

**DISEÑO DE UNA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS, MEDIANTE
LA IMPLEMENTACIÓN DE OSMOSIS INVERSA EN CAMPOS
PETROLEROS DE COLOMBIA.**

LUIS RAMÓN LÓPEZ LÓPEZ

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍA DE FISCOQUÍMICA
ESCUELA DE INGENIERÍA DE PETRÓLEOS
BUCARAMANGA
2016**

**DISEÑO DE UNA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS, MEDIANTE
LA IMPLEMENTACIÓN DE OSMOSIS INVERSA EN CAMPOS
PETROLEROS DE COLOMBIA.**

LUIS RAMÓN LÓPEZ LÓPEZ

**MONOGRAFÍA
PARA OPTAR EL TÍTULO ESPECIALISTA EN PRODUCCIÓN DE
HIDROCARBUROS**

**Director:
JORGE E. FORERO SANABRIA
Ingeniero Químico**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍA DE FISICOQUÍMICA
ESCUELA DE INGENIERÍA DE PETRÓLEOS
BUCARAMANGA
2016**

DEDICATORIA

Mi Monografía la dedico con todo mi amor y cariño a Dios, que me dio la oportunidad de vivir y de regalarme una familia maravillosa.

Con mucho cariño principalmente a mis padres que me dieron la vida y han estado conmigo en todo momento.

Gracias por todo mamá y papá por darme esta Especialización para mi futuro y creer siempre en mí, por ser constante y darme la fuerza necesaria para lograr mis éxitos.

A mi esposa e hijo, por el apoyo incondicional y el amor que me profesan cada día para seguir adelante.

A mis hermanas, gracias por el apoyo constante, las quiero mucho, a mi suegra, cuñadas y a todos mis seres queridos que hacen de mi diario vivir.

AGRADECIMIENTOS

Primero dar gracias a Dios por fortalecer nuestra mente y nuestro corazón.

A mi familia por ser el soporte y por el apoyo, paciencia y colaboración incondicional, brindado en este arduo proceso de superación.

A los directivos por el apoyo y colaboración para el desarrollo de este trabajo.

Y a todas aquellas personas que una forma u otra manera colaboraron en la realización de esta investigación, nuestros más sinceros agradecimientos.

TABLA DE CONTENIDO

| | |
|--|----|
| INTRODUCCIÓN..... | 16 |
| 1. ASPECTOS GENERALES | 18 |
| 1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA | 18 |
| 1.2 JUSTIFICACION..... | 19 |
| 1.3 OBJETIVOS..... | 21 |
| 1.3.1 OBJETIVO GENERAL..... | 21 |
| 1.3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS: | 21 |
| 1.4 MARCO LEGAL | 22 |
| 2 MARCO TEORICO | 31 |
| 2.1 ORIGEN DE LAS AGUAS DE PRODUCCIÓN..... | 32 |
| 2.1.1. Aguas residuales de proceso | 33 |
| 2.1.2 Purgas de tanques | 34 |
| 2.1.3 Aguas lluvias | 34 |
| 2.1.4 MANEJO DE AGUAS DE PRODUCCIÓN. | 35 |
| 2.1.5 RELACIÓN PETROLEO / AGUA..... | 38 |
| 2.2 CARACTERÍSTICAS FÍSICAS Y QUÍMICAS | 41 |
| 2.3 OTROS PARAMETROS DEL AGUA..... | 50 |
| 2.4 PROCESOS DE TRATAMIENTO DEL AGUA..... | 55 |
| 2.4.1 TIPOS DE SISTEMAS DE TRATAMIENTO DE AGUA | 55 |
| 2.4.2 PRINCIPIOS DE SEPARACION..... | 56 |
| 2.4.5 PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO | 62 |
| 2.4.6 PARAMETROS DEL PROCESO DE OSMOSIS INVERSA..... | 65 |
| 2.4.7 ANÁLISIS DE AGUA PRODUCIDA | 66 |
| 3.0 OSMOSIS INVERSA | 72 |
| 3.1.1 EL PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO..... | 73 |
| 3.1.2 LA MEMBRANA DE LA ÓSMOSIS INVERSA | 75 |
| 3.1.3 AGUA RECHAZADA..... | 75 |

| | |
|---|-----|
| 3.1.4 FACTORES DEL AGUA DE ALIMENTACIÓN..... | 76 |
| 3.1.5 APLICACIONES..... | 77 |
| 3.1.6 DESALINIZACIÓN..... | 78 |
| 3.1.7 AGUA ULTRAPURA..... | 79 |
| 3.1.8 SISTEMA TIPICO DE OSMOSIS INVERSA..... | 79 |
| 3.1.10 INCRUSTACIONES..... | 82 |
| 3.1.11 TIPOS DE MEMBRANAS..... | 83 |
| 3.1.11.1 MATERIALES DE MEMBRANAS..... | 83 |
| 3.1.11.2 MEMBRANAS DE ACETATO DE CELULOSA..... | 84 |
| 3.1.11.3 MEMBRANAS DE POLIAMIDA (PA) COMPUESTA..... | 86 |
| 3.1.11.4 MÓDULOS DE MEMBRANAS..... | 86 |
| 3.12 ECUACIONES..... | 88 |
| 3.12.1 BALANCE DE MASA PARA EL FLUJO DE AGUA..... | 89 |
| 3.12.2 BALANCE DE MASA PARA EL FLUJO DE SOLUTO..... | 89 |
| 3.12.3 FLUJO DE MEMBRANA..... | 89 |
| 3.12.4 RECUPERACIÓN (R)..... | 90 |
| 3.12.5 FACTOR DE CONCENTRACIÓN (CF)..... | 90 |
| 3.12.6 PASO DE SALES (SP)..... | 91 |
| 3.12.7 RECHAZO DE SALES (SR)..... | 91 |
| 3.12.8 POLARIZACIÓN DE CONCENTRACIÓN..... | 92 |
| 4.0 DESCRIPCIÓN PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUA PRODUCIDA, MEDIANTE OSMOSIS INVERSA EN CAMPOS PETROLEROS DE COLOMBIA..... | 92 |
| 5.0 CAMPO ESCUELA UIS 12..... | 98 |
| 5.1 DATOS BÁSICOS DE YACIMIENTO..... | 98 |
| 5.2 TOMA DE MUESTRA DEL AGUA PRODUCIDA CAMPO UIS 12..... | 99 |
| 5.3 RESULTADOS OBTENIDOS DE DISEÑO..... | 101 |
| 5.3.1 SISTEMA OSMOSIS INVERSA CAMPO UIS 12..... | 102 |
| 5.3.2 CALCULO DE LA BOMBA..... | 108 |

| | |
|--------------------------|-----|
| 6. CONCLUSIONES | 111 |
| 7. RECOMENDACIONES | 112 |
| BIBLIOGRAFIA..... | 113 |
| ANEXOS | 115 |

LISTADO DE TABLAS

| | |
|--|-----|
| Tabla 1: Parámetros mínimos permisibles..... | 26 |
| Tabla 2: Contenido típico de agua en la producción de petróleo. | 67 |
| Tabla 3: Ventajas y desventajas sobre la mejor tecnología disponible para la Gestión y Tratamiento del Agua Producida,..... | 69 |
| Tabla 4: Aplicación de la ro en tratamiento de agua..... | 78 |
| Tabla 5: Directrices de calidad de agua generalmente aceptadas para minimizar la obstrucción de la membrana de RO..... | 81 |
| Tabla 6: Directrices de calidad de agua generalmente aceptadas para minimizar la incrustación de la membrana de ro..... | 82 |
| Tabla 7: Comparación de las membranas de película de delgada y de acetato de celulosa | 83 |
| Tabla 8: Comparación de los módulos básicos de membrana RO..... | 88 |
| Tabla 9: Datos Básicos de Yacimiento | 98 |
| Tabla 10: Datos Básicos de monitoreo de Agua Producida..... | 99 |
| Tabla 11 . Resultado componentes Iones, cationes, tipo de elemento. | 104 |
| Tabla 12. Porcentaje de saturación, Índice de Langenier y presión Osmótica. | 105 |
| Tabla 13. Resultado de caudal acumulado de permeado, presión y cantidad de elementos por cada etapa. | 106 |
| Tabla 14. Resumen o cuadro comparativo de caudales, presiones, pH, TDS en cada corriente de la Osmosis Inversa (RO) | 107 |
| Tabla 15. Resumen cálculo de la bomba.(energía requerida)..... | 109 |
| Tabla 16. Inversión y coste de agua..... | 109 |
| Tabla 17. Resultado del cálculo de costo de agua..... | 110 |

LISTADO DE CUADROS

| | |
|--|-----|
| Cuadro 1: Datos de entrada..... | 103 |
|--|-----|

LISTADO DE FIGURAS

| | |
|--|-----|
| Figura 1: Diagrama general del origen de las aguas de producción | 35 |
| Figura 2. Petróleo y agua..... | 39 |
| Figura 3: Osmosis Inversa | 73 |
| Figura 4: Rechazo de la Osmosis Inversa..... | 75 |
| Figura 5 : Sistema Típico Osmosis Inversa (RO) | 79 |
| Figura 6: Diagrama de flujo Sistema de Tratamiento, por medio de osmosis inversa..... | 92 |
| Figura 7: Vista en sección esquemática de las membranas de fibras huecas en el agua pre-filtrada | 97 |
| Figura 8: Datos de entradas campo UIS 12, TDS, SST y ST | 100 |
| Figura 9: Datos de entrada campo UIS 12 de Turbiedad | 101 |
| Figura 10: Esquema básico de RO con un módulo de dos etapas, con sistema de bombeo del campo UIS 12. | 107 |

LISTADO DE ANEXOS

| | |
|--|-----|
| Anexo A. Cost Breakdown for Reverse Osmosis System..... | 115 |
| Anexo B. Planning Level Cost Estimates for 43,000 bpd Reverse Osmosis and Vapor Compression System..... | 116 |
| Anexo C. Typical Placerita Produced Water Quality and Treatment..... | 117 |
| Anexo D. Ficha técnica membrana SWC5-LD..... | 118 |

RESUMEN

TÍTULO: DISEÑO DE UNA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS, MEDIANTE LA IMPLEMENTACIÓN DE OSMOSIS INVERSA EN CAMPOS PETROLEROS DE COLOMBIA.*

AUTOR: LUIS RAMÓN LÓPEZ LÓPEZ**

PALABRAS CLAVES: Agua Producida, Osmosis Inversa, Hidrocarburos (H'cs) , Sólidos Totales Disueltos (TDS), Placas Corrugadas (CPI), separadores API o Desarenadores, Flotación con Aire Disuelto (FAD).

DESCRIPCIÓN:

La producción petrolera involucra varias operaciones generadoras de impacto ambiental, entre las cuales está la utilización de agua asociada al petróleo, siendo necesario separarla antes de la comercialización. Los volúmenes de agua de producción y su composición dependen del campo petrolero y del yacimiento de donde proviene. Tradicionalmente se usan separadores API o Sedimentadores y Placas Corrugadas (CPI) como tratamiento; sin embargo, la tecnología de Flotación con Aire Disuelto (FAD) representa una alternativa para mejorar la eficiencia de separación y optimizar los procesos.

Para este caso particular, el proceso se centra en diseñar una Planta de Tratamiento de Osmosis Inversa (RO) para uso agrícola, junto a las normas legales vigentes que se deben tener en cuenta para poder llevarlo a cabo; además de los aspectos técnicos y jurídicos decretados por el Ministerio del Medio Ambiente y Vivienda Territorial – MMAVT, para no contaminar de ninguna manera los efluentes obtenidos a disposición para ello.

Es así como a través de esta monografía se proporciona un diseño que permita minimizar y prevenir los impactos negativos causados por la industria petrolera y que permita el desarrollo sostenible en las diferentes etapas de los proyectos petroleros, definiendo unos de los procesos más importantes en la industria como es la obtención del recurso desde su yacimiento hasta su disposición final, teniendo como objetivo principal la remoción de altas concentraciones de TDS y H'cs para para reutilización y uso benéfico.

* TRABAJO DE GRADO

** Facultad de ingeniería Fisicoquímicas. Escuela de Ingeniería de Petróleos. Especialización en Producción de Hidrocarburos.

ABSTRACT

TITLE: DESIGN OF A WATER TREATMENT PLANT, THROUGH THE IMPLEMENTATION OF REVERSE OSMOSIS IN OIL FIELDS IN COLOMBIA*

AUTHOR: LUIS RAMÓN LÓPEZ LÓPEZ

KEY WORDS: Wastewater, Reverse Osmosis, Hydrocarbon (HC's) , Total Dissolved Solids (TDS), Corrugate Plate (CPI), API separators or Traps Sand, (FAD) Dissolved Air Flotation.**

DESCRIPTION

Oil production involves several generating environmental impact operations, among which is the use of water associated with oil, being necessary to remove it before marketing. Volumes of water production and its composition depend on oil field and the site where it comes from. Traditionally API separators or sand traps and corrugated plates (CPI) are used as pretreatment; however, (FAD) Dissolved Air Flotation technology represents an alternative to improve separation efficiency and optimize processes.

In this particular case, we will center the process on designing a Reverse Osmosis Treatment Plant (RO) for agricultural use, on the legal provisions regulating this and on the technical and judicial aspects ordered by the Ministry of Environment Territorial Housing – MMAVT, in order to avoid any contamination of the effluents.

In this monograph, we will provide a design that minimizes and prevents the negative effects caused by the oil industry, and that allows sustainable development in the different stages of oil projects, while defining one of the most important processes of this industry: the extraction of the resource from its source to its final disposal, with the main objective of removing high concentrations of TDS and HC's for the reuse in agricultural activities.

* DEGREE

** Facultad de ingeniería Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería de Petróleos. Especialización en Producción de Hidrocarburos.

INTRODUCCIÓN

Tales de Mileto, un filósofo griego del siglo V a.c., afirmó que el agua era la sustancia original de donde se generaban todas las demás cosas. Hoy en día sabemos que eso no es del todo cierto, pero si sabemos a ciencia cierta que el agua es un elemento vital para el desarrollo de la vida e indispensable en diversos sectores laborales, tales como la agricultura, las industrias, la producción de alimentos y bebidas para el consumo humano, entre muchas otras más.

Las operaciones petroleras, por ejemplo en la perforación, pueden crear grandes volúmenes de agua contaminada, conocido como “agua producida”, o el agua que se produce en el pozo. La mayoría de los yacimientos subterráneos de petróleo tienen una capa de agua cruda, llamada “agua de formación”, que yace debajo de los hidrocarburos. Mientras en un campo maduro, el petróleo llega a ser difícil de remover, el agua o vapor se inyecta a los pozos, para ayudar a impulsar el aceite a la superficie. Tanta agua de formación como agua inyectada eventualmente se dirigen a la parte superior y son producidos en la boca del pozo junto con los hidrocarburos, lo que conlleva a que en la extracción produzca volúmenes de agua que representa enormes cantidades de agua contaminada, que requieren métodos de tratamiento económico y ecológicamente amigable para que pueda ser re- utilizados o eliminarse de forma segura.

Es por eso que se crea esta monografía con el fin de ofrecer una alternativa de tratamiento del agua producida en los campos petroleros de Colombia, creando una Planta de Tratamiento mediante la Osmosis Inversa ya que este proceso permite la purificación de agua, en el cual se combinan factores como presión y permeabilización con el fin de separar

partículas indeseadas del agua, y lograr obtener agua potable, pura y ultra pura, según sea la necesidad. Este proceso tiene grandes aplicaciones industriales y comerciales, entre las más comunes esta la desalinización de agua de mar para convertirla en agua potable, la reducción de sólidos disueltos para la alimentación en procesos con calderas o sistemas de vapor, la separación y eliminación de virus para las industrias farmacéuticas, entre muchas aplicaciones que tiene este sistema.

1. ASPECTOS GENERALES

1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Desde inicios de la explotación de hidrocarburos, la presencia de agua durante el proceso de producción ha sido percibida como un mal necesario. Aunque se empleen las mejores técnicas de manejo de campo, tarde o temprano la producción de agua aumenta hasta alcanzar límites que dificultan su disposición, representando incluso más del 80% o 90% del volumen de líquidos que se produce.

No obstante el agua se convierte en problema cuando el volumen de petróleo producido que se lleva a la superficie disminuye y los sistemas de tratamiento del agua en superficie se sobrecargan. Lo que afecta la eficacia y productividad ya que los costos adicional que se genera al tratar el agua producida reduce y hasta puede anular la rentabilidad del campo, en la medida en sus excedentes no puede ser vertidos en ningún afluyente superficial o estructura subterránea sin cumplir con una serie de especificaciones técnicas tanto físicas como químicas que pueda ser sobrevaluada respecto a las características de carga del sistema o inferior a las necesidades del ambiente en el que será dispuesta, dependiendo del ecosistema circundante y de la normatividad vigente.

Por lo anterior es importante que las empresas comprometidas con el medio ambiente, hayan de reforzar paulatinamente la compatibilidad de la actividad Industrial con el entorno (más allá de lo legalmente exigible) mediante la reducción continua del impacto medioambiental, a través de la innovación tecnológica y la realización de inversiones medioambientales. Por todo ello con esta monografía se quiere ofrecer una opción viable para el tratamiento de las aguas producidas en los campos petrolíferos como lo

es la OSMOSIS INVERSA y lograr de esta manera reutilizar el agua en los campos agrícolas.

1.2 JUSTIFICACION

Actualmente, el papel que cumple el agua en los campos petroleros tiene gran importancia, ya que estas, usan un porcentaje considerable del agua mundial en procesos tales como la refrigeración, evaporación, como disolvente, como complemento para sus productos, como agua potable para el uso diario de las personas, entre otros.

Ahora bien, es necesario tener en cuenta, que para obtener el máximo aprovechamiento del agua en dichos procesos, se debe necesariamente pasar por técnicas de tratamiento y filtración que permiten lograr purificar, potabilizar e incluso modificar características internas del agua a utilizar.

Entre las etapas de tratamiento y filtración de agua más comunes, encontramos filtraciones de arena, filtraciones de carbón activado, suavizadores, procesos de micro-filtración y el proceso de osmosis inversa de filtración por membrana, siendo este último uno de los medios con mayores límites de separación ya que la membrana solo es permeable por el agua pura, y no para los iones y otras partículas que se encuentran en ella permitiendo de esta manera el tratamiento físico - químico del agua en los campos petroleros.

Dadas las condiciones de la utilización del agua en los campos petroleros y a la gran cantidad de agua utilizada (según el Gerente de Alianza, Jorge Forero, estimó “por cada barril de petróleo salen entre cuatro y cinco barriles de agua, relación que aumentara con el tiempo”), cifra la cual indica que unos cinco millones de barriles de agua producida solamente en Colombia necesitan diariamente un procedimiento adecuado.

Consecuentemente con lo anterior se hace necesario buscar métodos de tratamiento que permitan que el agua producida sea reutilizada en otros ambientes, y por ello surge la presente monografía de grado que ofrece la técnica de tratamiento del agua mediante Osmosis Inversa, para la desalación de salmueras en el cual su sistema de filtración de la membrana permite que el agua salobre sea limpiada a un nivel de calidad de 100 PPM. Permitiendo así que el agua producida en los campos petroleros sea tratada y pueda reutilizarse en diferentes campos minimizando de esta manera el impacto ambiental que viene provocando los campos petroleros.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 OBJETIVO GENERAL:

Diseñar Planta de Tratamiento de aguas, mediante Osmosis Inversa en campos petroleros de Colombia, para su reutilización y uso benéfico.

1.3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS:

- ✓ Analizar las propiedades del agua de producción, para definir el esquema de tratamiento más apropiado.
- ✓ Evaluar las condiciones de pre tratamiento del agua, para llevarla a un proceso de desalinización, para reutilización y uso benéfico.
- ✓ Dimensionar y/o Seleccionar el Sistema de desalinización de agua más adecuado para dar uso benéfico al agua generada.

1.4 MARCO LEGAL

En el marco de la reglamentación de vertimientos del Decreto 1541 de 1978, el Gobierno Nacional a través del decreto 3930 de 2010 reglamentó los procedimientos y aspectos relacionados con la reglamentación de vertimientos estableciendo que las Autoridades ambientales deben iniciar el proceso de acuerdo con los resultados del Plan de Ordenamiento del Recurso Hídrico.

Dentro de este marco legal y reglamentario de los instrumentos de control de los vertimientos puntuales a las aguas superficiales, las aguas marinas, el suelo asociado a un acuífero aplicable para el control de los vertimientos se tienen las siguientes leyes y decretos.

LEY 9 DE 1979

Artículo 3º.- Para el control sanitario de los usos del agua se tendrán en cuenta las siguientes opciones, sin que su enunciación indique orden de prioridad: Consumo humano; Doméstico; Preservación de la flora y fauna; Agrícola y pecuario; Recreativo; Industrial; Transporte.

Artículo 4º.- El Ministerio de Salud establecerá cuáles usos que produzcan o puedan producir contaminación de las aguas, requerirán su autorización previa a la concesión o permiso que otorgue la autoridad competente para el uso del recurso.

Artículo 5º.- El Ministerio de Salud queda facultado para establecer las características deseables y admisibles que deben tener las aguas para efectos del control sanitario.

Artículo 6º. En la determinación de las características deseables y

admisibles de las aguas deberá tenerse en cuenta, por lo menos, uno de los siguientes criterios:

La preservación de sus características naturales; La conservación de ciertos límites acordes con las necesidades del consumo humano y con el grado de desarrollo previsto en su área de influencia; El mejoramiento de sus características hasta alcanzar las calidades para consumo humano y las metas propuestas para un conveniente desarrollo en el área de influencia.

