An integrated framework for treatment and management of produced water. 1 ed. November, 2009

y manejo en territorio nacional) encarece la operación. Del mismo modo, se deduce que una posible fabricación de estos dispositivos en Colombia es económico. Se ahorrarían entre \$15 000 y \$22 000 dólares.

6. CONCLUSIONES

- Se determinó que la eficiencia de remoción de sólidos suspendidos es mayor al utilizar la arena diatomea como lecho filtrante con una eficiencia de 98,6%.
- La cascarilla de palma africana es la mejor opción de remoción de aceites y/o hidrocarburos, con una eficiencia de 99%.
- Se concluye que la cascara de nuez y la cascarilla de palma africana tienen una mayor retención por adsorción de aceites e hidrocarburos debido a sus propiedades oleofílicas.
- Al tener en cuenta que los costos de importación y demás impuestos que devenga el traslado de una unidad de filtración, es aconsejable el uso de estas tecnologías de filtración. Esto genera un ahorro de hasta \$21.700 dólares.
- La fácil disponibilidad de los materiales utilizados es un gran atractivo para el desarrollo del presente proyecto a escala industrial y comercial en Colombia.

7. RECOMENDACIONES

- Realizar un análisis o viabilidad similar al presente proyecto utilizando otros materiales filtrantes de origen vegetal disponibles en Colombia tales como: Antracita, Carbón, cascarilla de Pekan y cascarilla de Walnut.
- Realizar los modelos, diseños y diferentes configuraciones para la construcción de equipos de filtración con las alternativas de filtrado planteadas para el fortalecimiento en la prestación de servicios en Colombia a bajo costo.
- Realizar un plan de trabajo basado en la disposición final y/o tratamiento de las aguas producto del retrolavado. Estas aguas están mezcladas con el lecho filtrante descargado.
- Ampliar el uso de estos materiales filtrantes en otras áreas que permitan el desarrollo de proyectos a escala industrial.

BIBLIOGRAFÍA

AMERICAN WATER WORKS ASSOCIATION. Water treatment plant design. 4 ed. 2005. 972 p.

ARIAS, Carlos Augusto y DELGADO Luis. Separadora de almendra y cáscara del fruto de la palma africana. Diseño, construcción y prueba de un prototipo. Bucaramanga, 1992. 164 p.

ARNOLD, Ken. STEWART, Maurice. Surface production operations. Design of oil handling systems and facilities. Vol1, 3ra ed. 2008. 747 p.

BAILEY, Bill. CRABTREE, Mike. TYRIE, Jeb. Control del agua. En: Oilfield review Schulumberger. 2000, p. 1-7.

BALLET, Jorge. Tierras de diatomeas, curiosidad natural al servicio de la industria. Revista Creces, ciencia y tecnología. Div. Minerales Industriales, Eprom Ltda. Mayo, 2005.

BARRON, William Cook. YOUNG, John. New concept- High density brine filtration utilizing a diatomaceous earth filtration system. Society of Petroleum Engineers [en línea], 1982 [citado 15 Enero de 2015]. Available from www.onepetro.org: SPE 10648.

BENAVIDES MURCIA, Jhon Jarver y JAIMES BELTRÁN, Yureynis Michelle. Factibilidad técnico-financiera de los usos alternativos del agua de producción en campo escuela Colorado. Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga, 2014. 193 p.

BHARDWAJ, Vipin. MIRLISS, Mel J. "Diatomaceous earth filtration for drinking water". National drinking water clearinghouse. Virginia, p. 1-4.

CASTRO CASTELL, Martha Rocío. Estado del arte de sistemas de tratamiento de aguas de producción en campos petroleros. Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga, 2004. 110 p.

COLORADO SCHOOL OF MINES. An integrated framework for treatment and management of produced water. 1 ed. November, 2009.

EBENEZER T, Igunnu. CHEN Z, George. Produced water treatment technologies. En: International journal of low-carbon technologies advance access. December, 2013.

FEDERACION DE PALMICULTORES DE COLOMBIA [en línea]. Disponible en: <http://web.fedepalma.org/> [citado el 22 enero de 2015]

Field evaluation of D.E. and cartridge filters for completion/workover fluid filtration. Society of Petroleum Engineers [en línea], 1987 [citado 20 Diciembre 2014]. Available from www.onepetro.org: SPE 16933

HOUCHIN, L.R. DUNLAP, D.D. HUNDSON, L.M. Field mixing and filtration of acid stimulation fluids. Society of Petroleum Engineers [en línea], 1986 [citado 20 Diciembre 2014]. Available from www.onepetro.org: OTC 5244.

JAIMES CAMPOS, Diana Marcela y PICO JIMENEZ, María Isabel. Diseño de la planta de tratamiento de aguas residuales y de producción evaluando las diferentes alternativas nacionales y extranjeras- aplicación campo Colorado. Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga, 2009. 228 p.

KIRK, Joseph. A review of Waterflood filtration. Society of Petroleum Engineers [en línea], 1964 [citado 5 Enero 2014]. Available from www.onepetro.org: SPE 850.

MANOSALVA S, NARANJO M. Diatomitas y diatomeas. Boyacá, Colombia. 2011. 85 p.

MARTÍNEZ LOZANO, Jorge Alfonso y PINTO PLAZAS, Diego Fernando. Revisión del sistema actual de manejo del crudo producido en el campo escuela colorado y desarrollo de la ingeniería conceptual para las condiciones futuras. Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga, 2011. 112 p.

MORRISSEY, Susan y HASHEMI, Reza. Disposal of filter media used in exploration and production operations. Society of Petroleum Engineers [en línea], 1992 [citado 10 Enero 2014]. Available from www.onepetro.org: SPE 24567.

PINZÓN LANDAZABAL, Gustavo Andrés y MORENO INFANTE, Marlon Rolando. Definición de estándares operativos para el tratamiento de aguas residuales. Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga, 2007. 120 p.

Programa de capacitación personal de producción Modulo 2: Circuito del agua. PERENCO COLOMBIA LTD. 2000.

SECRETARIA DE ENERGÍA. Prospectiva del mercado de petróleo crudo 2010-2015, Gobierno Federal 2011, México.

SHARP, Keith W. ALLEN, Barrington. Filtration of oil field brines- A conceptual overview. Society of Petroleum Engineers [en línea], 1982 [citado 20 Enero 2014]. Available from www.onepetro.org: SPE 10657.

WALLACE, James T. Filtration of oilfield produced waters. Society of Petroleum Engineers [en línea], 1972 [citado 20 Diciembre 2014]. Available from www.onepetro.org: SPE 4251.