Artículo 7º.- Todo usuario de las aguas deberá cumplir, además de las disposiciones que establece la autoridad encargada de administrar los recursos naturales, las especiales que establece el Ministerio de Salud.

Artículo 8º.- La descarga de residuos en las aguas deberá ajustarse a las reglamentaciones que establezca el Ministerio de Salud para fuentes receptoras.

Artículo 9º.- No podrán utilizarse las aguas como sitio de disposición final de residuos sólidos, salvo los casos que autorice el Ministerio de Salud.

Decreto 3930 de 2010:

CUANTO A USOS DEL AGUA Y RESIDUOS LÍQUIDOS Y SE DICTAN OTRAS DISPOSICIONES.

CAPÍTULO IV

DE LA DESTINACIÓN GENÉRICA DE LAS AGUAS SUPERFICIALES, SUBTERRÁNEAS Y MARINAS

Artículo 9°. Usos del agua. Para los efectos del presente decreto se tendrán en cuenta los siguientes usos del agua:

1. Consumo humano y doméstico.
2. Preservación de flora y fauna.
3. Agrícola.
4. Pecuario.
5. Recreativo.
6. Industrial.
7. Estético.
8. Pesca, Maricultura y Acuicultura.
9. Navegación y Transporte Acuático.

Parágrafo. El Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial dentro de los dieciocho (18) meses, contados a partir de la publicación del presente decreto, podrá definir nuevos usos, establecer la denominación y definir el contenido y alcance de los mismos.

Artículo 10. Uso para consumo humano y doméstico. Se entiende por uso del agua para consumo humano y doméstico su utilización en actividades tales como:

1. Bebida directa y preparación de alimentos para consumo inmediato.
2. Satisfacción de necesidades domésticas, individuales o colectivas, tales como higiene personal y limpieza de elementos, materiales o utensilios.
3. Preparación de alimentos en general y en especial los destinados a su comercialización o distribución, que no requieran elaboración.

Artículo 11. Uso para la preservación de flora y fauna. Se entiende por uso del agua para preservación de flora y fauna, su utilización en

actividades destinadas a mantener la vida natural de los ecosistemas acuáticos y terrestres y de sus ecosistemas asociados, sin causar alteraciones sensibles en ellos.

Artículo 12. *Uso para pesca, maricultura y acuicultura.* Se entiende por uso para pesca, maricultura y acuicultura su utilización en actividades de reproducción, supervivencia, crecimiento, extracción y aprovechamiento de especies hidrobiológicas en cualquiera de sus formas, sin causar alteraciones en los ecosistemas en los que se desarrollan estas actividades.

Artículo 13. *Uso agrícola.* Se entiende por uso agrícola del agua, su utilización para irrigación de cultivos y otras actividades conexas o complementarias.

Artículo 14. *Uso pecuario.* Se entiende por uso pecuario del agua, su utilización para el consumo del ganado en sus diferentes especies y demás animales, así como para otras actividades conexas y complementarias.

Artículo 15. *Uso recreativo.* Se entiende por uso del agua para fines recreativos, su utilización, cuando se produce:

1. Contacto primario, como en la natación, buceo y baños medicinales.
2. Contacto secundario, como en los deportes náuticos y la pesca.

Artículo 16. *Uso industrial.* Se entiende por uso industrial del agua, su utilización en actividades tales como:

1. Procesos manufactureros de transformación o explotación, así como aquellos conexas y complementarios.
2. Generación de energía.

3. Minería.
4. Hidrocarburos.
5. Fabricación o procesamiento de drogas, medicamentos, cosméticos, aditivos y productos similares.

Resolución 0635 de 2015 “Por el cual se establece Los parámetros físicosquímicos y sus valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales de aguas a cuerpos de aguas superficiales y los sistemas de alcantarillado público y se dictan otras disposiciones”.

SECTOR: ACTIVIDADES DE HIDROCARBUROS

ARTICULO 11. Parámetros físicosquímicos a monitorear y sus valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales de aguas residuales no domésticas . ARnD a cuerpos de aguas superficiales de actividades asociadas con hidrocarburos (petróleo crudo, gas natural y derivados). Los parámetros físicosquímicos y sus valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales de aguas residuales no domésticas – ARnD a cuerpos de aguas superficiales de las actividades asociadas con hidrocarburos (petróleo crudo, gas natural y derivados) a cumplir, serán los siguientes:

Tabla 1: Parámetros mínimos permisibles.

| PARAMETRO | UNIDADES | EXPLORACIÓN (UPSTREAM) | PRODUCCIÓN (UPSTREAM) | REFINO | VENTA Y DISTRIBUCIÓN (DOWNSTREAM) | TRANSPORTE Y ALMACENAMIENTO (MIDSTREAM) |
|------------------|----------------|------------------------|-----------------------|-------------|------------------------------------|---|
| Generales | | | | | | |
| pH | Unidades de pH | 6,00 a 9,00 | 6,00 a 9,00 | 6,00 a 9,00 | 6,00 a 9,00 | 6,00 a 9,00 |

| | | | | | | |
|--|---------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| Demanda Química de Oxígeno (DQO) | mg/L O ₂ | 400,00 | 180,00 | 400,00 | 180,00 | 180,00 |
| Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO ₅) | mg/L O ₂ | 200,00 | 60,00 | 200,00 | 60,00 | 60,00 |
| Sólidos Suspendidos Totales (SST) | mg/L | 50,00 | 50,00 | 50,00 | 50,00 | 50,00 |
| Sólidos Sedimentables (SSED) | mg/L | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 |
| Grasas y Aceites | mg/L | 15,00 | 15,00 | 15,00 | 15,00 | 15,00 |
| Fenoles | mg/L | 0,20 | 0,20 | 0,20 | 0,20 | 0,20 |
| Sustancias Activas al Azul de Metileno (SAAM) | mg/L | Análisis y Reporte | Análisis y Reporte | Análisis y Reporte | Análisis y Reporte | Análisis y Reporte |
| Hidrocarburos | | | | | | |
| Hidrocarburos Totales (HTP) | mg/L | 10,0 | 10,0 | 10,0 | 10,0 | 10,0 |
| Hidrocarburos aromáticos Policíclicos (HAP) | mg/L | Análisis y Reporte | Análisis y Reporte | Análisis y Reporte | Análisis y Reporte | |
| BTEX (Benceno, Tolueno, Etilbenceno y Xileno) | mg/L | Análisis y Reporte | Análisis y Reporte | Análisis y Reporte | Análisis y Reporte | |
| Compuestos Orgánicos Halogenados absorbibles (AOX) | mg/L | Análisis y Reporte | Análisis y Reporte | Análisis y Reporte | | |
| Compuesto de Fósforo | | | | | | |
| Fósforo Total (P) | mg/L | Análisis y Reporte | Análisis y Reporte | Análisis y Reporte | Análisis y Reporte | Análisis y Reporte |
| Ortofósforo (P-PO ₄) | mg/L | Análisis y Reporte | Análisis y Reporte | Análisis y Reporte | | |
| Compuesto de Nitrógeno | | | | | | |

| | | | | | | |
|-------------------------------|------|--------------------|--------------------|--|--------------------|--------------------|
| Nitratos (N - NO3) | mg/L | Análisis y Reporte | Análisis y Reporte | Análisis y Reporte | | |
| Nitrógeno Amoniacal (N - NH3) | mg/L | Análisis y Reporte | Análisis y Reporte | Análisis y Reporte | | |
| Nitrógeno Total (N) | mg/L | 10,0 | 10,0 | 10,0 o 40,00 si en el proceso de refino se incluye actividad es de hidrogenación | Análisis y Reporte | Análisis y Reporte |
| iones | | | | | | |
| Cianuro Total (CN-) | mg/L | 1,0 | 1,0 | 1,0 | | |
| Cloruros (Cl-) | mg/L | 1.200,0 | 1.200,0 | 500,0 | 250,0 | 250,0 |
| Fluoruros (F-) | mg/L | Análisis y Reporte | Análisis y Reporte | Análisis y Reporte | | |
| Sulfatos (SO4) | mg/L | 300,0 | 300,0 | 500,0 | 250,0 | 250,0 |
| Sulfuros (S2-) | mg/L | 1,0 | 1,0 | 1,0 | | |
| Metales y Metaloides | | | | | | |
| Arsénico (As) | mg/L | 0,10 | 0,10 | 0,10 | | |
| Bario (Ba) | mg/L | Análisis y Reporte | Análisis y Reporte | Análisis y Reporte | | |
| Cadmio (Cd) | mg/L | 0,10 | 0,10 | 0,10 | | |
| Cinc (Zn) | mg/L | 3,0 | 3,0 | 3,0 | | |
| Cobre (Cu) | mg/L | 1,0 | 1,0 | 1,0 | | |
| Cromo (Cr) | mg/L | 0,50 | 0,50 | 0,50 | | |
| Hierro (Fe) | mg/L | 3,0 | 3,0 | 3,0 | | |
| Mercurio (Hg) | mg/L | 0,01 | 0,01 | 0,01 | | |
| Níquel (Ni) | mg/L | 0,50 | 0,50 | 0,50 | | |
| Plata (Ag) | mg/L | Análisis y Reporte | Análisis y Reporte | Análisis y Reporte | | |
| Plomo (Pb) | mg/L | 0,20 | 0,20 | 0,20 | | |
| Selenio (Se) | mg/L | 0,20 | 0,20 | 0,20 | | |
| Vanadio (V) | mg/L | 1,0 | 1,0 | 1,0 | | |

| Otros parámetros para el análisis y reporte | | | | | | |
|---|------------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| Acidez Total | mg/L CaCO ₃ | Análisis y Reporte | Análisis y Reporte | Análisis y Reporte | Análisis y Reporte | Análisis y Reporte |
| Alcalinidad Total | mg/L CaCO ₃ | Análisis y Reporte | Análisis y Reporte | Análisis y Reporte | Análisis y Reporte | Análisis y Reporte |
| Dureza Cálcica | mg/L CaCO ₃ | Análisis y Reporte | Análisis y Reporte | Análisis y Reporte | Análisis y Reporte | Análisis y Reporte |
| Dureza Total | mg/L CaCO ₃ | Análisis y Reporte | Análisis y Reporte | Análisis y Reporte | Análisis y Reporte | Análisis y Reporte |
| Color - Real (medida de absorción a las siguientes longitudes 436 nm, 525 nm y 620 nm). | m -1 | Análisis y Reporte | Análisis y Reporte | Análisis y Reporte | Análisis y Reporte | Análisis y Reporte |

Tomado de: Página del Ministerio del Medio Ambiente y Desarrollo - MMAD

Parágrafo 1. En los casos en que el vertimiento puntual de agua residuales se realice en un cuerpo de agua superficial receptor o en un tramo del mismo, que tenga como destinación el uso del agua para consumo de humano y doméstico y pecuario la concentración de Hidrocarburos Aromáticos policíclicos (HAP) en el vertimiento puntual de aguas residuales deberá ser menor o igual 0.01 mg/L para aquellas actividades que lo tienen definido como de análisis y reporte.

Parágrafo 2. Para la actividad de exploración y producción de yacimientos no convencionales de hidrocarburos – YNCH, no se admite el vertimiento de las aguas de producción y de los fluidos de retorno a los cuerpos de agua superficiales y al alcantarillado público, hasta tanto este Ministerio

cuenta con la información técnica que le permite establecer los parámetros y sus valores límites máximos permisibles.

2 MARCO TEORICO

Las aguas de producción contienen diferentes cantidades de sales como calcio, magnesio, sodio, y de gases disueltos como monóxido de carbono, dióxido de carbono, ácido sulfhídrico y otros, además de sólidos suspendidos que pueden contener trazas de metales pesados y posiblemente un nivel excesivo de radiación causado por la presencia de estroncio y radio, minerales altamente radiactivos. Muchos de estos compuestos son tóxicos y se pueden concentrar en productos de la cadena alimenticia. Las aguas de producción además contienen niveles inaceptables de crudo suspendido o emulsificado en ellas. La salmuera proveniente de los pozos petroleros no es apta ni para el consumo humano ni para el animal y tampoco puede usarse en riego. Es necesario tener cuidado porque en ocasiones luce aparentemente limpia y es difícil de diferenciar de las aguas dulces. Generalmente en la estación se cuenta con tres o más piscinas interconectadas a través de cuellos de ganso y desde la última piscina se evacuan las aguas de producción hacia el ambiente, en la mayoría de los casos se forman pantanos que se conectan luego con ríos o vertederos.

En la fase de producción se generan cantidades enormes de desechos tóxicos tanto en los sitios de los pozos como en las estaciones de separación, solamente en estas estaciones, se calcula que se generan grandes cantidades de galones de desechos líquidos cada día, los cuales son arrojados generalmente sin tratamiento alguno en piscinas de producción sin revestimiento, formándose una mezcla tóxica llamada agua de producción. Lo anterior es muy común en campos pequeños que no cuentan con las debidas reglamentaciones que exigen las entidades reguladoras.

Todo esto trae como consecuencia que el principal impacto ambiental de esta fase sea la contaminación de los cuerpos de aguas tanto superficiales como subterráneas principalmente con las aguas de formación que son sumamente tóxicas y en general con todos los desechos producidos en esta fase. La contaminación de los cuerpos de agua implica la afectación a especies vegetales y animales principalmente acuáticas a través del ingreso de los tóxicos a las diferentes cadenas alimenticias y a la bioacumulación que se produce en varias especies afectando en última instancia al ser humano.¹

2.1 ORIGEN DE LAS AGUAS DE PRODUCCIÓN

Para comprender el proceso de tratamiento y disposición de aguas de producción es importante conocer e identificar el origen de este subproducto, dentro del marco de las instalaciones petroleras.

En general los campos petrolíferos constan de plantas y componentes para la producción, recepción, almacenamiento, tratamiento, y demás operaciones que se le realizan al petróleo para su destino final, como anteriormente se ha dicho se obtiene asociado al crudo el agua aceitosa como subproducto. Esta producción de agua se puede dar en cada una de

¹ **PEREZ PARRA, Jorge. 1997.** Manual de Potabilización del Agua. [aut. libro] Jorge Arturo Perez Parra. *Manual de Potabilización del Agua.* 3 Edición. Medellín : Universidad Nacional de Colombia sede Medellín, 1997, pág. 3

las etapas del proceso, de manera que hay que saber, conocer y localizar la génesis de este residuo para obtener una secuencia lógica del recorrido del agua y su posterior tratamiento y eliminación.

De acuerdo en donde se originan las aguas de producción y de manera generalizada para la industria petrolera se pueden hablar de los siguientes tipos:

2.1.1. Aguas residuales de proceso. Normalmente en los procesos desarrollados en la producción de petróleo y en las facilidades de superficie para su tratamiento y entrega, se obtiene este tipo de aguas. Como por ejemplo: en los gun barrel se obtiene agua libre que se da por la separación del aceite, el agua de lavado de crudo de las plantas de desalación, en las unidades de tratamiento como deshidratación y en el almacenamiento. Las aguas residuales por lo general contienen sales, metales, aceites libres y emulsionados.

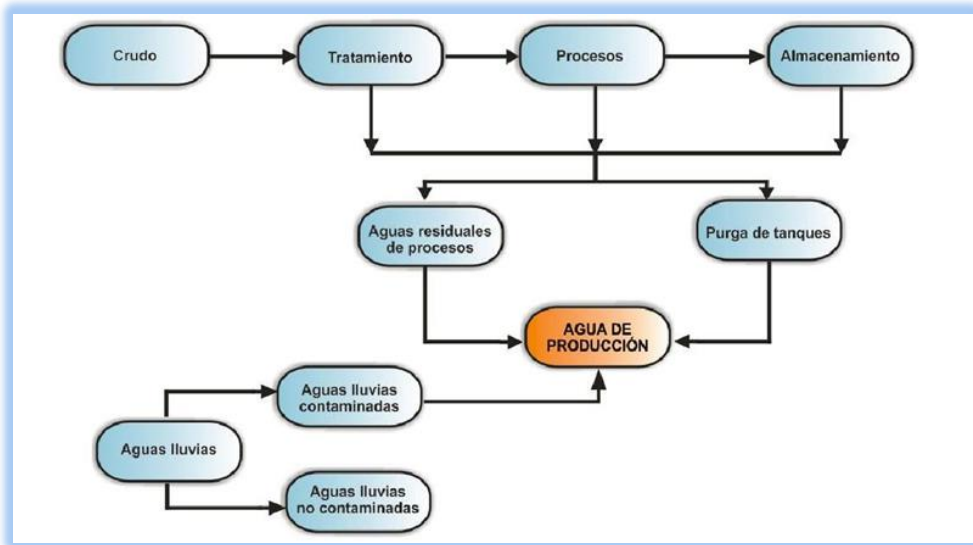
2.1.2 Purgas de tanques. En donde se almacena y se mantiene el crudo para su posterior entrega, también se generan aguas aceitosas, debido al reposo del aceite. Se produce la separación entre hidrocarburo y el agua por diferencia de densidades. El agua queda en la parte inferior del tanque de manera que hay que controlar el nivel purgando el equipo. Las purgas de los tanques contienen habitualmente sales disueltas, algunos metales, grasas y aceites, sólidos disueltos y suspendidos.

2.1.3 Aguas Iluvias. Las pueden haber contaminadas o no contaminadas, las contaminadas están compuestas principalmente por crudo, arrastran sólidos y aceite que se encuentren por su cauce. Si la zona por donde se precipitan es limpia por lo general se consideran no contaminadas. Por su contenido de sólidos y aceite, estas aguas son un problema ambiental y a su vez se debe realizar un tratamiento antes de seleccionar su disposición.

En resumen, es evidente que en los procesos y acciones que se le realizan a cualquier hidrocarburo para su producción, se obtienen cantidades considerables de aguas contaminadas. Para una mayor comprensión se presenta en la figura 1, un diagrama general del origen de este residuo, dentro de las instalaciones de obtención del crudo².

² **ESCALANTE TORRES, Luis Alberto y GIRALDO ESPITIA, Jorge Frank. 2008.** Diseño Conceptual para la Construcción de una Planta de Tratamiento e Inyección de Agua en el Campo Cantagallo. [aut. libro] Luis Alberto Escalante Torres y Jorge Frank GIRALDO ESPITIA. *Diseño Conceptual para la Construcción de una Planta de Tratamiento e Inyección de Agua en el Campo Cantagallo*. Primera. Bucaramanga : Universidad Industrial de Santander, 2008, Vol. I, págs. 36-38.

Figura 1: Diagrama general del origen de las aguas de producción



2.1.4 MANEJO DE AGUAS DE PRODUCCIÓN.

Las aguas de producción se componen de aguas de formación, que son aquellas que provienen de las formaciones geológicas y que se obtienen normalmente durante la extracción del petróleo, y aguas que se contaminan al inyectarlas a un yacimiento petrolero (esta actividad utiliza una gran cantidad de agua superficial).

Estas aguas son altamente contaminantes, por lo que representan un alto riesgo para la fauna, flora, suelos, fuentes de agua y el ser humano. Por ello existen restricciones para su manipulación y/o deposición.

La mayor parte del agua potable en el mundo se encuentra en acuíferos (aguas subterráneas) de poca profundidad. La mayoría de los acuíferos de

agua potable se alimentan de fuentes superficiales y son altamente susceptibles a contaminarse con otros fluidos.

Las aguas de producción son un contaminador 'ideal', pues esencialmente tienen la misma gravedad específica del acuífero y son fácilmente mezclables con el agua fresca. Al momento no existen estudios sobre el eco-toxicidad de los distintos contaminantes provenientes de las aguas de formación en mares tropicales, y aunque la principal preocupación se ha centrado en los hidrocarburos presentes, otros compuestos pueden tener efectos mayores, sobre todo cuando actúan en conjunto.

Las concentraciones de sales en el agua de formación pueden llegar a ser varias veces más alta que la del agua de mar, afectando negativamente a la fauna y flora nativa. Otra fuente importante de impactos, son las altas temperaturas que alcanzan estas aguas.

Las aguas de formación vertidas a los ríos y con altos niveles de hidrocarburos son ingeridas por la población de los alrededores. El máximo permitido de sales en aguas de consumo en algunos países es de 250 mg/l de sodio, de 250 mg/l de cloruros, y de 500 mg/l de sólidos disueltos, aunque los expertos expresan que realmente los niveles óptimos de calidad deberían estar por debajo de los 100 mg/l.

La disposición de las aguas de producción es uno de los temas más discutidos a nivel de la industria petrolera, Por ello existen normas y procedimientos prohibidos o recomendados.

- **Aguas superficiales**

El agua obtenida simplemente es botada en la superficie del suelo provocando la contaminación de ríos, lagos, acuíferos, fuentes de agua. Esto provoca la salinización de esos cuerpos de agua, o del suelo y la biodiversidad asociada.

- **Aguas de inyección**

Consiste en la inyección del agua en la parte anular de los pozos (entre la tubería de revestimiento y la tubería de producción). El fluido se riega en la primera zona permeable, debajo de la tubería de revestimiento, cercana a la superficie.

- **Evaporación**

En zonas áridas, donde se presenta una elevada transpiración que supera la precipitación, las aguas de producción son depositadas en hoyos para ser evaporadas. Con este método se contaminan las fuentes y corrientes de agua subterráneas.

- **Reinyección en Pozos**

Este método pone en riesgo de contaminación de acuíferos, sobre todo cuando los pozos de reinyección no llegan al mismo estrato del que se extrajo el crudo, o la distancia de acuíferos es menor de 10 Km.

- **Recuperación secundaria**

El agua es reinyectada a la formación productora en el pie acuífero para un recobro adicional de petróleo del yacimiento debido al mantenimiento de la presión.

- **Construir Instalaciones para el Tratamiento de Lodos Activos**

Otra alternativa es la construcción de instalaciones para el tratamiento de lodos activos para seguir al tratamiento primario. El proceso de lodos activos, un proceso de tratamiento secundario, utiliza microorganismos para desintegrar la materia orgánica en las aguas residuales. Esto elimina los contaminantes adicionales de las aguas residuales.

- **Construir Estanques de Tratamiento**

Otra alternativa es implementar estanques de tratamiento secundario a las instalaciones de tratamiento primario avanzado. Los estanques permiten la sedimentación y descomposición de los contaminantes de las aguas residuales por medio de procesos naturales. Con dispositivos de aireación mecánica o con algas se puede acelerar el tratamiento en los estanques³.

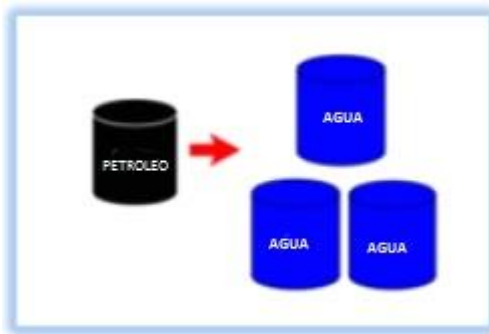
2.1.5 RELACIÓN PETROLEO / AGUA

Es el agua obtenida en superficie, a través de pozos de petróleo y/o gas, desde una formación de interés (agua connata), un acuífero activo (agua intrusiva) o un proyecto de inyección de agua (agua inyectada).

³

CALAO RUIZ, Jorge Emilio. 2007. *Caracterización Ambiental de la Industria Petrolera: Tecnologías disponibles para la prevención y Mitigación de Impactos Ambientales.* Bucaramanga, Santander, Colombia : Universidad Industrial de Santander, 2007. págs. 43-46

Figura 2. Petróleo y agua.



A nivel mundial, en promedio por cada barril de petróleo se producen como mínimo 3 - 5 barriles de agua

Solo en el año 2008 se Produjeron: **250 MMBPD de agua.**

Fuente: Lahcen, Nabzar y Duplan, Jean-Luc. Water in Fuel Production Oil Production and Refining. Panorama Review, 2011.

Durante toda la etapa productiva de un yacimiento la relación agua-aceite (WOR) se va incrementando haciendo que el corte de agua en el pozo alcance valores muy altos. El movimiento del agua estimula el desplazamiento del petróleo y afecta el barrido vertical y areal, determinando de ese modo el factor de recuperación de petróleo de un campo. El factor de recobro en un yacimiento aumenta durante la recuperación secundaria gracias al fenómeno de inmiscibilidad que existe entre el agua y el aceite que se producen, lo cual hace que el agua proveniente de algunas formaciones subyacentes, o debido al fracturamiento aumente la tasa de flujo.

Si bien el agua (figura 2) a menudo se considera un problema, el agua buena, (definida como el agua producida por debajo del límite económico de la relación agua//petróleo RAP) es crítica para el proceso de producción de petróleo. El agua mala, (agua producida por encima del límite económico de la relación agua/petróleo) por el contrario, es agua que

aporta poco valor a la operación de producción, si bien es probable que en algún momento futuro encuentre el camino para su reutilización.

La calidad del agua de producción depende de la región, geología de la formación y los demás fluidos implicados en el proceso de recuperación. Los caudales y presiones pueden variar considerablemente en las proximidades del pozo productor y de esta forma alterar el equilibrio fisicoquímico que prevalece en el yacimiento, esto hace que se presenten emulsiones, que generalmente son la forma en que se producen los fluidos, las cuales son tratadas mediante procesos químicos para llevar a cabo su separación.

- El agua desplaza al petróleo generando su flujo.
- El petróleo es separado del agua.
- El agua es sometida a tratamiento antes de reinyectarla o eliminarla.
- Una parte del agua producida es reinyectada para mantener o incrementar la producción de hidrocarburos.
- El campo se mantiene rentable.

En el caso contrario considerando un ciclo de producción con "agua mala" tenemos que:

- El agua afecta negativamente el flujo de petróleo.
- Disminuye la producción de petróleo y el agua se convierte en problema.
- Los sistemas de tratamiento del agua en superficie se sobrecargan.
- Se genera en superficie más agua de la necesaria para el proceso de reinyección.

- El tratamiento y/o la eliminación de exceso de agua se suma a los costos de
- producción.
- El campo pierde rentabilidad lo que puede provocar el abandono de importantes reservas.⁴

2.2 CARACTERÍSTICAS FÍSICAS Y QUÍMICAS

Antes de seleccionar el equipo y de diseñar el sistema de tratamiento del agua producida para vertimiento, es necesario llevar a cabo un análisis o caracterización de las aguas residuales; esto con el fin de determinar la calidad del agua requerida por las normas ambientales para propósito de vertimiento. Recordemos que la calidad del agua en este caso esta definida generalmente en términos de los problemas que puede llegar a ocasionar al ambiente, fauna y flora.⁵

2.2.1. Características Físicas. Son aquellas que se pueden detectar con los sentidos, lo cual implica que tienen incidencia directa sobre las condiciones estéticas del agua. Las características físicas son la turbiedad, el color, el sabor, el olor y la temperatura.

2.2.2. Turbiedad. Es la propiedad óptica de una muestra de agua para

⁴ **MANCILLA ESTUPIÑAN, Robinson Andres y MESA NAUSA, Henry Oswaldo. 2012.** Metodología para el manejo de aguas de producción en un campo petrolero. [En línea] 2012. [Citado el: 16 de Junio de 2015.] Pag. 33-36.

<http://repositorio.uis.edu.co/jspui/bitstream/123456789/995/2/145188.pdf>.

⁵ **JAIMES CAMPO, Diana Marcela y PICO JIMENEZ, Maria Isabel. 2009.** Diseño de la planta de tratamiento de aguas residuales y de producción evaluando las diferentes alternativas Nacionales y Extranjeras - Aplicación campo Colorado. [En línea] 2009. [Citado el: 9 de Agosto de 2015.] Pag. 22. <http://repositorio.uis.edu.co/jspui/bitstream/123456789/688/2/129404.pdf>.

disipar y absorber la luz en vez de transmitirla en línea recta. La turbiedad es debida a partículas que están en suspensión o en estado coloidal (diámetros menores que 10^{-3} mm) y que comunican al agua la capacidad de diseminar un rayo de luz, fenómeno óptico que captamos como agua sucia o agua barrosa.

Las principales causas de la presencia de turbiedad en el agua son: la erosión causada por las corrientes, situación que aumenta notablemente en invierno, el crecimiento de microorganismos y los desechos domésticos e industriales.

La turbiedad es importante considerarla en aguas de abastecimiento público por las siguientes razones:

2.2.3. Color: A pesar de estar íntimamente ligado a la turbiedad, puede presentarse como una característica independiente. El color incide sobre el aspecto estético del agua, quitándole transparencia.

Dos tipos de color se reconocen en el agua: el color verdadero, o sea el color de la muestra una vez que se ha removido la turbidez, y el color aparente, que incluye no solamente el color de las sustancias en solución y coloidales sino también el color debido al material suspendido. El color aparente se determina sobre la muestra original, sin filtración o centrifugación previa

La remoción del color es una función del tratamiento del agua y se practica para hacer un agua adecuada para usos generales o industriales. La determinación del color es importante para evaluar las características del agua, la fuente del color y la eficiencia del proceso utilizando para su

remoción; cualquier grado de color es objetable por parte del consumidor y su remoción es, por tanto, objetivo esencial del tratamiento: La norma establece que el valor máximo permisible son 15 Unidades de color.

2.2.4. Temperatura. El factor de temperatura es importante porque actúa como elemento que retarda o acelera la actividad biológica, la absorción de oxígeno y bióxido de carbono de la atmósfera por el agua, e influye en la proliferación de algas y en la precipitación con cloro, y por tener influencia sobre la viscosidad del agua, incide también indirectamente en los procesos de mezcla rápida, floculación, sedimentación y filtración.

2.2.5. Conductividad. La conductividad del agua es una expresión numérica de su habilidad para transportar una corriente eléctrica, depende de la concentración total de sustancias disueltas ionizadas en el agua y de la temperatura a la cual se haga la determinación. Por tanto, cualquier cambio en la cantidad de sustancias disueltas, en la movilidad de los iones disueltos y en su valencia, implica un cambio en la conductividad. Por esta razón, el valor de la conductividad es muy usado en análisis de aguas para obtener un estimativo rápido del contenido de sólidos disueltos.

La medida de conductividad permite evaluar rápida pero muy aproximadamente la mineralización global del agua.

La reglamentación francesa insiste sobre el interés de esta medida. Proporciona igualmente las indicaciones siguientes sobre la relación existente entre la mineralización y la conductividad:

Conductividad < 100 $\mu\text{S}/\text{cm}$: mineralización muy débil;

100 $\mu\text{S}/\text{cm}$ < Conductividad < 200 $\mu\text{S}/\text{cm}$: mineralización débil;

200 $\mu\text{S}/\text{cm}$ < Conductividad < 333 $\mu\text{S}/\text{cm}$: mineralización media acentuada;
333 $\mu\text{S}/\text{cm}$ < Conductividad < 666 $\mu\text{S}/\text{cm}$: mineralización Media;
666 $\mu\text{S}/\text{cm}$ <Conductividad<1000 $\mu\text{S}/\text{cm}$: mineralización
Importante;
Conductividad > 1000 $\mu\text{S}/\text{cm}$: mineralización excesiva.

2.2.6. Características Químicas. Por ser el agua un solvente universal, existe la posibilidad de que una inmensa cantidad de elementos y compuestos estén presentes en ella en forma de solución; sin embargo, la gran mayoría de éstos no tienen mucho significado y es por esto que se consideran algunos de ellos solamente, teniendo en cuenta su posible prevalencia en el agua, los efectos adversos que puedan tener sobre la salud, la influencia que tengan en los procesos de tratamiento o las implicaciones de tipo económico⁶.

2.2.7. Potencial de Hidrógeno, pH. Es un término usado universalmente para expresar la intensidad de las condiciones ácidas o básicas de una solución, mediante la concentración del ion hidrógeno.

El pH se define como el logaritmo del inverso de la concentración del ion hidrógeno, o sea,

$$pH = \log \left(\frac{1}{[H^+]} \right) = -\log[H^+]$$

Los métodos generales usados para determinar el valor del pH son: el método colorimétrico, el cual emplea indicadores, sustancias que exhiben diferentes colores de acuerdo con el pH de la solución, y el método electrométrico, en el cual se mide el potencial de un electrodo sensitivo a pH con referencia a un electrodo estándar⁷.

⁶ **PEREZ PARRA, Jorge. 2007.** [aut. libro] Jorge Arturo PEREZ PARRA. *Manual de potabilización del agua*. 3 edición. Medellín : Universidad Nacional de Colombia sede Medellín, 2007. Pag 10

⁷ **ROMERO ROJAS, Jairo Alberto. 1997.** 3 *Calidad de Agua*. Bogotá, Cundinamarca, Colombia : Escuela Colombiana de Ingeniería, 1997. pág. 52

El pH es de gran importancia en un sistema de ósmosis inversa, ya que puede afectar a la calidad y vida útil de la membrana, especialmente si esta es orgánica. Por ejemplo, las membranas de acetato de celulosa deben trabajar en un intervalo de pH comprendido entre 2 y 9 a temperaturas por encima de 35 °C, ya que se degrada con facilidad.

Los valores de pH han de ser referidos a la temperatura de medición, ya que varían con ella. Cuanto mayor sea la temperatura a la que se encuentre la alimentación, menor rango de pH soporta la membrana.

Además, el valor del pH condiciona la formación o desaparición de especies que resultarían perjudiciales para el proceso, como puede ser el CaCO_3 .⁸

2.2.8. Alcalinidad. La alcalinidad de un agua puede definirse como su capacidad para neutralizar ácidos, como su capacidad para reaccionar con iones hidrógeno, como su capacidad para aceptar protones o como la medida de su contenido total de sustancias alcalinas (OH^-).

La determinación de la alcalinidad total y de las distintas formas de alcalinidad es importante en los procesos de coagulación química, ablandamiento, control de corrosión y evaluación de la capacidad tampón de un agua.

⁸ **MUELAS EXPOSITO, Alvaro. 2011.** [En línea] Diciembre de 2011. [Citado el: 10 de Noviembre de 2015.] Pag 52-53. <http://invenio2.unizar.es/record/6670/files/TAZ-PFC-2011-694.pdf>.

En aguas naturales la alcalinidad es debida generalmente a la presencia de tres clases de compuestos:

- ✓ Bicarbonatos
- ✓ Carbonatos
- ✓ Hidróxidos

En algunas aguas es posible encontrar otras clases de compuestos (borato, silicatos, fosfatos, etc.) que contribuyen a su alcalinidad; sin embargo, en la práctica la contribución de éstos es insignificante y puede ignorarse.

2.2.9. Dureza. La presencia de cationes polivalentes, principalmente los cationes de calcio y magnesio dan origen a la dureza de las aguas⁹.

No se ha encontrado ninguna correlación entre las aguas con alto contenido de dureza y daños al organismo. Los problemas más bien son de tipo doméstico e industrial: la dureza impide la formación de espuma, causando mayor consumo de jabón y detergentes cuando se les emplea en operaciones de lavado doméstico; por otra parte, está ligada a otros parámetros como el pH y la alcalinidad, y dependiendo de ellos, puede formar depósitos en las tuberías, obstruyéndolas completamente.

En términos de dureza las aguas pueden clasificarse así:

| | |
|--------------|--------------------|
| 0 -75 mg/l | Blanda |
| 75-150 mg/l | Moderadamente dura |
| 150-300 mg/l | Dura |

⁹ PEREZ PARRA, Jorge. 1997. 3 Medellín, Antioquia, Colombia : Universidad Nacional de Colombia, 1997. pág. 14.

>300 mg/l

Muy Dura

La dureza se determina en el laboratorio por titulación, y se expresa en mg/l como CaCO₃.

2.2.10. Hierro. La presencia de hierro en las aguas no tiene efectos de salubridad, pero afecta el sabor, produce manchas indelebles en los aparatos sanitarios, interfiere en el lavado de ropa y se deposita en la red de distribución causando ocasionalmente obstrucciones y alteraciones en la turbiedad y el color.

2.2.11. Sulfatos. Las aguas naturales no contienen generalmente altas concentraciones de sulfatos, pero cuando se hallan en cantidad apreciable, tienen efectos sobre el sabor y, son laxantes cuando simultáneamente están presentes el manganeso y el sodio. Si el agua adicionalmente contiene calcio o magnesio, los sulfatos reaccionan con éstos formando incrustaciones en tuberías y artefactos donde se conduce o calienta el agua. Los sulfatos son reducidos por bacterias sulforreductoras dando origen al ácido sulfhídrico, lo que produce mal olor al agua y disminuye el pH aumentando su poder corrosivo.

2.2.12. Cloruros. La presencia de cloruros en el agua se considera importante más por razones del gusto que le comunican, que por motivos de salud. Los contenidos de cloruros de las aguas son extremadamente variables y se deben principalmente a la naturaleza de los terrenos atravesados. Habitualmente, el contenido en ion cloro de las aguas naturales es inferior a 50 mg/l.

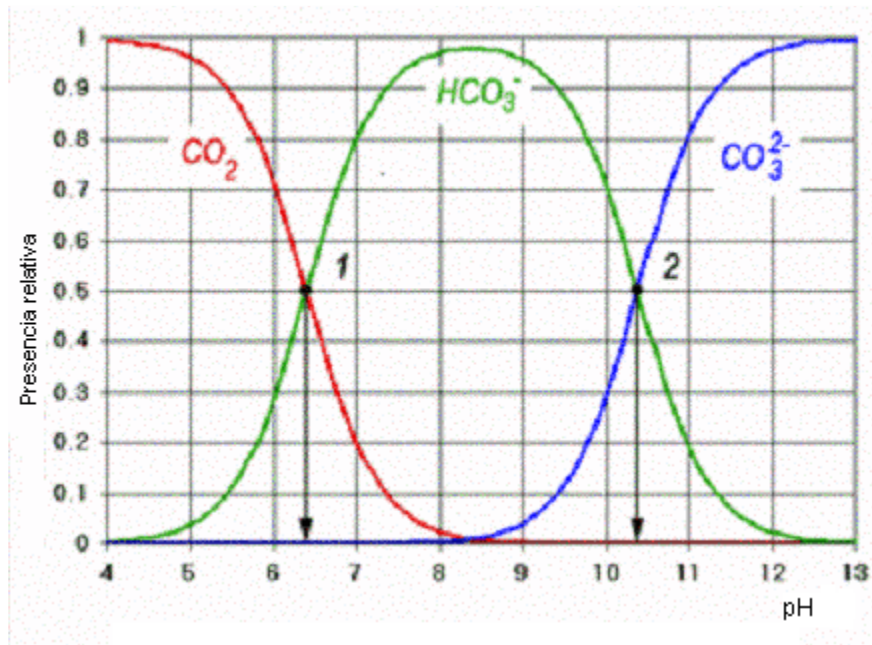
Los cloruros pueden medirse por procedimientos volumétricos, utilizando

indicadores, esto es, por titulación¹⁰.

2.2.13 HCO_3 (mg/l): Este parámetro indica la concentración en mg/l de los aniones hidrogenocarbonato (HCO_3^-) en una corriente dada. Como se avanzó en la descripción del parámetro LSI, el HCO_3^- forma un equilibrio con el CO_2 y el CO_3

2- que se ve fuertemente afectado por el pH del medio, como se recuerda en la figura 3.

Figura 3: Formas de carbono inorgánico a diferentes pH



Fuente: Muelas Exposito, Manual de utilización del software "ROSA" para simulación de unidades de Osmosis Inversa, 2011.

¹⁰ **ARDILA BARJAS, Martha Janeth. 2011. Evaluación de la eficiencia de la planta de tratamiento para la potabilización del agua municipio de Lebrija - Santander. [Tesis de Grado]. Bucaramanga, Santander, Colombia : Universidad Industrial de Santander, 2011. págs. 23-25.**

2.2.14. CO₂ (mg/l): Este parámetro indica la concentración en mg/l de CO₂ disuelto en una corriente dada. El CO₂ es un gas relativamente soluble, producto de la hidrólisis del H₂CO₃, según la reacción:



A su vez, el H₂CO₃ también se hidroliza formando iones HCO₃⁻ y CO₃²⁻ en función del pH del agua, como se observa en la figura 4.15.

El CO₂ es un gas que da al agua propiedades corrosivas, por lo que es bastante común eliminarlo mediante desgasificación.

2.2.15. CO₃ (mg/l): Este parámetro indica la concentración en mg/l de los aniones carbonato (CO₃²⁻). La presencia o ausencia de CO₃²⁻ en un agua dependerá del pH al que se encuentre ésta, como se observa en la figura 4.

Además, los aniones CO₃²⁻ reaccionan con los cationes Ca²⁺ para formar carbonato cálcico, que puede resultar peligroso para la instalación debido a su insolubilidad en agua.

2.2.16. CaSO₄ (% Saturación): Este parámetro indica la concentración de CaSO₄. Esta concentración se indica con respecto a su concentración de saturación, que es a partir de la cual el CaSO₄ comenzaría a precipitar. Así pues, es recomendable mantener bajos porcentajes de saturación. En aguas con gran cantidad de Ca²⁺ y SO₄²⁻ se recomienda su pretratamiento mediante intercambio iónico para evitar posibles precipitaciones.

2.2.17. $BaSO_4$ (% Saturación): Parámetro análogo al $CaSO_4$ (% Saturación), pero referido al $BrSO_4$. Su reducción se consigue mediante su tratamiento con intercambio iónico.

2.2.18. $SrSO_4$ (% Saturación): Parámetro análogo al $CaSO_4$ (% Saturación), pero referido al $SrSO_4$. Su reducción se consigue mediante su tratamiento con intercambio iónico.

2.2.19. CaF_2 (% Saturación): Parámetro análogo al $CaSO_4$ (% Saturación), pero referido al CaF_2 . Su reducción se consigue mediante su tratamiento con intercambio iónico.

2.2.20. SiO_2 (% Saturación): Parámetro análogo al $CaSO_4$ (% Saturación), pero referido al SiO_2 . La sílice se encuentra en el agua disuelta como ácido silícico (SiO_4H_4) y como materia coloidal.

2.2.21. $Mg(OH)_2$ (% Saturación): Parámetro análogo al $CaSO_4$ (% Saturación), pero referido al $Mg(OH)_2$. Su reducción se consigue mediante su tratamiento con intercambio iónico¹¹.

2.3 OTROS PARAMETROS DEL AGUA

2.3.1 El SDI (*Silt Density Index*) es un parámetro que indica el grado de presencia de partículas coloidales en el agua a tratar. Es un parámetro de gran importancia ya que las partículas coloidales son responsables de

¹¹ MUELAS EXPOSITO, Alvaro. 2011. *Manual de utilización del software "ROSA" para simulación de unidades de Osmosis Inversa*. [Proyecto de grado]. Zaragoza, España : Universidad de Zaragoza, 2011. págs. 57-59.

ensuciamientos y obstrucciones en las membranas, provocando una disminución de su rendimiento.

El SDI se determina mediante un procedimiento estandarizado y reproducible, ampliamente aceptado en la industria. Con este procedimiento se estima el grado de ensuciamiento de las membranas debido a la contaminación por partículas coloidales presentes en el agua de alimentación.

El procedimiento consiste en un ensayo, en el que se observa la disminución del flujo a través de un filtro debido al ensuciamiento del mismo, a una presión de la alimentación constante de 30 psi.

El aparato para medir el SDI consiste en un regulador de presión y un portafiltros, en el que se coloca un filtro estandarizado con un tamaño de poro de 0,45 μm , suficiente para ser obstruido por materia coloidal pero no por arena o incrustantes.

2.3.2 TDS: el TDS (*Total Dissolved Solids*), en español SDT (*Sólidos Disueltos Totales*) es un parámetro que indica la concentración (en mg/l) de todos los sólidos que se encuentren disueltos en el agua. Se determina mediante la evaporación de un volumen de agua previamente filtrada.

2.3.3 LSI: El LSI (*Langelier Saturation Index*) indica el grado de saturación del agua con respecto al carbonato cálcico (CaCO_3), correlacionándolo con el pH como variable principal.

A pH bajo, los carbonatos e hidrogenocarbonatos pasarán a ácido carbónico, por lo que no habrá riesgo de deposiciones ni precipitaciones de CaCO_3 (o lo que es lo mismo, el agua no presentará propiedades

incrustantes). En cambio, la elevada concentración de H_2CO_3 provocará que el agua presente características corrosivas.

Por el contrario, a pH elevados, habrá gran concentración de CO_3^{2-} , y muy poco ácido carbónico, por lo que el agua no tendrá propiedades corrosivas. No obstante, los carbonatos tenderán a combinarse con el Ca^{2+} para formar $CaCO_3$. Este carbonato cálcico podría llegar a precipitar al alcanzar una concentración dada (marcada por su equilibrio de solubilidad), provocando deposiciones y dando al agua lo que se conoce como condiciones incrustantes.

La fórmula para calcular el LSI es la siguiente:

$$LSI = pH - pH_s$$

Siendo:

-pH = pH medido en el agua.

-pH_s = pH de saturación en $CaCO_3$, que se calcula mediante la fórmula:

$$pH_s = (9,3 + A + B) - (C+D)$$

Con:

$$-A = (\text{Log}_{10} [\text{TDS}] - 1) / 10$$

$$-B = -13,12 \cdot \text{Log}_{10} (T(K)) + 34,55$$

$$-C = \text{Log}_{10} [Ca^{2+} \text{ en forma de } CaCO_3] - 0,4$$

$$-D = \text{Log}_{10} [\text{Alcalinidad Total Carbonatada}]$$

Todos los parámetros que se encuentran entre corchetes corresponden a concentraciones, medidas en ppm. La Alcalinidad Total Carbonatada se refiere a las ppm de carbonatos que se encuentran libres, de forma que actúan como bases, alcalinizando el agua.

Como se observa en las fórmulas anteriores, el LSI se ve afectado por el pH, el TDS, la temperatura y las concentraciones de carbonatos, tanto libres como unidos al catión Ca^{2+} . Así se deduce que:

-Un agua con un LSI de cero corresponderá a un agua en condiciones óptimas de estabilidad: ni corrosiva ni incrustante.

-Un agua con un LSI positivo corresponderá a un agua con propiedades incrustantes, en la que se darán precipitaciones y deposiciones de carbonato cálcico.

-Un agua con un LSI negativo corresponderá a un agua con propiedades corrosivas.

Por ejemplo, un agua con un índice LSI de 1,0 será un agua incrustante a la que una reducción de su pH en una unidad la llevaría a su condición de equilibrio y la haría por lo tanto, no corrosiva ni incrustante. Si por el contrario se tiene un agua con un LSI de -0,85, el índice indicaría que se trata de un agua corrosiva, a la que un aumento de su pH en 0,85 unidades llevaría a su estado óptimo.

No obstante, hay que tener en cuenta que, a efectos prácticos, el LSI puede perfectamente alcanzar valores distintos de cero, siempre y cuando no se alejen en exceso. En aplicaciones de ósmosis inversa, se evitan valores de LSI positivos, y es recomendable que el flujo de rechazo (que es el más concentrado) presente un LSI cercano a -0,2.

Esto indica que dicho flujo está a 0,2 unidades de pH por debajo de su estado de equilibrio, por encima del cual comenzaría el riesgo de precipitaciones de carbonato cálcico.

El LSI se utiliza para aguas con un valor bajo de sólidos totales disueltos (TDS). Si el TDS supera los 10000 ppm, será necesario recurrir al "Stiff & Davis Index"¹²

2.2.4 Stiff & Davis Index (S&DSI): el "Stiff & Davis Index" es un parámetro que mide el grado de saturación del agua con respecto al carbonato cálcico, al igual que hace el LSI.

Este índice trata de corregir las deficiencias que presenta el LSI a elevados valores de TDS. Generalmente se acepta la siguiente división:

- Utilizar el LSI para valores de TDS < 10000 ppm (generalmente aguas salobres).
- Utilizar el Stiff & Davis Index para valores de TDS > 10000 ppm (normalmente aguas marinas).

Por lo demás, este parámetro funciona de igual forma que el LSI: indica la variación de pH que hay que realizar para llevar al agua a su situación de equilibrio respecto del CaCO₃:

- Aguas con un S&DSI negativo serán aguas corrosivas, a las que un aumento de pH llevará a su estado de equilibrio. Por ejemplo: un agua con

¹² MUELAS EXPOSITO, ALVARO. 2011. *Manual de Utilización de software "ROSA" para simulación de unidades de Osmosis Inversa*. [En línea] 2011. [Citado el: 16 de Enero de 2016.] Pag 53-55. <http://invenio2.unizar.es/record/6670/files/TAZ-PFC-2011-694.pdf>.

un S&DSI de -1,5 requerirá un aumento de 1,5 unidades de pH para llegar a su condición óptima respecto al CaCO₃.

- Aguas con un S&DSI positivo serán aguas incrustantes, a las que una disminución de pH llevará a su estado de equilibrio. Por ejemplo: un agua con un S&DSI de 2 requerirá una disminución de 2 unidades de pH para llegar a su condición óptima respecto al CaCO₃.

En aplicaciones de ósmosis inversa, el criterio a la hora de escoger un S&DSI apropiado es el mismo que para el LSI: se buscan valores de S&DSI ligeramente negativos en la corriente de rechazo (de aproximadamente -0,2), de forma que se evite la precipitación de carbonato cálcico¹³.

2.4 PROCESOS DE TRATAMIENTO DEL AGUA

2.4.1 TIPOS DE SISTEMAS DE TRATAMIENTO DE AGUA

Los dos tipos de sistemas conocidos en la industria petrolera son los descritos a continuación:

- **Sistemas Cerrados:** Se conocen como sistemas cerrados los diseñados para evitar el contacto del agua con el oxígeno. La finalidad de este sistema es minimizar la captación de oxígeno que se disuelve en el agua y así evitar la oxidación de minerales como el Hierro.

¹³ MUELAS EXPOSITO, ALVARO. 2011. *Manual de utilización del software "ROSA" para simulación de unidades de Ósmosis Inversa*. [En línea] 2011. [Citado el: 16 de Enero de 2016.] Pag.56-57. <http://invenio2.unizar.es/record/6670/files/TAZ-PFC-2011-694.pdf>.

- **Sistemas Abiertos:** En un sistema abierto no se excluye el oxígeno y por el contrario se busca airear el agua con el propósito de remover H_2S y/o CO_2 y se adicionan químicos para mantener los remanentes de oxígeno en estado de equilibrio¹⁴.

2.4.2 PRINCIPIOS DE SEPARACION

Una de las principales funciones de los equipos tratadores de agua es separar las gotas de aceite que están sujeta a una dispersión durante el recorrido ascendente en el pozo, a través de los estranguladores en superficie, líneas de flujo, válvulas de control y equipos procesadores.

En el instante de colocar una lata cantidad de energía dentro del sistema, las gotas se dispersan en pequeños tamaños. Cuando la energía impuesta es baja, las pequeñas gotas colisionan y coalescen.

Para separar las gotas de aceite se usan varios procesos dentro de los cuales encontramos los siguientes:

2.4.2.1 Separación por Gravedad: La separación por gravedad aprovecha la fuerza de gravedad para separar los sólidos presentes en un fluido. La condición necesaria para ello es que la densidad del sólido sea mayor que la del fluido.

La técnica de separación por gravedad simple, o sedimentación, ocurre cuando el equilibrio en el sistema se alcanza de una sola vez y la separación es completa en una única operación de separación. La separación por gravedad acelerada, se produce debido a la acción de la

¹⁴ **JAIMES CAMPOS, Diana Marcela y PICO JIMENEZ, Maria Isabel. 2009.** Diseño de la planta de tratamiento de aguas residuales y de producción evaluando las diferentes alternativas Nacionales y Extranjeras - Aplicación Campo Colorado. [En línea] 2009. [Citado el: 15 de Noviembre de 2015.] Pag.40. <http://repositorio.uis.edu.co/jspui/bitstream/123456789/688/2/129404.pdf>.

fuerza de la gravedad dentro de un campo de aceleraciones constante, aprovechando la fuerza centrífuga y las velocidades inducidas.

2.4.2.2 Dispositivos de separación por gravedad

Agua-tratamiento de equipo que hace uso de separación por gravedad incluye:

- Tanques Skim
- Separadores API
- Coalescedores Plate

Estos dispositivos son muy simples y de bajo costo; sin embargo, debido a los grandes tiempos de residencia necesarias para la separación, son pesadas y requieren grandes huellas. Se utilizan comúnmente en ambas instalaciones de estructura fija en tierra y en el mar; sin embargo, son sensibles al movimiento y encuentran un uso limitado en instalaciones flotantes.

Es necesario conocer tanto la concentración de aceite en el agua influente y la distribución de tamaño de partícula para diseñar adecuadamente un separador de gravedad para satisfacer una cierta calidad del efluente. Esta información puede determinarse con precisión solamente mediante el muestreo de la corriente de agua tratada. Las pruebas de laboratorio pueden proporcionar datos indicativos de aumento a escala y correlación.

- **Skim Tank:** Oil Skimmers, Skim Tank, separadores microburbujas Los oil skimmers son equipos que recogen y eliminan aceites sobrenadantes en el agua. El principio básico de funcionamiento es el peso específico de las sustancias a separar. La mayoría de los hidrocarburos tienen un peso específico menor que el del agua, por esta razón flota y se pueden separar fácilmente.

El principio de funcionamiento de los skim tank es el de separación gravitacional que se ve favorecida por el tiempo de residencia.¹⁵

- **Equipo Separador API (American Petroleum Institute):** El proceso de separación de grasas y aceites en los separadores tipo API consiste en la eliminación del agua residual de este tipo de contaminantes siempre que se cumplan las siguientes condiciones:
 - ✓ Estén en fase líquida.
 - ✓ Se encuentren en estado libre (no eliminándose en consecuencia aquellas grasas y aceites que se encuentren disueltos o emulsionados).
 - ✓ Tengan una densidad menor que la del agua.
 - ✓ El tamaño de la gota sea superior a un valor predeterminado en el diseño.
 - ✓ Generalmente el punto de corte se fija en 0,15 mm, valor adoptado en este proyecto.

Entre las funciones que tiene encomendado el proceso de separación de grasas y aceites, se encuentran:

- ✓ Eliminación de la mayor parte de este contaminante del agua residual.
- ✓ Por tratarse en un número importante de casos de hidrocarburos volátiles, evitar la posible formación de atmósferas tóxicas y/o peligrosas.
- ✓ Disminuir riesgos de incendios por acumulación de compuestos potencialmente combustibles en las superficies.
- ✓ Evitar su presencia en los procesos biológicos por la toxicidad de una parte de estos compuestos.

Factores que afectan a la separación de grasas y aceites:

¹⁵

LTDA, ICCD. 2010. ICCD LTDA. *Oil Skimmers, Skim Tank, Separadores microburbujas.* [En línea] 2010. [Citado el: 15 de Noviembre de 2015.] [http://www.iccdltda.com.co/sitio/servicios/tratamiento-de-aguas-residuales/43-oil-skimmers-skim-tank-separadores-microburbujas.](http://www.iccdltda.com.co/sitio/servicios/tratamiento-de-aguas-residuales/43-oil-skimmers-skim-tank-separadores-microburbujas)

- ✓ Tipo y composición del aceite que se pretende eliminar.
- ✓ Estado en que se encuentra el aceite en el agua residual
- ✓ En estos procesos no se eliminan aquellas grasas y aceites que se encuentren emulsionados o bien disueltos.
- ✓ Régimen de flujo
- ✓ Tamaño de la gota (de forma generalizada se diseña para eliminar aquellas partículas de diámetro igual o superior al fijado previamente, normalmente 0,15 mm).¹⁶

- **Coalescedores Plate:** Este tipo de dispositivo de coalescencia tiene una combinación de placas paralelas inclinadas con espaciado fijo, reduciendo así la distancia de gotas de sedimentación de manera significativa, y mejorar el proceso de coalescencia. Este separador se ha desarrollado para aplicaciones donde se requiere una mejora en el rendimiento de colonos gravedad. La disposición de placa inclinada permite que las fases líquidas se desacoplen en diagonal hacia la interface líquido. Normalmente, el flujo entre las placas se mantiene en la región laminar para un mejor rendimiento de separación. La inclinación y la separación entre las placas se fijan en función de la aplicación, la naturaleza de los contaminantes presentes en la mezcla, y el grado de separación necesaria. Típicamente, el ángulo es de cualquiera de 45 ° o 60 ° con la placa de separación de 15 a 100 mm. Debido a la alta resistencia a la incrustación, el Mellaplate W es, por ejemplo, que se utiliza en los separadores de producción de petróleo crudo. También es ideal para el reequipamiento de un sedimentador por gravedad existente para funcionar a un mayor

¹⁶ **HERNANDO MARCOS, Patricia y SAINZ SASTRE, Juan Antonio. 2010-2011. *Planta de tratamiento de aguas residuales de proceso (EDARI) de una petroquímica.* [Proyecto fin de Master]. Madrid, España : Escuela de Organización Industrial, 2010-2011.**

rendimiento y mejorar el rendimiento de separación. Desde el punto de construcción de la Mellaplate W puede hacerse en disposición de bastidor modular o cajas para facilitar la instalación a través de la boca de hombre¹⁷

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

2.4.3.1 Equipo Flotación por aire disuelto (DAF): El sistema DAF utiliza agua presurizada y sobresaturada con aire para producir burbujas de 30 a 60 μm de diámetro, las cuales aparecen en el momento en el que el efluente entra al tanque de flotación y se despresuriza (15). Por lo general, esta tecnología puede ser aplicada en tres configuraciones: presurización total, presurización parcial y reciclo presurizado, siendo esta 15 última la configuración preferida para el 80% de los sistemas de tratamiento de efluentes de refinerías. A fin de mejorar el proceso se hace uso de sustancias químicas, tales como coagulantes y floculantes, que se adicionan previamente. Estas sustancias se dividen en tres grandes grupos: compuestos químicos inorgánicos (cloruro de aluminio, sulfato de

¹⁷ [www.sulzer.com. Coalescedor Plate.](http://www.sulzer.com/es/Products-and-Services/Separation-Technology/Coalescers/Sulzer-Mellaplate?languageswitch=true) [En línea] [Citado el: 31 de Enero de 2016.]
[http://www.sulzer.com/es/Products-and-Services/Separation-Technology/Coalescers/Sulzer-Mellaplate?languageswitch=true.](http://www.sulzer.com/es/Products-and-Services/Separation-Technology/Coalescers/Sulzer-Mellaplate?languageswitch=true)

aluminio, sulfato ferroso, sílice), polímeros naturales (almidón, guar, taninos y sustancias proteicas) y polímeros sintéticos (polielectrolitos).¹⁸

2.4.3.2 Flotación por Aire Inducido (IAF): La flotación por aire inducido (IAF) ha sido utilizada extensivamente para el tratamiento de aguas de producción. Esta técnica utiliza equipos motorizados que inducen el gas dentro de la fase acuosa, como los aireadores, flotadores mecánicos que consisten de un impeler movido por motor, que succiona agua y ésta a su vez succiona el aire del ambiente. A la salida del impeler, unas pequeñas perforaciones producen las burbujas. En este proceso, los valores típicos de tamaño de burbuja generado son superiores a 1.000 mm. Debido a los grandes tamaños de burbuja, se incrementa la cantidad de aire que se debe inyectar para que el proceso sea eficiente. Este sistema requiere, además, grandes difusores para tener influencia sobre toda el agua por trata¹⁹

2.4.4 La Filtración: Es una técnica que permite separar los sólidos presentes en una fase fluida en función de su tamaño de partícula, haciendo pasar ésta a través de un medio poroso (denominado medio filtrante) que permite separar dichos sólidos, y que se dispone sobre un dispositivo conocido como soporte de filtración, siendo el más elemental un embudo de filtración. La separación se realiza gracias a que los poros del medio filtrante son más pequeños que las partículas a separar, de forma

¹⁸ **ALVAREZ DA COSTA, Ana Alicia. 2009.** *Procedimientos para el diseño de una planta de tratamiento de efluentes industriales.* [En línea] Octubre de 2009. [Citado el: 20 de Febrero de 2016.] <http://159.90.80.55/tesis/000145003.pdf>.

¹⁹ **FORERO, Jorge Enrique y DIAZ, J. 1999.** *Diseño de un nuevo sistema de flotación para tratamiento de aguas industriales.* [En línea] Instituto Colombiano del Petroleo, Diciembre de 1999. [Citado el: 15 de Noviembre de 2015.] http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0122-53831999000100006.

que en el medio filtrante queda retenido el sólido que se desea separar del líquido que lo atraviesa, que se denomina filtrado. En la práctica corriente de un laboratorio de Química se emplean tres medios porosos: papel de filtro, placas filtrantes de material cerámico, y membranas de filtración. El paso del líquido a través del medio filtrante se consigue por acción de la gravedad, o bien aplicando vacío mediante una bomba por debajo del filtro, de forma que se facilite el paso del fluido a través del medio filtrante. En este caso, la técnica se denomina filtración a vacío, colocándose el medio filtrante sobre un embudo de porcelana agujereada, conocido como embudo de Büchner. La filtración puede utilizarse para separar cualquier tipo de sólidos, con independencia de cuál sea su densidad con respecto a la del fluido. Es especialmente útil si se desea separar sólidos que se encuentran en pequeña cantidad y que producen turbidez, si se precisa realizar una determinación cuantitativa de un ion presente en disolución por precipitación con un reactivo, o si se desea utilizar una de las fases para una operación posterior.²⁰

2.4.5 PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO

Para entender el proceso de la ósmosis inversa, empecemos por recordar la ósmosis natural, mecanismo de transferencia de nutrientes en las células de los seres vivos a través de las membranas que la recubren. En tal sentido, cuando se ponen en contacto dos soluciones de diferentes concentraciones de un determinado soluto (por ejemplo sales), se genera un flujo de solvente (por ejemplo agua) desde la solución más diluida a la más concentrada, hasta igualar las concentraciones de ambas.

²⁰ Precipitación y Cristalización. www.uam.es. [En línea] [Citado el: 16 de Noviembre de 2015.] https://www.uam.es/docencia/qmapcon/QUIMICA_GENERAL/Practica_6_Precipitacion_y_Cristalizacion.pdf.

Es decir, en otras palabras: si ponemos en contacto, a través de una membrana, agua salada y agua destilada obtendremos un equilibrio entre ambas y quedarán moderadamente saladas. El agua que atraviesa la membrana es "empujada" por la presión osmótica de la solución más salada y el equilibrio del proceso se alcanza cuando la columna hidrostática iguala dicha presión osmótica.

De aquí se deduce que si nuestro interés en el tratamiento es obtener una corriente de agua lo más diluida posible deberemos invertir el fenómeno. Para ello hay que vencer la presión osmótica natural mediante la aplicación en sentido contrario de una presión mayor.

2.4.5.1 Presión Osmótica (π): Es el exceso de presión que debe aplicarse a una solución para impedir el paso del solvente hacia ella, cuando los líquidos están separados por una membrana semipermeable. Es proporcional a la actividad del soluto y por tanto a la concentración de sal. Una aproximación para la presión osmótica es que 100 ppm de sólidos totales disueltos (TDS) generan 1 psi de presión osmótica.²¹

2.4.5.2 Recuperación (R): Se define como el porcentaje del agua de alimentación que se convierte en permeado.

$R = Q_p/Q_f$, Donde:

Q_p : caudal de permeado

Q_f : caudal de alimentación.

²¹ ESCOBAR FIGUEROA, Alejandro. DOCPLAYER. *Tecnologías de Membranas de Aplicación Industrial*. [En línea] [Citado el: 10 de Noviembre de 2015.] <http://docplayer.es/11055754-Tecnologia-de-membranas-de-aplicacion-industrial.html>.

Los sistemas de ósmosis inversa operan a conversiones de 15 a 80 %.

2.4.5.3 Factor de Concentración (CF): Indica el grado de aumento de la concentración de un componente en una operación con membrana. Se define como:

$$CF = C_r / C_f$$

C_r : Concentración en el rechazo (salmuera)

C_f : Concentración de la alimentación.

2.4.5.4 Rechazo de Sal (RS): Indica la capacidad para rechazar componentes inorgánicos disueltos.

Generalmente aumenta con la presión de operación: $\% RS = (1 - C_p / C_f) 100$

C_p : Concentración del permeado

C_f : Concentración del agua de alimentación

2.4.5.5 Presión Transmembrana (ΔP_{tm}): Es la diferencia existente entre la presión en el conducto de alimentación y la presión en el conducto de filtrado

$$\Delta p_{TM} = \frac{(p_f + p_r)}{2} - p_p$$

Dónde:

P_f , P_r y P_p son las presiones correspondientes al flujo de alimentación, rechazo y permeado respectivamente.

2.4.5.6 Polarización por Concentración: Perfil de concentración que tiene un nivel mayor de soluto más cerca de la superficie exterior de la membrana, comparado con el fluido más alejado de la superficie de la membrana.

2.4.5.7 Ensuciamiento: Proceso que provoca la pérdida de producción de una membrana, debido a la deposición de sustancias suspendidas o disueltas sobre su superficie externa, en las aberturas de los poros o dentro de los mismos.²²

2.4.6 PARAMETROS DEL PROCESO DE OSMOSIS INVERSA

2.4.6.1 Presión de Operación: al aumentar la presión disminuye la permeabilidad al aumentar la temperatura se favorece la separación.

2.4.6.2 Temperatura de Operación: Al aumentar la temperatura se favorece la separación.

2.4.6.3 Velocidad de Flujo de Alimentación: mejora la permeabilidad se favorece la separación.

2.4.6.4 Concentración de la solución: aumenta la presión osmótica y la viscosidad

pH:-acetato de celulosa 4 –7.5 -poliamida 2 -11.

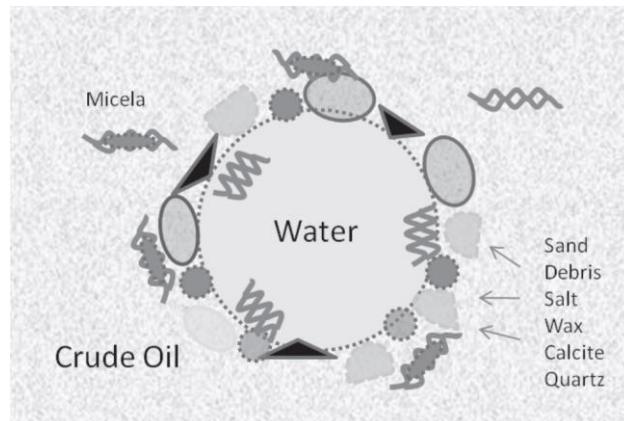
2.4.6.5 Turbidez.- La turbidez es la medida que sirve para detectar las partículas suspendidas.

²²ESCOBAR FIGUEROA, Alejandro. DOCPLAYER. *Tecnologías de Membranas de Aplicación Industrial*. [En línea] [Citado el: 10 de Noviembre de 2015.] <http://docplayer.es/11055754-Tecnologia-de-membranas-de-aplicacion-industrial.html>.

2.4.7 ANÁLISIS DE AGUA PRODUCIDA:

Las aguas producidas han estado presente en la capa freática asociada al petróleo y al gas que se producen, durante cientos millones de años. Para determinar el tratamiento óptimo, previo al método de eliminación elegido y ciertamente, para determinar el método de eliminación a emplear, se requiere de un análisis preciso del agua producida. El análisis es nuestro medio primario para detectar problemas actuales y potenciales, por lo que se debería realizarse en forma rutinaria para todas las aguas producidas.

Figura 4: Representación de una gota de agua estabilizada por emulsionante disolventes según el tamaño y la naturaleza en hidrocarburos crudo



Fuente: (Marfisi & Salager, 2004).

Tabla 2: Contenido típico de agua en la producción de petróleo.

| | Agua Libre | Agua Emulsificada | Agua Disuelta |
|-----|------------|-------------------|---------------|
| MAX | 80% | 20% | < 0,1 |
| MIN | 10% | > 0,1% | > 0,01% |

Tomada de: (Marfisi & Salager, 2004).

La separación de agua de producción de hidrocarburos compuestos, su tratamiento y disposición de una manera apropiada implican la generación de más los costos durante la producción de petróleo crudo. El petróleo crudo producido debe ajustarse a la venta y las condiciones de procesamiento que determinan la cantidad mínima de sedimentos, la sal y agua (BSW).

Los costos de producción incrementales de aceites crudos debido a la formación de agua arrastradas al proceso y otros fluidos pueden ser tan alta que puede determinar la económica viabilidad de la producción de un campo específico. Estos costos están representados principalmente por los

costes de producción asociados a la energía, el transporte y el tratamiento del agua para su eliminación o los procesos de re-inyección. Estos costos pueden incluso alcanzar el 80% del coste total del campo. Es precisamente allí donde los sistemas de alta eficiencia de tratamiento adquieren especial importancia ya que estos costos pueden hacer una diferencia en la determinación de la viabilidad del proyecto.

Sin embargo, los costos de tratamiento del hidrocarburo también aumentan debido al hecho de que el alto contenido de agua en la producción de fluidos también significa alto contenido de sales, sólidos, y otros compuestos indeseables. Este material tiene que retirarse a las especificaciones mínimas de petróleo crudo comercialización. Estas especificaciones son factores limitantes en transporte, comercialización y procesamiento. Costos también puede ser tan alta que puede poner en peligro la viabilidad del proyecto. Sin embargo, debido a la alta petróleo crudo reciente los precios en el mercado internacional (más de USD \$ 100 / bl, 2008), la mayoría de estos proyectos se han convertido en rentable opciones de negocio.²³

2.4.7.1 MÉTODOS DE TRATAMIENTO DE AGUA PRODUCIDA

En 1995, el Instituto Estadounidense del Petróleo (API), hizo su recomendación sobre la mejor tecnología disponible para la gestión del agua producida sobre las instalaciones petrolíferas y de gas en alta mar. El

²³

DE VIANA, Javier. Guía para la disposición y tratamiento del Agua producida. [En línea] [Citado el: 25 de Junio de 2015.] http://www.oilproduction.net/files/tratamiento_de_aguas_producidas.pdf. Recuperado el 25 de Junio de 2015.

informe identificó los siguientes factores que contribuyen a la toxicidad del agua producida: muy pequeñas partículas, salinidad (9% o superior), compuestos volátiles, materiales orgánicos extraíbles (ácido, básico, neutral), amoníaco y sulfuro de hidrógeno. Seis de las tecnologías de tratamiento de agua, ya probadas en tierra, fueron evaluados y calculados.

Tabla 3: Ventajas y desventajas sobre la mejor tecnología disponible para la Gestión y Tratamiento del Agua Producida,

| Método de Tratamiento | Ventajas | Desventajas | Costos |
|---|--|--|--|
| <p>Absorción de Carbono Sistemas modulares de carbono granular activado.</p> | <p>Elimina hidrocarburos y ácido, compuestos bases y neutrales; bajo consumo energético; mayor capacidad de producción que otros tratamientos (excepto biológicas); trata una amplia gama de contaminantes; muy eficiente en eliminar alto MW Orgánicos.</p> | <p>Ensuciamiento de gránulos de carbono es un problema; produce residuos de carbono y repercusión; requiere algún pre tratamiento del flujo de agua producida.</p> | <p>Moderado</p> |
| <p>Extracción con Aire Torre de embalados con aire burbujeante mediante el fluido de agua producida.</p> | <p>Elimina el 95% de VOCs así como benceno, tolueno, naftaleno y fenoles; H₂S y amoníaco puede ser despojado con la adaptación de pH; la mayor temperatura</p> | <p>Puede ser ensuciado por petróleo; riesgo de hierro y formación de escala de calcio; genera un flujo de residuos de gas, que pueden requerir tratamiento;</p> | <p>Baja capital y gastos de funcionamiento; el tratamiento cuestan hasta \$0.10/1,000 gal más \$1.50/k gal si se controla el off-gas por carbón activado</p> |

| | | | |
|--|---|--|-------------------------------|
| | mejora la eliminación de semi-volátiles; pequeño tamaño; bajo peso y necesidades energéticas baja. | requiere algunos pre tratamiento de flujo de agua producida. | |
| Filtración por Membranas Membranas poliméricas Nanofiltración Osmosis Inversa. | Retirada efectiva de partículas y aceite emulsionado y dispersado; huella pequeña, bajo peso y bajo consumo de energía; ratio alto de rendimiento. | No elimina los volátiles o componentes de bajo peso molecular. Petróleo, sulfuros o bacterias pueden ensuciar la membrana, que exige limpieza diaria; rechazo puede contener materiales radiactivos; requiere pre tratamiento de alimentación. | Bajos costos de operación |
| Oxidación química Oxidación de Ozono y/o de peróxido de hidrógeno. | Elimina H ₂ S y partículas; trata hidrocarburos, ácido, orgánicos y bases neutrales, volátiles y no volátiles; necesidad energética baja si se utiliza el sistema peróxido; fácil de operar. | Entradas de alta energía para el sistema de ozono; el petróleo puede ensuciar el catalizador; puede producir lodos y residuos tóxicos; requiere algún tratamiento previo de flujo de agua producida. | Moderados costos de operación |

| | | | |
|---|--|---|--|
| <p>Luz ultravioleta Irradiación por las lámparas ultravioletas.</p> | <p>Destruye los componentes orgánicos disueltos y orgánicos volátiles y no volátiles, incluso orgánicos biosidas; no genera flujo de residuos adicionales; manejo molesto o condiciones de carga alta.</p> | <p>No tratar amoníaco, petróleo dispersado, metales pesados, o la salinidad; relativamente altas necesidades de energía; las lámparas UV (ultravioleta) pueden llegar a ser viciado; los residuos pueden ser tóxicos si se utiliza peróxido; requiere algunos pre tratamiento de flujo de agua producida.</p> | <p>Similares los costos de capital a la oxidación química con ozono, pero los gastos de funcionamiento menores porque no flujos de residuos.</p> |
| <p>Tratamiento biológico Sistema aeróbico con una capa de biotower fija o crecimiento suspendido (por ejemplo eje profundo).</p> | <p>Trata hidrocarburos biodegradables y compuestos orgánicos, H₂S, algunos metales y, en algunas condiciones, amoníaco; las necesidades de energía moderadas; maneja cargas variables, si aclimatada.</p> | <p>Grandes, maquinaria pesada necesaria para largo tiempo residiendo; la acumulación de aceite y hierro obstaculiza la actividad biológica; la aireación hace que la escala de calcio se forme; produce gas y requiere tratamiento de lodo; requiere pre tratamiento de alimentación.</p> | <p>Similares los costos de capital a la Oxidación química con ozono, pero los costes de explotación menor porque no flujos de residuos.</p> |

Tomada de: American Petroleum Institute - API, 1995.

3.0 OSMOSIS INVERSA

La ósmosis inversa (RO, Reverse Osmosis) es una técnica de desmineralización basada en membranas y usada para separar sólidos disueltos, tales como iones, de una solución. Las membranas en general actúan como barreras permeables selectivas que permiten que algunas sustancias (como el agua) permee a través de ellas mientras retiene otras sustancias disueltas (como iones).

RO ofrece la filtración más fina actualmente disponible, rechazando la mayoría de los sólidos disueltos y suspendidos, al tiempo que impiden el paso de las bacterias y los virus, obteniéndose un agua pura y esterilizada.

Aguas con un elevado contenido de sales como, sodio, calcio, boro, hierro..., cloruros, sulfatos, nitratos y bicarbonatos..., pueden ser tratados con la osmosis inversa hasta alcanzar los límites considerados como “agua aceptable” para su utilización.

Las membranas filtrantes son la clave y responsables de separar las sales del agua. Dichas membranas pueden considerarse como filtros moleculares. El tamaño de los poros de estos filtros membranas es extremadamente reducido, por lo que se requiere una presión considerable para hacer pasar cantidades de agua a través de ellas. La elección del modelo de membrana más apropiado es según el agua a tratar y su empleo posterior, determinando el tipo de instalación más idónea.

Las suciedades que quedan en las membranas son posteriormente arrastradas y lavadas por la misma corriente de agua. De esta forma el sistema realiza una autolimpieza constante. Esta corriente de agua de

desperdicio necesaria, está en relación directa con el tipo de membrana que se utiliza y sus exigencias.

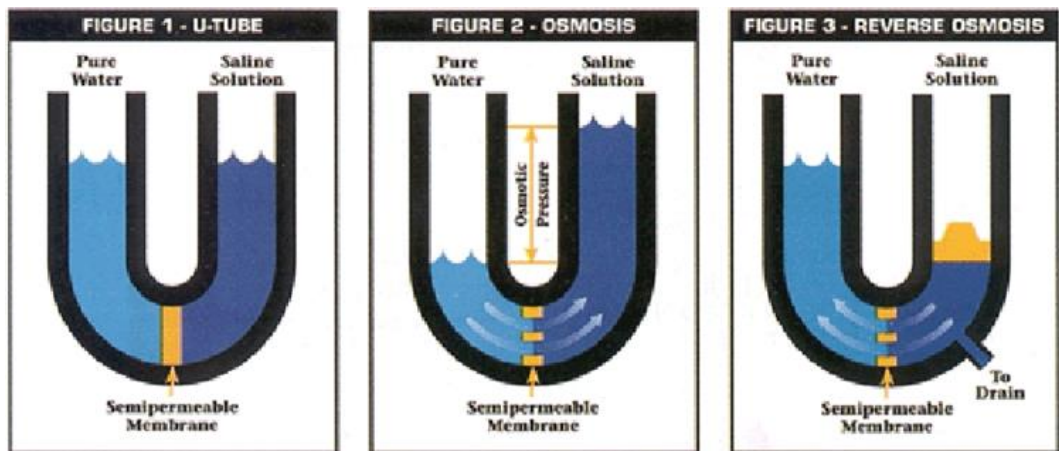
3.1.1 EL PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO.

Para entender el proceso de la ósmosis inversa, empecemos por recordar la ósmosis natural, mecanismo de transferencia de nutrientes en las células de los seres vivos a través de las membranas que la recubren.

En tal sentido, cuando se ponen en contacto dos soluciones de diferentes concentraciones de un determinado soluto (por ejemplo sales), se genera un flujo de solvente (por ejemplo agua) desde la solución más diluida a la más concentrada, hasta igualar las concentraciones de ambas. Es decir, en otras palabras: si ponemos en contacto, a través de una membrana, agua salada y agua destilada obtendremos un equilibrio entre ambas y quedarán moderadamente saladas. El agua que atraviesa la membrana es "empujada" por la presión osmótica de la solución más salada y el equilibrio del proceso se alcanza cuando la columna hidrostática iguala dicha presión osmótica.

De aquí se deduce que si nuestro interés en el tratamiento es obtener una corriente de agua lo más diluida posible deberemos invertir el fenómeno. Para ello hay que vencer la presión osmótica natural mediante la aplicación en sentido contrario de una presión mayor.

Figura 3: Osmosis Inversa



Fuente: Diseño y Soluciones Sostenibles DSS. S.A., 6 de diciembre de 2015

Cuando se logra invertir el fenómeno estamos en presencia de ósmosis inversa o invertida como se ha dado en llamarla.

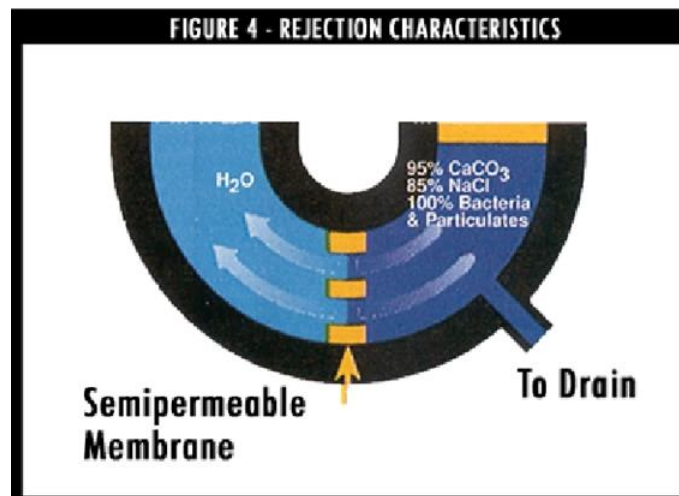
En resumen: si a una corriente de agua salada se le aplica una fuerte presión, lograremos obtener un equilibrio distinto del anteriormente descrito en el cual se generan simultáneamente dos corrientes:

- Una que es la que atraviesa la membrana, queda libre de sólidos disueltos (minerales, materia orgánica, etc.) y de microorganismos (virus, bacterias, etc.): producto o permeado.
- La otra se va concentrando en esos mismos productos sin que lleguen a depositarse en la membrana, porque la tapan y se eliminarían en forma continua, constituyendo el concentrado.

3.1.2 LA MEMBRANA DE LA ÓSMOSIS INVERSA

Es una membrana que tiene un área "microporosa" que rechaza las impurezas y que no impide el paso del agua. La membrana rechaza las bacterias, pirógenos, y 85%-95% de sólidos inorgánicos. Los iones "polivalentes" son rechazados más fácilmente que los iones "monovalentes". Los sólidos orgánicos con un peso molecular superior a 300 son rechazados por la membrana, pero los gases pasan a través. La ósmosis inversa es una tecnología de rechazo en porcentaje. La pureza del agua producida depende de la pureza del agua en el ansa. La pureza del agua producida por la ósmosis inversa es más grande que en el agua de alimentación.

Figura 4: Rechazo de la Osmosis Inversa



Fuente: Diseño y Soluciones Sostenibles DSS. S.A, 6 de Diciembre de 2015

3.1.3 AGUA RECHAZADA

Un gran porcentaje (50-90%) del agua de alimentación no pasa por la membrana pero corre del otro lado, limpiando el agua continuamente y trayendo los sólidos inorgánicos y orgánicos para drenarlos. Esa agua se llama agua "rechazada".

3.1.4 FACTORES DEL AGUA DE ALIMENTACIÓN

Los factores del agua de alimentación que afectan la membrana:

- **Presión.-** La presión del agua de alimentación afecta la cantidad y la pureza del agua producida por la ósmosis inversa. Baja presión del agua de alimentación causa baja corriente y baja pureza.
- **pH.-** Determinar la variedad del pH en agua de alimentación es muy importante. Es recomendado de usar una variedad más amplia de membranas cuando el agua de alimentación es básica, ácida o inestable.
- **Índice de Saturación de Langelier (Langelier Saturation Index - LSI).-** El LSI indica el principio de la formación de una incrustación o sarro sobre el área de la membrana. El LSI se calcula con la temperatura, el total de sólidos inorgánicos, la dureza alcalina, y pH del agua de alimentación. Si el índice LSI es positivo, se recomienda instalar un suavizador de agua ante del sistema de ósmosis inversa.
- **Cloro Libre (TFC) y Bacterias.-** Las membranas de acetato de celulosa necesitan una limpieza constante de TFC para impedir la propagación de bacterias y que se dañe la membrana. En contraste, la poliamida y las membranas finas, como cintas, son dañadas por el TCF. El carbón

activado es usado para remover el TCF cuando la poliamida y las membranas finas lo necesitan.

- **Temperatura.**- La duración de la membrana se basa sobre la temperatura del agua de alimentación que debe ser de 25°C. Por cada 1°C bajo 25°C, la cantidad de la producción del agua es reducida por 3%. Cuando el agua de alimentación se tiende a quedarse regularmente bajo 25°C, es recomendado que el agua caliente y fría se mezclen para que la temperatura suba a 25°C. El agua de alimentación que tiene una temperatura superior a 35°C dañara la mayoría de las membranas.
- **Índice de Densidad Silt (Silt Density Index – SDI).**- El SDI es una medida que sirve a medir las partículas de submicrones que tienen tendencia a bloquear las membranas. La corriente del agua a una presión específica es filtrada a través una membrana en forma de disco y que es recuperada durante un periodo de tiempo fijo. La rapidez de la corriente del agua y el volumen total recogido determina el índice.
- **Turbidez.** La turbidez es la medida que sirve para detectar las partículas suspendidas.

3.1.5 APLICACIONES

Las principales aplicaciones de las membranas de RO incluyen: desalinización; remoción/reducción de subproductos de la desinfección (DBP), dureza, color, contaminantes inorgánicos, compuestos orgánicos sintéticos y volátiles, patógenos; y recuperación de aguas residuales para reuso.

Tenga en cuenta que aunque las membranas RO/NF también pueden remover sólidos suspendidos y material particulado, cualquier carga de ese tipo puede dañar (obstruir) rápidamente (y algunas veces irreversiblemente) las membranas semipermeables ya que estas no son porosas y por tanto no son capaces de retrolavado. Por tanto, aunque RO (y NF) podría reducir los niveles de material particulado (es decir, turbiedad, conteo de partículas, etc.), la tecnología no es aplicada específicamente para este propósito, y pre-tratamiento para remover este material aguas arriba de las membranas es siempre aplicado.

Las membranas de ósmosis inversa han sido usadas ampliamente para el tratamiento de agua como se muestra en la Tabla 3.

Tabla 4: Aplicación de la ro en tratamiento de agua

| Uso Industrial | Agua Potable | Reúso y Tratamiento de Agua Residuales |
|--|--|--|
| Agua Ultrapura, Agua de calderas, agua pura para procesos y uso diario en industrias | Desalinización de agua de mar y agua salobre ²⁴ | Agua industrial, agua de agricultura, agua potable indirecta |

Tomada de: Diseño y Soluciones Sostenibles DSS. S.A., 6 de Diciembre de 2015

3.1.6 DESALINIZACIÓN

La desalinización del agua de mar es la producción de agua potable o de calidad industrial, dulce, de baja salinidad, a partir de una fuente de agua salada (agua de mar, bahía u océano) por medio de separación con membrana o evaporación (destilación por calor).

²⁴ El agua salobre es un agua con contenido mineral mayor que el de las aguas dulces, pero menor que el del agua de mar. En general aguas salobres contienen entre 1.000 y 3.000 mg/L de sólidos disueltos totales.

Entre las tecnologías de desalinización disponibles hoy, la ósmosis inversa es considerada el proceso de desalinización más económico. La desalinización de agua de mar con RO tiene ventajas en las áreas de ahorro de energía, más bajo costo de capital, menor tiempo de arranque y parada, menor periodo de construcción, menos espacio de instalación y menor costo total del agua.

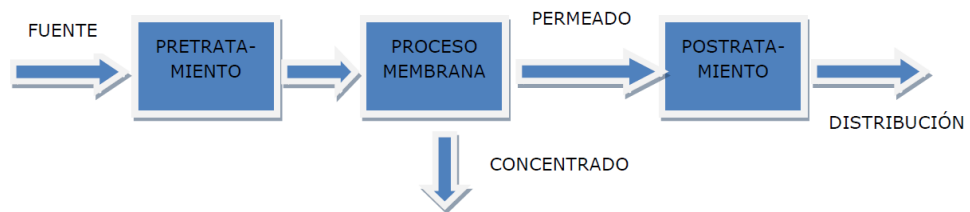
3.1.7 AGUA ULTRAPURA

Las tecnologías basadas en membranas se han convertido en el estándar de la industria para los sistemas de agua ultra pura en las industrias de semiconductores, farmacéuticas y de generación de potencia eléctrica.

3.1.8 SISTEMA TIPO DE OSMOSIS INVERSA

Un sistema típico con membranas de RO consiste en tres subsistemas separados: pre-tratamiento, el proceso de membrana y el pos-tratamiento.

Figura 5 : Sistema Típico Osmosis Inversa (RO)



Fuente: Diseño y Soluciones Sostenibles DSS. S.A., 6 de Diciembre de 2015

Esencialmente todas las fuentes de agua donde se usan sistemas de membranas RO (y NF) deben someterse a ciertos niveles de pre-

tratamiento el cual busca preservar la integridad de las membranas, maximizando su eficiencia y durabilidad.

Los procesos de pre-tratamiento usualmente involucran la adición de ácidos, inhibidores de incrustación, o ambos, para prevenir la precipitación de sales poco solubles, seguido de una etapa de filtración (por cartucho) de 5 a 20 μm para prevenir la obstrucción por partículas. Otros pre-tratamientos adicionales (típicamente aguas arriba del filtro) se pueden requerir para agua con alto potencial de obstrucción, tales como agua de superficie.

El pos-tratamiento puede incluir muchas unidades típicas de un sistema convencional de tratamiento de agua potable, tales como aireación, desgasificación, ajuste de pH, adición de químicos contra la corrosión, fluorización, y desinfección. Un entendimiento completo de las características de la fuente de agua y las metas de calidad de agua es esencial para el exitoso diseño y operación de una planta de tratamiento con RO/NF, porque los contaminantes presentes en la fuente de agua determinan la combinación de pre- y pos-tratamiento que serán necesarias.

3.1.9 OBSTRUCCIÓN

La obstrucción de membranas es un resultado de la deposición de sólidos suspendidos, orgánicos y microbios en la superficie de la membrana, típicamente en el lado de abastecimiento/concentrado.

Una membrana obstruida presenta dos problemas principales de desempeño: presión de operación más alta de lo normal (para compensar el menor flujo de la membrana a presión constante) y una caída de presión más alta de lo normal.

Las causas de obstrucción de una membrana Ro son:

- Depósito de cieno (limo) u otros sólidos suspendidos que han sido inadecuadamente removidos por el pre-tratamiento
- Incrustaciones inorgánicas causadas por la precipitación de sales poco solubles o sílice.
- Obstrucciones biológicas causadas por el excesivo crecimiento microbiano
- Interacción de orgánicos con la membrana (obstrucción química).

La bio-obstrucción ha sido considerado uno de los problemas más serios en la operación de las plantas de Ro (especialmente desalinizadoras de agua de mar). El método usual para prevenirlo es la dosificación continua de cloro en la toma de agua. Sin embargo, esto crea un nuevo problema por la poca/nula tolerancia de las membranas de RO al cloro.

Se considera que la obstrucción química es causada por la adsorción de materiales orgánicos tales como sustancias húmicas y surfactantes en el agua de abastecimiento o en la superficie de la membrana. La Tabla 4 muestra las directrices de calidad de agua generalmente aceptadas para minimizar la obstrucción de la membrana de RO.

Tabla 5: Directrices de calidad de agua generalmente aceptadas para minimizar la obstrucción de la membrana de RO

| Sustancia | Medida | Valor |
|---------------------|---------------|--------------|
| Sólidos suspendidos | Turbiedad | < 1 NTU |
| Coloides | SDI | < 5 |

| | | |
|--------------------------------------|---------------------------------|------------------------------|
| Microbios | Filtración por membrana | < 1.000 UFC/ml ²⁵ |
| Orgánicos | Concentración COT ²⁶ | < 3 ppm |
| Color | Unidad de color | < 3 APHA ²⁷ |
| Metales: hierro, manganeso, aluminio | Concentración | < 0,05 ppm |
| Sulfuro de hidrogeno | Concentración | < 0,1 ppm |

Tomada de: Diseño y Soluciones Sostenibles DSS. S.A., 6 de Diciembre de 2015

3.1.10 INCRUSTACIONES

La incrustación de una membrana RO es el resultado de la precipitación de sales saturadas sobre la superficie de la membrana.

Una membrana incrustada presenta tres problemas principales de desempeño: presión de operación más alta de lo normal (para compensar el menor flujo de la membrana a presión constante), una caída de presión más alta y un menor rechazo de sales de lo esperado.

La Tabla 6 muestra las directrices de calidad de agua generalmente aceptadas para minimizar la incrustación de la membrana de RO.

Tabla 6: Directrices de calidad de agua generalmente aceptadas para minimizar la incrustación de la membrana de ro

²⁵ UFC/ml Unidad Formadora de Colonias por mililitro.

²⁶ COT Carbono Orgánico Total

²⁷ El color APHA es un estándar de color definido por la APHA (asociación americana de la salud pública) que fue pensado originalmente para describir el color de las aguas residuales, pero su uso se ha ampliado para incluir otras aplicaciones industriales. El color de APHA o el número de APHA refiere a un estándar del platino-cobalto. Los colorímetros se pueden calibrar según las soluciones estándar del cobalto del platino y las soluciones poliméricas se pueden comparar a los estándares para determinar el número de APHA. Cuanto más alto es el número de APHA, más el amarillo la solución polimérica.

| Sustancia | Medida | Valor |
|---------------------|--------|--------|
| Sílice | ppm | 200 |
| Bario, Estroncio | ppm | < 0,05 |
| Calcio | LSI | < 0 |

Tomada de: Diseño y Soluciones Sostenibles DSS. S.A., 6 de Diciembre de 2015

3.1.11 TIPOS DE MEMBRANAS

El desempeño de los sistemas de los sistemas de RO está caracterizado por dos parámetros: flujo de permeado y rechazo de sales. Este desempeño depende del material y estructura de la membrana.

3.1.11.1 MATERIALES DE MEMBRANAS

Los materiales más comunes son el acetato de celulosa (y sus derivados) y las poliamidas aromáticas (referidos como compuestos de película delgada). La Tabla 7 muestra un resumen general de las ventajas y desventajas claves de las membranas de celulosa y de película de delgada, aunque de tenerse presente que las propiedades y características varían según el fabricante y la membrana específica.

Tabla 7: Comparación de las membranas de película de delgada y de acetato de celulosa

| PARAMETRO | MEMBRANA DE PELICULA DELGADA DE POLIMEROS | MEMBRANA DE ACETATO DE CELULOSA |
|-------------------|---|---------------------------------|
| Rechazo de sales | Más Alta (> 99,5%) | Más baja (Hasta 95%) |
| Rechazo de Sílice | > 96% | ≈85% |
| Presión Neta | Más baja (10-15 bares ²⁸) | Más alta (15-30 bares) |

²⁸ 1 bar = 14,5 psi = 100 kPa

| | | |
|----------------------------------|---|---|
| Carga en la superficie | Más negativa (Limita el uso de coagulantes catiónicos en el pretratamiento) | Neutral (no limitaciones en pretratamiento con coagulantes) |
| Tolerancia al cloro | Pobre (hasta 1000 ppm-h. Necesita decoloración) | Aceptable (continuo uso de 1-2 ppm de cloro es aceptable) |
| Frecuencia de limpiado | Más alta (semanas a meses) | Más baja (meses a años) |
| Requerimientos de pretratamiento | Alto (SDI < 4) | Más bajo (SDI < 5) |
| Tolerancia a la obstrucción | Aceptable | Buena |
| Remoción de Orgánicos | Alta | Relativamente más baja |
| Bio-obstrucción | Más susceptible | Menos susceptible |
| Bio-degradación | Ninguna | Más alta |
| Tolerancia al pH | Alta (2-13) | Limitada (4-8) |
| Temperatura | Hasta 30°C | Hasta 45°C |

Tomada de: Diseño y Soluciones Sostenibles DSS. S.A., 6 de Diciembre de 2015

Principalmente debido a las mejores características de rechazo y a las menores presiones de trabajo, las membranas compuestas de película delgada son más usadas en las aplicaciones de tratamiento de agua. La excepción son las aplicaciones con fuentes de agua ricas en orgánicos, para las cuales las membranas de acetato ofrecen significativos beneficios en términos de limitada bio-obstrucción de la membrana, limpieza y pretratamiento necesario.

3.1.11.2 MEMBRANAS DE ACETATO DE CELULOSA

Las características predominantes de las membranas de acetato de celulosa (CA, Cellulose Acetate) son:

- La morfología relativamente lisa de la superficie de la membrana ofrece alguna protección contra la obstrucción ya que no hay espacios muertos en la membrana donde los materiales incrustantes pueden ser atrapados.
- La carga neutra de la superficie minimiza el potencial de obstrucción con polímeros catiónicos que puedan ser arrastrados desde el pre-tratamiento.
- Capacidad de tolerar hasta 1 ppm de cloro libre de forma continua ofrece alguna protección contra el crecimiento biológico en la membrana. Esto es particularmente importante porque los polímeros de CA en sí mismos.
- suministran nutrientes para la población microbiana, que a su vez metabolizan el polímero y degradan la membrana.
- La temperatura está limitada a 35°C.
- El pH de operación está limitado de 4 a 6.
- La presión de operación está en el rango de 200 a 400 psi (presiones superiores pueden producir la compactación de la membrana, aplastándola y haciendo por tanto más densa).
- El rechazo de sales varía según se use una membrana “estándar” o una membrana de alto “rechazo”. El rechazo de sílice es solamente del 80%.

3.1.11.3 MEMBRANAS DE POLIAMIDA (PA) COMPUESTA

- Las membranas compuestas, algunas veces llamados “compuestos de película delgada” son esencialmente una combinación de dos polímeros fundidos sobre un soporte de tela.
- Las características predominantes de las membranas compuestas de poliamida son:
- La morfología de la superficie es desigual, ofreciendo muchas áreas donde los materiales incrustantes pueden ser atrapados y mantenidos por la membrana.
- La carga de la superficie es negativa y por tanto atrae los polímeros catiónicos que puedan ser arrastrados desde el pre-tratamiento.
- No pueden tolerar el cloro libre ni ningún otro oxidante. Algunos fabricantes establecen un límite de exposición de 200-1.000 ppm-hora para la pérdida de la capacidad de rechazo de la membrana.
- La temperatura está limitada a 45°C.
- El rango de pH de operación es de 2 a 11 aunque puede variar con el fabricante.
- La presión de operación está en el rango de 150 a 400 psi.
- El rechazo de sales y de sílice es mucho más alto que en las membranas CA.

3.1.11.4 MÓDULOS DE MEMBRANAS

Las formas básicas de los módulos de membrana son:

- Placa y Marco
- Tubular
- En espiral

- Fibra fina hueca

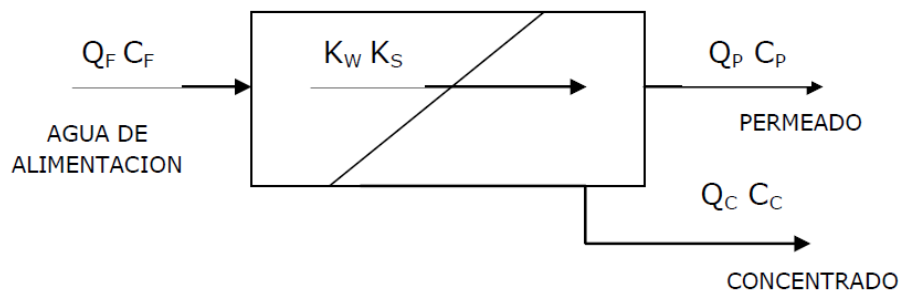
Tabla 8: Comparación de los módulos básicos de membrana RO

| PROPIEDAD | PLACA Y MARCO | TUBULAR | EN ESPIRAL | FIBRA FINA HUECA |
|--|---------------|-----------|------------|------------------|
| Densidad de empaquetado ft ² /ft ³ | 45-150 | 6-120 | 150-380 | 150-1.500 |
| Potencial de incrustación | Moderado | Bajo | Alto | Muy Alto |
| Facilidad de limpiado | Buena | Excelente | Pobre | Pobre |
| Costo Relativo de Fabricación | Alto | Alto | Moderado | Bajo |

Tomada de: Diseño y Soluciones Sostenibles DSS. S.A., 6 de Diciembre de 2015

3.12 ECUACIONES

La Figura muestra un elemento de una membrana, así como los parámetros básicos para describir el flujo, concentración y presión.



Se aplican las siguientes definiciones y ecuaciones:

QF = Tasa de flujo de agua de alimentación en unidades de volumen por tiempo, v. gr. gpd (galones por día)

QP = Tasa de flujo de permeado en unidades de volumen por tiempo, v. gr. gpd

QC = Tasa de flujo de concentrado en unidades de volumen por tiempo, v. gr. Gpd

CF = Concentración de soluto en el agua de agua de alimentación en unidades de masa, v. gr. mg/L

CP = Concentración de soluto en permeado en unidades de masa, v. gr. mg/L

CF = Concentración de soluto concentrado en unidades de masa, v. gr. mg/L

KW = Coeficiente de transferencia de masa de agua en unidades de flujo de agua por presión, v. gr. gpd/ft²/psi

KS = Coeficiente de transferencia de masa de soluto en unidades de longitud por tiempo, v. gr. ft/d

3.12.1 BALANCE DE MASA PARA EL FLUJO DE AGUA

$$Q_F = Q_P + Q_C$$

3.12.2 BALANCE DE MASA PARA EL FLUJO DE SOLUTO

$$Q_F C_F = Q_P C_P + Q_C C_C$$

3.12.3 FLUJO DE MEMBRANA

Tasa de flujo de permeado por unidad de área de membrana. Se expresa en metros cúbicos por metro cuadrado (m³/s m²) o galones por día por pie cuadrado (gfd) del área de superficie de la membrana activa.

3.12.4 RECUPERACIÓN (R)

La razón entre el volumen de agua producido por el sistema de membrana (Q_P) y el volumen de agua de suministro (Q_F) para esta producción es comúnmente definido como recuperación y se expresa como un porcentaje del volumen de agua de abastecimiento

$$R = \frac{Q_P}{Q_F}$$

3.12.5 FACTOR DE CONCENTRACIÓN (CF)

Razón de la concentración de solutos en el flujo de concentrado (C_C) a la concentración de solutos en el flujo de alimentación (C_P).

$$CF = \frac{C_C}{C_P}$$

Si se asume una concentración muy baja en el permeado, entonces el CF puede aproximarse por:

$$CF = \frac{Q_F}{Q_C} = \frac{1}{1 - R}$$

Donde R = Recuperación expresado como un decimal

Para un cálculo más preciso, si conocemos el paso de sales (o el rechazo de sales), el factor de concentración puede ser calculado como:

$$CF = \frac{[1 - (R \times SP)]}{1 - R}$$

Donde R y SP se expresan como decimales.

La calidad del concentrado también puede ser predicha con base en un modelo de difusión si se conoce la presión de operación, la calidad del agua de abastecimiento, el porcentaje de recuperación y el coeficiente de transferencia de masa de soluto.

3.12.6 PASO DE SALES (SP)

Se refiere al porcentaje de sales disueltas del agua fuente (CF) que pasan a través de la membrana al agua producida (CP)

$$SP = \frac{C_P}{C_F} \times 100\%$$

3.12.7 RECHAZO DE SALES (SR)

La concentración de sales en el agua de abastecimiento (CF) que es rechazada por una membrana. Se calcula como:

$$SR = \left(\frac{C_F - C_P}{C_F} \right) \times 100\% = 100\% - SP$$

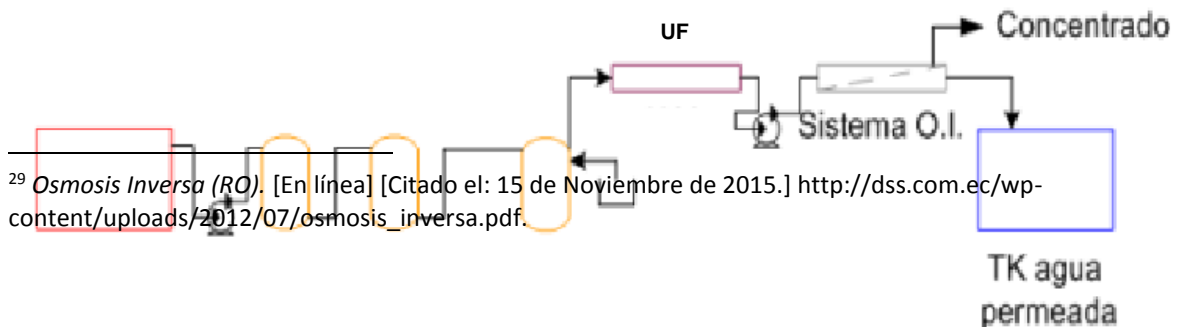
Cada membrana tiene la habilidad de rechazar un cierto porcentaje de las sales presentes en el agua de alimentación. La mayoría de las membranas Ro pueden rechazar del 95 al 99,5% de las sales de agua de abastecimiento.

3.12.8 POLARIZACIÓN DE CONCENTRACIÓN

Mientras el agua permea a través de la membrana, la materia rechazada se acumula detrás de la membrana y forma una capa de alta concentración de sales que incrementa la presión osmótica y reduce la permeabilidad. El fenómeno de formación de esta capa cercana a la membrana y con mayor concentración relativa de sales respecto de la solución de alimentación se llama polarización de concentración. La razón de la concentración de sal cercana a la pared de membrana sobre la concentración en el flujo general se conoce como factor β (beta)²⁹.

4.0 DESCRIPCIÓN PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUA PRODUCIDA, MEDIANTE OSMOSIS INVERSA EN CAMPOS PETROLEROS DE COLOMBIA.

Figura 6: Diagrama de flujo Sistema de Tratamiento, por medio de osmosis inversa



²⁹ *Osmosis Inversa (RO)*. [En línea] [Citado el: 15 de Noviembre de 2015.] http://dss.com.ec/wp-content/uploads/2012/07/osmosis_inversa.pdf.

CPI

Sedimentador DAF Filtro

El proceso se inicia con la entrada del agua proveniente de los yacimientos de hidrocarburos y gas, luego por bombeo se extrae del pozo, pasan por el separador trifásico (donde separa Crudo, Agua y gas), una vez separado el agua producida, llega al “*sedimentador*”, en el que la separación de sólidos de gases se emplea también el término separación de polvos. La fase sólida puede ser tanto una materia de interés como una no deseada (depuración de gases). En la separación por gravedad, la corriente de gas se hace pasar por un canal de separación a velocidad reducida. Las partículas sedimentan durante este recorrido y se acumulan.

En la práctica, la separación de mezclas de sólidos y líquidos (suspensiones) tiene lugar en tanques o cámaras de sedimentación. Por ellos se mueve la suspensión a velocidad constante. La sección de la cámara puede ser de forma rectangular o circular. En los tanques de sedimentación rectangulares, la suspensión entra por un extremo y sale por el rebosadero situado en el extremo opuesto. Durante este recorrido sedimentan las partículas sólidas en el fondo del tanque. El fondo del tanque está inclinado para poder evacuar los sólidos sedimentados. Además hay dispositivos con los que se pueden retirar del fondo los sedimentos sólidos (lodos). Los tanques de sedimentación se utilizan, sobre todo, para el tratamiento. El rango que puede remover esta tecnología, está entre (4000 – 500 ppm) de agua producida.

Como se ha comentado anteriormente el agua producida que llega a la planta, tiene un índice SDI y una turbidez que puede ensuciar y dañar prematuramente las membranas, por lo que es conveniente incluir además del sedimentador un coalescedor – “*Interceptor de Placas Corrugadas*” (CPI), El eje de las corrugaciones, similares a un tejado, es paralelo a la dirección de flujo, con una inclinación estándar de 45° por donde el agua es forzada a fluir hacia abajo y así poder remover las partículas de aceite presentes en el agua. Las gotas de aceite ascienden en sentido contrario al flujo de agua y se concentran en el tope de cada corrugación formando una capa en la superficie. Cuando el aceite alcanza el último paquete de platos se recoge en un canal y se lleva a la interface agua-aceite. Este tipo de sistemas de tratamiento permite obtener efluentes tratados con concentraciones de aceites y grasas bajo los 10mg/L, cumpliendo así con la normativa nacional.

Los coalescedores recuperan aguas por un lado y recupera aceites, se generan lodos con bajísimo contenido de agua, menor al 10%, el rango de remoción de este sistema está entre (1000 – 300 ppm) de agua producida.

El agua tras el paso del Coalescedor - CPI, es bombeado a alta presión a la entrada del DAF -“*La flotación por aire disuelto*” el cual separa las partículas sólidas (sólidos en suspensión), líquidas (aceites y grasas) y para la separación y concentración de fangos, que consiste en unir a las partículas que entran en el flotador, pequeñas burbujas de aire para que éstas formen un conjunto de densidad menor que la del agua y floten; de esta forma se consigue separar del agua partículas de mayor densidad que ésta. Cuando a la flotación por aire disuelto le precede un tratamiento de coagulación-floculación, el rendimiento en la separación de la materia

sólida en suspensión es mucho mayor, pudiendo llegar sin ningún problema a una eliminación del 95 %; esto supone además una reducción de la DBO del orden de al menos el 40 %, dependiendo del tipo de vertido, obteniendo una reducción de (500 – 200 ppm) de agua producida.

Una vez removido con la tecnología DAF, aún hay turbidez e hidrocarburos que pueden romper la membrana, dañando así el sistema de Osmosis inversa, por lo que es necesario instalar sistemas de “*filtros convencionales*” de cáscara de nuez, como lecho de secado retienen partículas significativas en el rango de tamaños de 0 a 10 micras, también eliminan prácticamente todas las partículas >2 micras y reduce de forma significativa las partículas <2 micras. El medio de cáscara de nuez se puede fregar eficazmente con aire o gas, sin necesidad de usar bombas o agitadores. Hay 15 modelos estándar que van desde 1,500 hasta 60,000 BPD (50 a 2,000 gpm, o sea 11 a 450 m³/h).

El medio filtrante consiste de un lecho de “Cáscara de Nuez”, material adecuado para retener el crudo y las partículas sólidas presentes en el agua de producción. El agua ingresa al Filtro de “Cáscara de Nuez” a una presión entre 50 y 60 psi. A medida que se acumula el crudo y las partículas sólidas en el lecho filtrante, aumenta la caída de presión a través del mismo. Al proceso de regeneración del lecho se le llama retrolavado el cual se hace cada determinado tiempo (programado por el operador) de cualquier forma por seguridad estructural del equipo (no por práctica operativa) cuando se alcanza un valor de caída de presión de máximo de 10 psi (20 psi es el máximo diferencial por diseño estructural), el cual inicia un ciclo de retrolavado automáticamente. Las etapas del ciclo de

retrolavado se ejecutan de acuerdo a los tiempos establecidos a través de un controlador.

El ciclo de retrolavado se realiza también por decisión del operador. El agua para realizar el retrolavado es la misma agua de proceso a tratar, la limpieza se efectúa invirtiendo el flujo a través de la unidad para remover y desplazar las trazas de crudo acumuladas, esta acción inversa (junto a la inercia generada por la presión a válvula cerrada de la bomba de alimentación) expande el medio filtrante, limpiándolo por acción hidráulica y fricción entre partículas.

Luego de pasar el agua producida por la penúltima tecnología como pre tratamiento (Filtración), utilizamos el sistema de ultrafiltración (UF), que es una membrana en forma de fibra hueca de menos de un milímetro de diámetro. Se componen de un tipo poroso, con un tamaño máximo de poro de 0,01 micras, o 10.000 veces más delgadas que un cabello humano.

La filtración es de tipo externo-interno, lo que significa que el agua filtrada se tomará en el interior de las fibras huecas. Los sólidos suspendidos, microorganismos y virus son bien retenidos en la superficie exterior de las fibras.

Los módulos de ultrafiltración se componen de varios cientos de estas fibras huecas que proporciona un área de superficie suficientemente grande para asegurar un flujo por lo tanto la producción.

El agua pre-filtrada (<130 micras) en el interior del cartucho de ultrafiltración y ocupa todo el espacio disponible. La fuerza impulsora es la

presión del líquido a tratar (0 a 1,5 bar). El agua a presión entra en el módulo y a través de la barrera formada por la membrana. Las sustancias capturadas son retenidas en la superficie de la membrana y el agua producida (denominada filtrado o permeado) se retira desde el interior de las fibras. La eliminación de este último es producido por el lavado a contracorriente módulo lleva a cabo periódicamente.

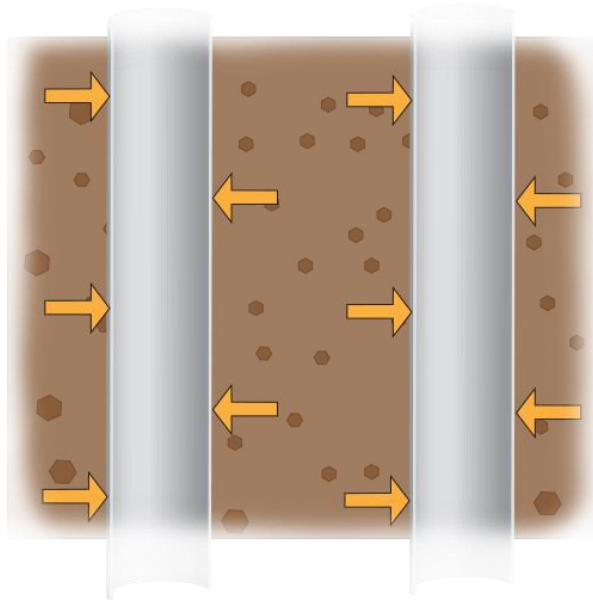
Rendimiento:

- Reducción de la turbidez: de 0,1 a 500 NTU
- Retención de bacterias de log 6 a 0 o 99.9999%
- Retención de virus: de log 4 a 0 o 99,99%

Imágenes ilustrativas del proceso:

El pre-filtrada a 130 micras agua llena el cartucho de ultrafiltración y luego pasa a través de las membranas de fibra hueca para el filtrado a 0,01 micras.

Figura 7: Vista en sección esquemática de las membranas de fibras huecas en el agua pre-filtrada



Fuente: Recuperado de web <http://www.elessia.com/es/explicacion-del-proceso-ultrafiltracion.html>

5.0 CAMPO ESCUELA UIS 12

5.1 DATOS BÁSICOS DE YACIMIENTO

En el Campo UIS 12 se han realizado una serie estudios básicos para su desarrollo las cuales se pueden observar en la tabla 9, aunque tiene una gran deficiencia en cuanto a información de fluidos, lo cual hace más difícil la decisión para procesos de reactivación.

Actualmente el pozo en producción, U12 produce entre 10000 y 11000 BOPD, y 20000 BWPD.

Tabla 9: Datos Básicos de Yacimiento

| CARACTERISTCA | UNIDADES | POZO |
|-------------------|----------|------|
| Presión estática* | Psi | 900 |

| | | |
|---------------------------|----------------|---------|
| Temperatura de Yacimiento | °F | 114 |
| API promedio | °API | 41.2 |
| Sg Gas en Separador | Fracción (vol) | 0,958 |
| Pb | Psia | 648 |
| Viscosidad a Pb | Cp | 1,64 |
| Bo a Pb | Rb/Stb | 1,091 |
| RS a Pb | Scf/Stb | 140 |
| Profundidad Promedia | Ft | 1700 |
| Aceite Original | MM Bls | 20 |
| Porosidad Promedio | % | 13,2 |
| Área | Acres | 634 |
| Espesor promedio de arena | Ft | 22,5 |
| Espaciamiento / pozo | Acres | 20 - 30 |
| Factor de Recobro | % | 14,83 |

Tomada de: Estudio de ECOPETROL "diagnóstico y estrategias de recobro para ocho áreas de la gerencia centro oriente". 2003

5.2 TOMA DE MUESTRA DEL AGUA PRODUCIDA CAMPO UIS 12

El presente informe muestra el análisis de parámetros fisicoquímicos de las aguas residuales industriales generadas en el campo UIS 12 (ver tabla 10), el muestreo fue realizado en la entrada y salida de las plantas de tratamiento UIS 12, el monitoreo corresponde el seguimiento mensual.

Las fechas en las que se tomaron las muestras fueron: Monitoreo Enero 2015: entre el 28 y 29 de Enero, Monitoreo Febrero 2015: desde el 18 al 19 de Febrero.

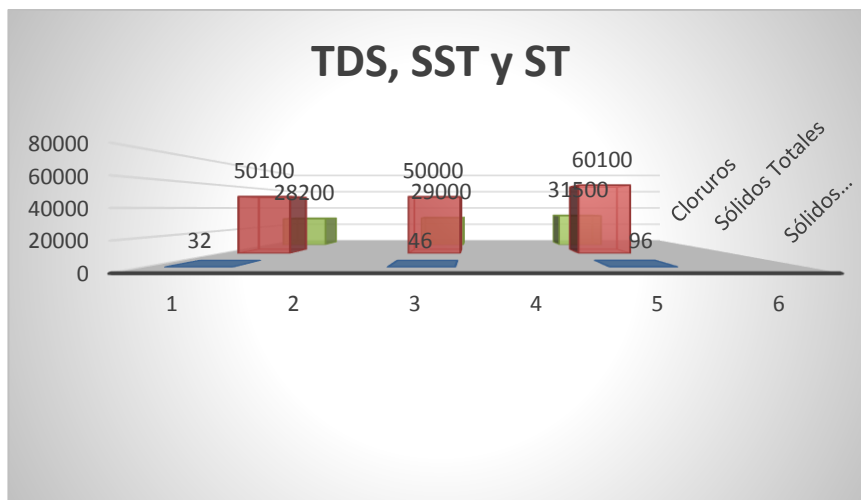
Tabla 10: Datos Básicos de monitoreo de Agua Producida

| PARÁMETROS | UNIDADES | DICIEMBRE | ENERO | FEBRERO |
|------------|----------|-----------|-------|---------|
|------------|----------|-----------|-------|---------|

| | | ENTRADA UIS | ENTRADA UIS | ENTRADA UIS |
|-----------------------------------|------|----------------|----------------|----------------|
| Temperatura | °C | 25 | 26,5 | 27 |
| pH | | 7,24 | 7,54 | 7,69 |
| Conductividad | mg/L | 74900 | 86100 | 103000 |
| Sólidos Suspendidos Totales | mg/L | 32 | 46 | 96 |
| Sólidos Totales | mg/L | 50100 | 50000 | 60100 |
| DBO5 | mg/L | 127 | 269 | 245 |
| DQO | mg/L | 317 | 419 | 402 |
| Grasa y aceites | mg/L | 22,6 | 16,2 | 481 |
| Hidrocarburos Totales | mg/L | 21 | 13,8 | 433 |
| Alcalinidad total | mg/L | 93,8 | 230 | 243 |
| Cloruros | mg/L | 28200 | 29000 | 31500 |
| Turbiedad | mg/L | 8,43 | 86,2 | 66,4 |
| Fenoles totales | mg/L | 2,39 | 2,82 | 0,925 |
| Bario total | mg/L | 5,33 | 7,95 | 8,69 |
| Sodio | mg/L | 15100 | 15500 | 30470 |
| Cadmio | mg/L | < 0,015 | < 0,015 | < 0,015 |
| Cromo total | mg/L | < 0,109 | < 0,109 | < 0,109 |
| Hierro | mg/L | 1,81 | 8,65 | 10,2 |
| Níquel | mg/L | < 0,085 | < 0,085 | < 0,085 |
| Plomo | mg/L | < 0,052 | < 0,052 | < 0,052 |

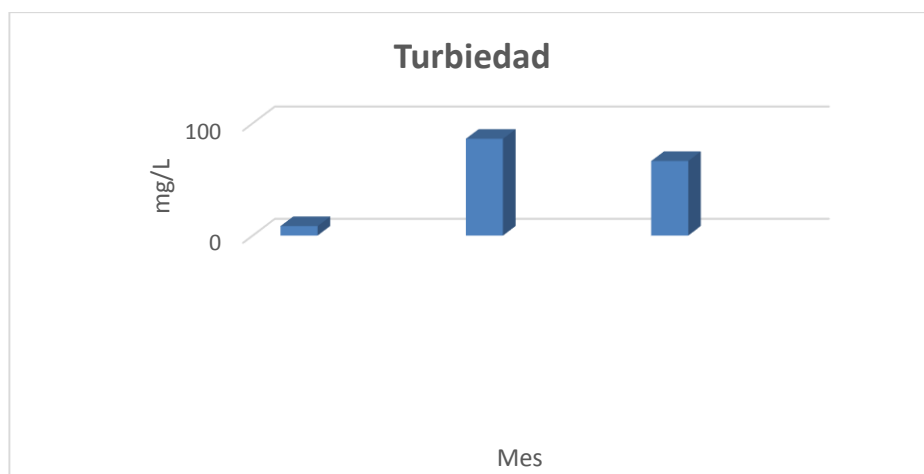
En la tabla muestra la concentración de sólidos: se observa notoria presencia de sólidos totales (ST), sólidos suspendidos (SST), de forma general se registra una menor concentración en la salida de los sistemas o concentraciones similares, en cambio Sólidos Disueltos Totales (SDT) hay un incremento considerable con los cloruros.

Figura 8: Datos de entradas campo UIS 12, TDS, SST y ST



Por otra parte el incremento sustancial de Hidrocarburos totales (Hc's), Conductividad, Alcalinidad, turbiedad, grasas y aceite, entre otros parámetros.

Figura 9: Datos de entrada campo UIS 12 de Turbiedad



5.3 RESULTADOS OBTENIDOS DE DISEÑO

5.3.1 SISTEMA OSMOSIS INVERSA CAMPO UIS 12

Se obtuvo un diseño de las plantas de tratamiento de agua de osmosis inversa con una Sistema (Módulo o Paso) con dos etapas (concentrado y permeado), incluyendo un sistema de pre tratamiento del agua, que son necesarias para el correcto funcionamiento de la planta.

La planta de osmosis inversa consta de los siguientes procesos, que al ser acoplados, generan los mejores resultados con lo referente al nivel de la calidad de agua tratada:

Sedimentador.

Interceptor de Placas Corrugadas (CPI).

Unidad de Flotación de Aire Disuelto (DAF).

Filtro de cascara de nuez.

Membrana de Ultrafiltración (UT).

Pre tratamiento

Membranas semipermeables (osmosis inversa)

Almacenamiento de agua tratada o permeada.

A continuación se mostrará los cálculos de diseño de la Osmosis Inversa (RO), con pH Agua de Alimentación (feed water), temperatura, tipo de alimentación, caudal de agua bruta, Factor de Ensuciamiento (FF), pasos de sales (SP), edad del elemento, como datos iniciales.

Cuadro 1: Datos de entrada

| | | | |
|-----------------------------|-----------------|---------------------------------|-------------|
| Calculado por Luis López L. | | | |
| Caudal bomba alta presión | 43,75 gpm | Caudal de permeado | 25200,0 gpd |
| Presión de alimentación | 59,2 psi | Caudal agua bruta | 63000,0 gpd |
| Temperatura de alimentación | 25,0 °C(77,0°F) | Conversión | 40,00 % |
| pH agua alimentación | 7,50 | Edad elemento | 0,6 años |
| Dosis químico,mg/l, 100 % | 1,8 H2SO4 | Disminución de flujo %, por año | 5,0 |
| Energía específica | 1,41 kwh/kgal | Factor de ensuciamiento | 0,97 % |
| NDP paso | 47,4 psi | Aumento de SP, per año | 7,0 % |
| Flujo promedio | 3,50 gfd | Perdida de carga entre etapas | 3,0 psi |

Tipo de alimentación Mar Pozo
Convencional

| Paso | Perm. | Caudal / Tubo | | Flujo | D P | Flujo | Beta | Presión por etapas | | | Per m. | Elemen to | Elemen to | PV # x |
|------|-------|---------------|--------------|-------|-----|-------|------|--------------------|--------|--------|--------|-----------|-----------|--------|
| | | Caudal | Alimentación | | | | | Conc | Per m. | Boo st | | | | |
| | | gpm | gpm | gpm | gfd | psi | gfd | psi | psi | psi | mg/l | | | |
| 1-1 | 12,7 | 21,9 | 15,5 | 3,8 | 5,4 | 4 | 1,02 | 0 | 0 | 53,8 | 1,9 | SWC5-LD | 12 | 2 x 6 |
| 1-2 | 4,8 | 31,1 | 26,2 | 2,9 | 9,8 | 3,2 | 1,01 | 0 | 0 | 41 | 3,6 | SWC5-LD | 6 | 1 x 6 |

Tabla 11 . Resultado componentes Iones, cationes, tipo de elemento.

| Ion (mg/l) | Agua bruta | Agua de alimentación | Permeaar agua | Rechazo 1 | Rechazo 2 |
|--------------------|---------------|----------------------|---------------|---------------|----------------|
| Dureza, como CaCO3 | 300,45 | 300,45 | 0,386 | 423,2 | 500,7 |
| Ca | 65,42 | 65,42 | 0,084 | 92,1 | 109,0 |
| Mg | 33,40 | 33,40 | 0,043 | 47,0 | 55,7 |
| Na | 20,56 | 20,56 | 0,127 | 28,9 | 34,2 |
| K | 3,10 | 3,10 | 0,024 | 4,4 | 5,2 |
| NH4 | 50,00 | 50,00 | 0,384 | 70,3 | 83,1 |
| Ba | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,0 | 0,0 |
| Sr | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,0 | 0,0 |
| CO3 | 0,42 | 0,28 | 0,000 | 0,6 | 0,8 |
| HCO3 | 120,70 | 118,52 | 0,946 | 166,4 | 195,4 |
| SO4 | 224,56 | 226,36 | 0,251 | 318,8 | 377,2 |
| Cl | 108,30 | 108,30 | 0,481 | 152,4 | 180,2 |
| F | 0,20 | 0,20 | 0,002 | 0,3 | 0,3 |
| NO3 | 1,40 | 1,40 | 0,046 | 2,0 | 2,3 |
| PO4 | 0,00 | 0,00 | 0,000 | 0,0 | 0,0 |
| SiO2 | 0,00 | 0,00 | 0,000 | 0,0 | 0,0 |
| B | 0,00 | 0,00 | 0,000 | 0,0 | 0,0 |
| CO2 | 3,71 | 5,39 | 5,39 | 5,39 | 5,39 |
| TDS | 628,06 | 627,55 | 2,39 | 883,26 | 1043,45 |
| pH | 7,67 | 7,50 | 5,45 | 7,64 | 7,70 |

Como se observa en la tabla 11, las cantidades (ppm) Iones y Cationes de Agua Producida, ya tratada con sus respectivos pH, TDS, la cantidad de agua permeada y los rechazos en cada paso.

Como se observa en la tabla 12, los porcentajes de saturación de carbonatos, estroncio y bario, Índice de Saturación de Langelier (LSI), el

cual determina la cantidad de carbonato de calcio que hay dentro del sistema que puede evitar incrustaciones o corrosión.

Tabla 12. Porcentaje de saturación, Índice de Langelier y presión Osmótica.

| Saturaciones | Agua bruta | Agua de alimentación | Rechazo | Límites |
|---|-----------------------|---------------------------------|----------------|----------------|
| CaSO ₄ / ksp * 100, % | 5 | 5 | 9 | 400 |
| SrSO ₄ / ksp * 100, % | 0 | 0 | 0 | 1200 |
| BaSO ₄ / ksp * 100, % | 0 | 0 | 0 | 10000 |
| Saturación de SiO ₂ , % | 0 | 0 | 0 | 140 |
| CaF ₂ / ksp * 100, % | 0 | 0 | 1 | 50000 |
| Índice de saturación Ca ₃ (PO ₄) ₂ | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 2,4 |
| Índice de saturación Langelier | 0,00 | -0,18 | 0,44 | 2,5 |
| Fuerza ionica | 0,02 | 0,02 | 0,03 | |
| Presión osmotica, psi | 4,7 | 4,7 | 7,9 | |

En la tabla 13 Muestra el diagrama de flujo o diseño básico de sistema RO en serie de agua producida con 0,5 ppm de contenido de TDS y de Hc's respectivamente. Con sus dos etapas, colector de permeado y de concentrado o rechazo.

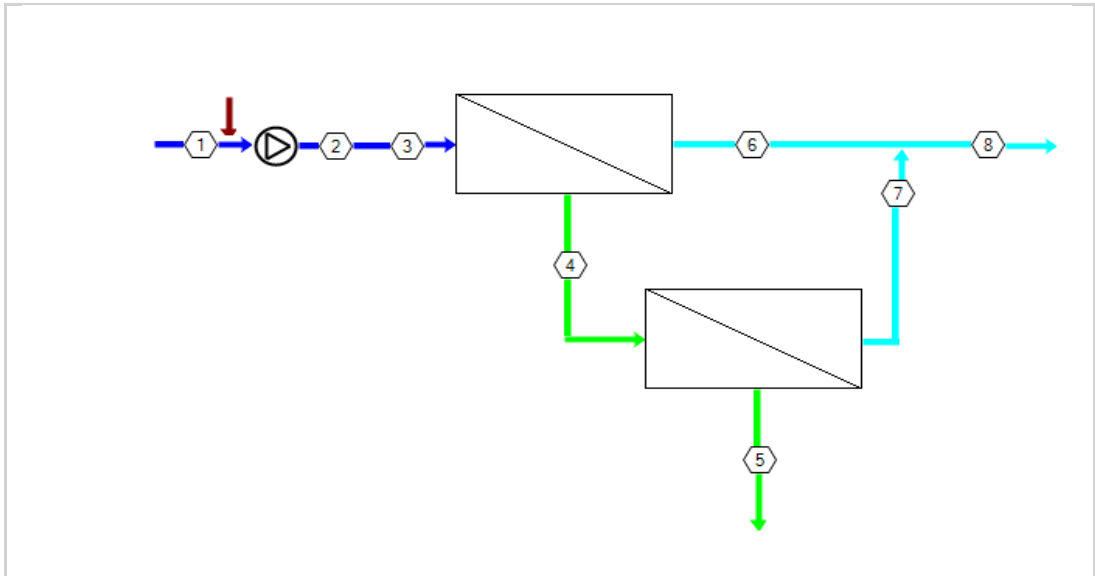
Tabla 13. Resultado de caudal acumulado de permeado, presión y cantidad de elementos por cada etapa.

| Paso - | Elemento | Alimentación | Presión | Conc | NDP | Permear agua | Permear agua | Beta | Permeado (Acumulado de paso) | | | | | |
|--------|----------|--------------|---------|-------|------|--------------|--------------|------|------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Etap | no. | Presión | Caida | Osmo. | | Caudal | Flujo | | TD S | Ca | Mg | Na | NH 4 | Cl |
| | | psi | psi | psi | psi | gpm | gfd | | | | | | | |
| 1-1 | 1 | 59,2 | 1,09 | 5 | 53,8 | 1,1 | 4 | 1,02 | 1,5 | 0,053 | 0,027 | 0,081 | 0,245 | 0,306 |
| 1-1 | 2 | 58,1 | 1,01 | 5,3 | 52,4 | 1,1 | 3,9 | 1,02 | 1,6 | 0,056 | 0,029 | 0,084 | 0,257 | 0,321 |
| 1-1 | 3 | 57,1 | 0,93 | 5,6 | 51,2 | 1,1 | 3,9 | 1,02 | 1,7 | 0,059 | 0,030 | 0,089 | 0,269 | 0,336 |
| 1-1 | 4 | 56,2 | 0,86 | 5,9 | 49,9 | 1 | 3,8 | 1,02 | 1,8 | 0,062 | 0,031 | 0,093 | 0,283 | 0,353 |
| 1-1 | 5 | 55,3 | 0,79 | 6,3 | 48,8 | 1 | 3,7 | 1,02 | 1,8 | 0,065 | 0,033 | 0,098 | 0,297 | 0,371 |
| 1-1 | 6 | 54,5 | 0,73 | 6,7 | 47,6 | 1 | 3,6 | 1,02 | 1,9 | 0,068 | 0,035 | 0,103 | 0,313 | 0,391 |
| | | | | | | | | | | | | | | |
| 1-2 | 1 | 50,8 | 1,8 | 6,9 | 43,1 | 0,9 | 3,2 | 1,01 | 2 | 0,070 | 0,036 | 0,106 | 0,323 | 0,404 |
| 1-2 | 2 | 49 | 1,73 | 7,1 | 41,2 | 0,9 | 3,1 | 1,01 | 2,1 | 0,073 | 0,037 | 0,111 | 0,334 | 0,417 |
| 1-2 | 3 | 47,3 | 1,66 | 7,3 | 39,3 | 0,8 | 3 | 1,01 | 2,1 | 0,075 | 0,038 | 0,114 | 0,345 | 0,432 |
| 1-2 | 4 | 45,6 | 1,6 | 7,5 | 37,4 | 0,8 | 2,8 | 1,01 | 2,2 | 0,078 | 0,040 | 0,118 | 0,358 | 0,447 |
| 1-2 | 5 | 44 | 1,54 | 7,7 | 35,6 | 0,7 | 2,7 | 1,01 | 2,3 | 0,081 | 0,041 | 0,122 | 0,371 | 0,463 |
| 1-2 | 6 | 42,5 | 1,48 | 7,9 | 33,9 | 0,7 | 2,5 | 1,01 | 2,4 | 0,084 | 0,043 | 0,126 | 0,384 | 0,481 |

Temperatura: 25°C

Edad del elemento: 0,6 Años

Figura 10: Esquema básico de RO con un módulo de dos etapas, con sistema de bombeo del campo UIS 12.



En la tabla 14 se especifica o compara las diferentes corrientes (streams), con sus respectivos caudales, presiones, TDS con respecto al pH.

Tabla 14. Resumen o cuadro comparativo de caudales, presiones, pH, TDS en cada corriente de la Osmosis Inversa (RO)

| Corriente n° | Caudal (gpm) | Presión (psi) | TDS | Cl | pH |
|--------------|--------------|---------------|------|-------|------|
| 1 | 43,8 | 0 | 628 | 108 | 7,67 |
| 2 | 43,8 | 59,2 | 628 | 108 | 7,50 |
| 3 | 43,8 | 59,2 | 628 | 108 | 7,50 |
| 4 | 31,1 | 53,8 | 883 | 152 | 7,64 |
| 5 | 26,2 | 41,0 | 1043 | 180 | 7,70 |
| 6 | 12,7 | 0 | 1,95 | 0,391 | 5,36 |
| 7 | 4,81 | 0 | 3,56 | 0,717 | 5,62 |
| 8 | 17,5 | 0 | 2,39 | 0,481 | 5,45 |

5.3.2 CALCULO DE LA BOMBA

Como se ilustra la tabla 15, el cálculo del diseño de la bomba requerida para el sistema de RO, con una eficiencia de 83%, una presión de la bomba (boost) de 59, 2 Psi, con una energía de bombeo de 1,4 kwh/1000 gal.

| | |
|-----------------------------|-----------------|
| Calculado por | Luis López L. |
| Caudal bomba alta presión | 43,75 gpm |
| Presión de alimentación | 59,2 psi |
| Temperatura de alimentación | 25,0 °C(77,0°F) |
| pH agua alimentación | 7,50 |
| Dosis químico,mg/l, 100 % | 1,8 H2SO4 |
| Energía específica | 1,41 kwh/kgal |
| NDP paso | 47,4 psi |
| Flujo promedio | 3,50 gfd |

| | |
|---------------------------------|-------------|
| Caudal de permeado | 25200,0 gpd |
| Caudal agua bruta | 63000,0 gpd |
| Conversión | 40,00 % |
| Edad elemento | 0,6 años |
| Disminución de flujo %, por año | 5,0 |
| Factor de ensuciamiento | 0,97 % |
| Aumento de SP, per año | 7,0 % |
| Perdida de carga entre etapas | 3,0 psi |

Tipo de alimentación Mar Pozo
Convencional

Tabla 15. Resumen cálculo de la bomba.(energía requerida)

| | Paso 1 | Potencia total del sistema |
|-----------------------------------|---------------|-----------------------------------|
| Presión de la bomba / Boost, psi | 59,2 | |
| Caudal producto, gpd | 25200,0 | 25212,2 |
| Caudal de la bomba, gpd | 63000,0 | |
| Eficiencia de la bomba, % | 83,0 | |
| Eficiencia del motor, % | 93,0 | |
| Eficiencia variador frecuencia, % | 97,0 | |
| Bombeo de energía, BHP | 2,0 | |
| Bombeo de energía, kw | 1,5 | 1,5 |
| Energía de bombeo, kwh/kgal | | 1,41 |

5.3.3 CÁLCULO DE LA INVERSIÓN Y EL COSTE DE AGUA

En las tablas 16 y 17 respectivamente, se realizó un cálculo donde especifica el costo de la inversión de la planta, cantidad de dosis a emplear (por presencia de incrustación), inversión específica por cada galón por día, vida útil de la planta (15 años), cantidad de elementos a utilizar con el costo respectivo, valores energético de la planta, de la membrana, edad y su mantenimiento preventivo, entre otros.

Tabla 16. Inversión y costo de agua.

| | | |
|--------------------------------------|------------|--------------|
| Capacidad de la planta como permeado | 25200,0 | gpd |
| Inversión específica | 3,49 | USD/gpd |
| Inversión | 157.209,70 | USD |
| Vida de la planta | 15,0 | años |
| Vida de la membrana | 5,0 | años |
| Tasa de interés | 4,5 | % |
| Coste de la | 500,00 | USD/elemento |

| | | |
|-------------------------------------|-------|-----------|
| membrana | | |
| Facto de planta | 90,0 | % |
| Número de elementos | 18,0 | |
| Coste energético | 0,200 | USD/kwhr |
| Coste del antincrustante | 2,20 | USD/lb |
| Consumo energético | 0,37 | kwhr/kgal |
| Dosificación de antincrustante | 3,0 | mg/l |
| Mantenimiento (como % de inversión) | 3,0 | % |
| Coste de ácido | 1,50 | USD/lb |
| Dosificación de ácido | 0,0 | mg/l |

Tabla 17. Resultado del cálculo de costo de agua.

| | |
|--------------------------------|---------------|
| Costo Capital | 1,18 USD/kgal |
| Costo energético | 0,28 USD/kgal |
| Costo Productos químicos | 0,00 USD/kgal |
| Coste de reemplazo de membrana | 0,22 USD/kgal |
| Mantenimiento | 0,57 USD/kgal |
| Coste total de agua | 1,19 USD/kgal |

6. CONCLUSIONES

- Según el esquema de proceso, se demuestra que la Osmosis Inversa, permite obtener agua con calidad para uso industrial, porque elimina los Sólidos Totales Disueltos, con respecto a los demás procesos. (TDS de 3000 mg/l a menos de 500 mg/l).
- El proceso de Osmosis Inversa (RO), con módulo de un paso o etapa no es la mejor solución, se requiere mínimo de dos pasos o etapas, para poder disminuir el elevado contenido de sales como, sodio, calcio, hierro, cloruros, sulfatos, nitratos y bicarbonatos, entre otros, el cual pueden ser tratados, hasta alcanzar los límites considerados como agua de calidad para su utilización y/o uso industrial.
- Si el agua de rechazo en un sistema de Osmosis Inversa, es mayor del 40%, se considera un proceso ineficiente.
- La Osmosis Inversa para que sea más eficiente su proceso, se requiere que el agua no contenga altos índices de corrosión y de incrustación ($-0.3 < \text{Índice de Langelier} > 0.3$).

7. RECOMENDACIONES

- La dosis óptima en el Agua de Alimentación es de 1,8 mg/l al 100% de H₂SO₄, que equivale al 3% de concentración. No debe sobrepasarse del 5% de la Concentración.
- Contactar con el fabricante químico para aplicar un inhibidor de Incrustaciones (3 mg/l), antes de operar el agua producida en la Osmosis Inversa del Campo UIS 12.
- Realizar tomas de muestra del agua producida, para optimización y mejora de la Planta de Agua en el campo UIS 12.
- Una vez tratado el agua con las altas concentraciones con TDS o agua de rechazo, se debe enviar hacia los pozos inyectoros, cumpliendo con los estándares de calidad de agua a condiciones ambientales naturales o similares en la que se encuentra las aguas subterráneas o acuíferos activos.
- Realizar mantenimientos preventivos a las membranas cada 6 meses, ya que la vida útil de esta es de 5 años.

BIBLIOGRAFIA

Osmosis Inversa (RO). [En línea] [Citado el: 15 de Noviembre de 2015.] http://dss.com.ec/wp-content/uploads/2012/07/osmosis_inversa.pdf.

ALVAREZ DA COSTA, Ana Alicia. 2009. *Procedimientos para el diseño de una planta de tratamiento de efluentes industriales*. [En línea] Octubre de 2009. [Citado el: 20 de Febrero de 2016.] <http://159.90.80.55/tesis/000145003.pdf>.

ARDILA BARAJAS, Martha Janeth. 2011. *Evaluación de la eficiencia de la planta de tratamiento para la potabilización del agua municipio de Lebrija - santander*. [Tesis de Grado]. Bucaramanga, Santander, Colombia : Universidad Industrial de Santander, 2011. págs. 19-27.

CALAO RUIZ, Jorge Emilio. 2007. *Caracterización Ambiental de la Industria Petrolera: Tecnologías disponibles para la prevención y Mitigación de Impactos Ambientales*. Bucaramanga, Santander, Colombia : Universidad Industrial de Santander, 2007. págs. 43-46.

DE VIANA, Javier. Guía para la disposición y tratamiento del Agua producida. [En línea] [Citado el: 25 de Junio de 2015.] http://www.oilproduction.net/files/tratamiento_de_aguas_producidas.pdf.

ESCALANTE TORRES, Luis Alberto y GIRALDO ESPITIA, Jorge Frank. 2008. *Diseño Conceptual para la Construcción de una Planta de Tratamiento e Inyección de Agua en el Campo Cantagallo*. [aut. libro] Luis Alberto Escalante Torres y Jorge Frank GIRALDO ESPITIA. *Diseño Conceptual para la Construcción de una Planta de Tratamiento e Inyección de Agua en el Campo Cantagallo*. Primera. Bucaramanga : Universidad Industrial de Santander, 2008, Vol. I, págs. 36-38.

ESCOBAR FIGUEROA, Alejandro. DOCPLAYER. *Tecnologías de Membranas de Aplicación Industrial*. [En línea] [Citado el: 10 de Noviembre de 2015.] <http://docplayer.es/11055754-Tecnologia-de-membranas-de-aplicacion-industrial.html>.

FORERO, Jorge Enrique y DIAZ, J. 1999. *Diseño de un nuevo sistema de flotación para tratamiento de aguas industriales*. [En línea] Instituto Colombiano del Petroleo, Diciembre de 1999. [Citado el: 15 de Noviembre de 2015.] http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0122-53831999000100006.

HERNANDO MARCOS, Patricia y SAINZ SASTRE, Juan Antonio. 2010-2011. *Planta de tratamiento de aguas residuales de proceso (EDARI) de una*

petroquímica. [Proyecto fin de Master]. Madrid, España : Escuela de Organización Industrial, 2010-2011.

JAIMES CAMPO, Diana Marcela y PICO JIMENEZ, Maria Isabel. 2009. Diseño de la planta de tratamiento de aguas residuales y de producción evaluando las diferentes alternativas Nacionales y Extranjeras - Aplicación campo Colorado. [En línea] 2009. [Citado el: 9 de Agosto de 2015.] Pag. 22. <http://repositorio.uis.edu.co/jspui/bitstream/123456789/688/2/129404.pdf>.

LTDA, ICCD. 2010. ICCD LTDA. *Oil Skimmers, Skim Tank, Separadores microburbujas*. [En línea] 2010. [Citado el: 15 de Noviembre de 2015.] <http://www.iccdltda.com.co/sitio/servicios/tratamiento-de-aguas-residuales/43-oil-skimmers-skim-tank-separadores-microburbujas>.

MANCILLA ESTUPIÑAN, Robinson Andres y MESA NAUSA, Henry Oswaldo. 2012. Metodología para el manejo de aguas de producción en un campo petrolero. [En línea] 2012. [Citado el: 16 de Junio de 2015.] Pag. 33-36. <http://repositorio.uis.edu.co/jspui/bitstream/123456789/995/2/145188.pdf>.

MUELAS EXPOSITO, Alvaro. 2011. [En línea] Diciembre de 2011. [Citado el: 10 de Noviembre de 2015.] Pag 52-53. <http://invenio2.unizar.es/record/6670/files/TAZ-PFC-2011-694.pdf>.

MUELAS EXPOSITO, ALVARO. 2011. *Manual de Utilización de software "ROSA" para simulación de unidades de Osmosis Inversa*. [En línea] 2011. [Citado el: 16 de Enero de 2016.] Pag 53-55. <http://invenio2.unizar.es/record/6670/files/TAZ-PFC-2011-694.pdf>.

PEREZ PARRA, Jorge. 2007. [aut. libro] Jorge Arturo PEREZ PARRA. *Manual de potabilización del agua*. 3 edición. Medellín : Universidad Nacional de Colombia sede Medellín, 2007. Pag 10.

Precipitación y Cristalización. www.uam.es. [En línea] [Citado el: 16 de Noviembre de 2015.] https://www.uam.es/docencia/qmapcon/QUIMICA_GENERAL/Practica_6_Precipitacion_y_Cristalizacion.pdf.

ROMERO ROJAS, Jairo Alberto. 1997. 3 *Calidad de Agua*. Bogota, Cundinamarca, Colombia : Escuela Colombiana de Ingeniería, 1997. pág. 52.

www.sulzer.com. *Coalescedor Plate*. [En línea] [Citado el: 31 de Enero de 2016.] <http://www.sulzer.com/es/Products-and-Services/Separation-Technology/Coalescers/Sulzer-Mellaplate?languageswitch=true>.

ANEXOS

Anexo A

Cost Breakdown for Reverse Osmosis System

| Process Cost (Million 1996 \$) | Total Capital | Annual Operations Cost (Thousand 1996 \$) | Total Annual Operating Cost (1996 cents/ barrel of water treated) |
|-----------------------------------|---------------|---|--|
| Warm Softening* | 2.3 | 1,000 (B) - 1,800 (A) | 6.4- 11.5 |
| Cooling | 0.6 | 60 | 0.4 |
| Fixed-Film Organics Removal | 1.0 | 50 | 0.3 |
| Sand Filtration | 1.3 | 130 | 0.8 |
| Ion Exchange Softening | 1.3 | 150 | 1.0 |
| Reverse Osmosis | 4.1 | 600 | 3.8 |
| Stabilization | 0.1 | 20 | 0.1 |
| Disinfection | 0.1 | 40 | 0.3 |
| Total | 11 | 2,100-2,900 | 13-18 |

Costs assume:

indirect capital costs included

inlet water temperature 160 - 170 °F design capacity 43,000 barrels/day

NaOH \$0.125 /lb

MgCl₂ \$0.26 /lb

sludge disposal \$50 / dry ton
 500 RO membranas replaced every 18 months at \$800/element

* Range of operating costs based on higher chemical usage, Scenario A,
 and lower chemical usage, Scenario B.

Anexo B

Planning Level Cost Estimates for

43,000 bpd Reverse Osmosis and Vapor Compression Systems

| Desalting Technology | Treated Water Recovery (Percent of 43,000 bpd) | Total Capital Cost (Million 1996 Dollars) | Annual Operating Costs (Million 1996 Dollars/yr) | Annual Operating Costs (1996 cents/barrel of water treated) |
|--|---|--|--|---|
| Reverse Osmosis, including pretreatment | 80 | 11 | 2.1-2.9 | 13- 18 |
| Mechanical Vapor Compression, including pretreatment | 90 | 29 | 6.1 | 39 |
| Mechanical Vapor Compression, Seeded Slurry | 98 | 28 | 7.7 | 49 |

Anexo C

Typical Placerita Produced Water Quality and Treatment Goals

| Water quality parameter | Typical produced water value | Treatment goal |
|---|------------------------------|----------------|
| Temperature (° F) | 170 | 75 |
| pH (s.u.) | 7.0 | 6.5-8.5 |
| Total dissolved solids (mg/1) | 6,000 | 350 |
| Total organic carbon (mg/1) | 120 | 1-2 |
| Ammonia (mg/1-N) | 15 | <1.0 |
| Boron (mg/1- B) | 20 | 0.5-2.0 |
| Silica (mg/1) | > 200 | 20-40 |
| Total hardness (mg/1 as CaCO ₃) | 1,500 | 70 |
| Oil and Grease (mg/1) | 20 | < 0.1 |

Anexo D. Ficha técnica membrana SWC5-LD

Nitto

HYDRANAUTICS
Nitro Group Company

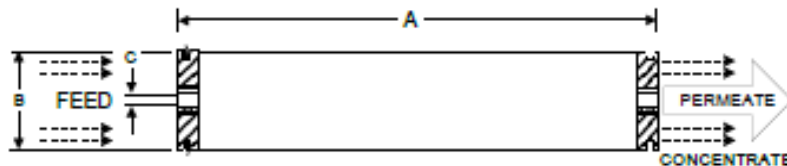
| Membrane Element | | SWC5-LD (Low Fouling Technology) |
|--------------------------|--|---|
| Performance: | Permeate Flow: | 9,000 gpd (34.1 m ³ /d) |
| | Salt Rejection: | 99.8% (99.7% minimum) |
| | Boron Rejection (Typical): | 92.0% [†] |
| Type | Configuration: | Low Fouling Spiral Wound |
| | Membrane Polymer: | Composite Polyamide |
| | Membrane Active Area: | 400 ft ² (37.1m ²) |
| | Feed Spacer: | 34 mil (0.864 mm) |
| Application Data* | Maximum Applied Pressure: | 1200 psig (8.27 MPa) |
| | Maximum Chlorine Concentration: | < 0.1 PPM |
| | Maximum Operating Temperature: | 113 °F (45 °C) |
| | pH Range, Continuous (Cleaning): | 2-11 (1-13) [†] |
| | Maximum Feedwater Turbidity: | 1.0 NTU |
| | Maximum Feedwater SDI (15 mins): | 5.0 |
| | Maximum Feed Flow: | 75 GPM (17.0 m ³ /h) |
| | Minimum Ratio of Concentrate to Permeate Flow for any Element: | 5:1 |
| | Maximum Pressure Drop for Each Element: | 15 psi |

* The limitations shown here are for general use. For specific projects, operating at more conservative values may ensure the best performance and longest life of the membrane. See Hydranautics Technical Bulletins for more detail on operation limits, cleaning pH, and cleaning temperatures.

Test Conditions

The stated performance is initial (data taken after 30 minutes of operation), based on the following conditions:

32,000 ppm NaCl
800 psi (5.5 MPa) Applied Pressure
77 °F (25 °C) Operating Temperature
10% Permeate Recovery
6.5 - 7.0 pH Range



| A, inches (mm) | B, inches (mm) | C, inches (mm) | Weight, lbs. (kg) |
|----------------|----------------|----------------|-------------------|
| 40.0 (1016) | 7.89 (200) | 1.125 (28.6) | 33 (15) |

Notice: Permeate flow for individual elements may vary + or - 15 percent. Membrane active area may vary ±1-4%. Element weight may vary. All membrane elements are supplied with a brine seal, interconnector, and o-rings. Elements are enclosed in a sealed polyethylene bag containing less than 1.0% sodium meta-bisulfite solution, and then packaged in a cardboard box.

[†]When tested at standard test conditions with 5.0 ppm boron in feed solution.

Hydranautics believes the information and data contained herein to be accurate and useful. The information and data are offered in good faith, but without guarantee, as conditions and methods of use of our products are beyond our control. Hydranautics assumes no liability for results obtained or damages incurred through the application of the presented information and data. It is the user's responsibility to determine the appropriateness of Hydranautics' products for the user's specific and uses.

3/11/16

Hydranautics Corporate: 401 Jones Road, Oceanside, CA 92058
1-800-CPA-PURE Phone: 760-901-2500 Fax: 760-901-2578 info@Hydranautics.com