

CONSIDERACIONES BÁSICAS Y VIABILIDAD DE PROCESOS  
DE MEMBRANAS DE ÓSMOSIS INVERSA Y NANOFILTRACIÓN  
COMO ALTERNATIVA PARA EL TRATAMIENTO DE AGUA EN  
COLOMBIA

WILLIAM RAMÍREZ GÓMEZ

MONOGRAFÍA

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA  
SEDE MANIZALES  
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA QUÍMICA  
MANIZALES  
2006

CONSIDERACIONES BÁSICAS Y VIABILIDAD DE PROCESOS DE  
MEMBRANAS DE ÓSMOSIS INVERSA Y NANOFILTRACIÓN COMO  
ALTERNATIVA PARA EL TRATAMIENTO DE AGUA EN COLOMBIA

DOCUMENTO PRESENTADO PARA CUMPLIR CON LOS  
REQUISITOS Y OPTAR AL TITULO DE ESPECIALISTA EN  
INGENIERIA AMBIENTAL

MONOGRAFÍA

PRESENTADO POR: WILLIAM RAMÍREZ GÓMEZ

DIRECTOR: Ing. Químico JORGE ELIECER MARÍN ARIAS

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA  
SEDE MANIZALES  
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA QUÍMICA  
MANIZALES

2006

## TABLA DE CONTENIDO

	Página
RESUMEN	1
ABSTRACT	2
INTRODUCCIÓN	3
OBJETIVOS	5
1. Considerar los tipos de operaciones de membranas y sus clasificaciones.	
1.1. Conceptos generales de la ósmosis	6
1.2. Operaciones de membrana	7
1.2.1. Operaciones de diálisis.	8
1.2.2. Operaciones de perneado.	9
1.2.3. Operaciones de membranas mediante presión.	9
1.3. Clasificación de las membranas	11
1.3.1. Clasificación según el mecanismo de separación.	11
1.3.2. Clasificación de acuerdo a la morfología.	12
1.3.4. Clasificación de acuerdo a su naturaleza química.	13
1.3.3. Clasificación según su geometría.	13
1.4. Selección de la membrana correcta para su aplicación.	15
2. Analizar las ventajas que traería el uso de Ósmosis inversa (OI) y Nanofiltración (NF) en Colombia teniendo en cuenta las necesidades actuales en el manejo de aguas.	
2.1. Necesidades actuales de agua potable en Colombia.	16

2.2. Ventajas del uso de membranas.	18
2.3. Ventajas de la Ósmosis inversa y Nanofiltración.	19
2.4. Discusión sobre la posible implementación en Colombia.	22

### 3. Estudiar la disponibilidad de materias primas y posibles costos para un sistema de Ósmosis inversa (OI) y Nanofiltración (NF) en Colombia.

3.1. Disponibilidad de Materia primas en Colombia	25
3.1.1. Equipos y membranas.	25
3.1.2. Productos químicos.	26
3.1.3. Agua a tratar.	27

### 3.2. Posibles Costos del montaje y puesta en marcha de un sistema de OI o NF en Colombia.

3.2.1. Costos de inversión	28
3.2.1.1. Sistema de pretratamiento.	28
3.2.1.2. Sistema de tratamiento por membranas.	29
3.2.1.3. Sistema de postratamiento.	29

3.2.2. Costos fijos de operación y mantenimiento	30
3.2.2.1. Cambio de las membranas.	30
3.2.2.2. Regeneración y cambios en los módulos.	30
3.2.2.3. Cambios de equipos	31
3.2.2.4. Mano de obra.	31

3.2.3. Costos variables de operación y mantenimiento del proceso	
3.2.3.1. Consumo de energía.	31
3.2.3.2. Productos químicos del proceso.	32

3.2.3.3. Cambios de instalaciones filtrantes.	32
3.2.4. Comentarios finales.	33

4. Considerar los criterios para un diseño preliminar y operación de un sistema convencional de membranas de Ósmosis inversa (OI) y Nanofiltración (NF) en nuestro país.

4.1. Criterios de diseño	35
4.1.1. Índices de ensuciamiento.	36
4.1.2. Pretratamiento.	37
4.1.3. Modelos de diseño de las disposiciones.	39
4.1.3.1. Modelo de solución lineal de difusión.	39
4.1.3.2. Modelo de la teoría del film.	42
4.1.3.3. Modelo de acoplamiento.	43
4.1.4. Diseño de la disposición y variables de diseño.	44
4.1.4.1. Caudal.	45
4.1.4.2. Presión.	47
4.1.4.3. Temperatura.	48
4.1.5. Postratamiento.	49
4.1.5.1. Remoción de sulfuro de hidrogeno.	49
4.1.5.2. Recuperación de alcalinidad.	50
4.2. Criterios de Operación	50
4.2.1. Monitorización.	50
4.2.2. Cantidad.	51
4.2.3. Calidad.	52
4.2.4. Caudal y coeficiente de transferencia de masa.	53
4.2.5. Vida de la membrana.	53

4.2.6. Limpieza de las membranas.	54
4.2.7. Recomendaciones de operación.	54
5. Conclusiones	56
BIBLIOGRAFÍA	59
6. ANEXOS	63

## Índice de Anexos.

	Pagina
Anexos	62

1. Estructuras moleculares de los principales materiales orgánicos de las membranas.
2. Propiedades de membranas con rangos de separación.
3. Capacidad de rechazo de las diferentes membranas en función de algunos componentes biológicos.
4. Capacidad de rechazo de las diferentes membranas en función de algunos componentes metálicos, surfactantes, gasolina y grasas.
5. Muestra las Coberturas Urbanas de Acueducto por Rangos Municipales de población.
6. Rangos del índice de ensuciamiento según su aplicación
7. Ejemplos de sistemas de membranas para tratar agua.
8. Los precios de las membranas y los tubos de presión en pesos.
9. Equipo de dosificación de reactivos.
10. Filtros de pretratamiento.
11. Ejemplos de Bombas de aporte y de alta presión.
12. Ejemplos de las disposiciones de membranas.
13. Principales efectos adversos del bioensuciamiento de las membranas
14. Vista general de la disposición de una planta de Osmosis inversa

## Índice de figuras

	Página
Figura 1. Sustancias causantes de problemas en OI/NF	37
Figura 2. Diagrama del comportamiento de OI/NF.	39
Figura 3. Dibujo tridimensional de la concentración de sólido perneado en función de la caída de presión y de la recuperación de agua.	40



## RESUMEN

Este trabajo Monográfico pretende dar a conocer los fundamentos que rigen las operaciones de membrana de Osmosis inversa (OI) y Nanofiltración (NF) para el tratamiento de agua, como una alternativa a implementar en Colombia de acuerdo a las necesidades actuales en el manejo de aguas y posibilidades tecnológicas propias del proceso.

Como el tema resulta demasiado extenso se tratan los aspectos más significativos desde el punto de vista técnico como son los principales tipos de operaciones de membrana y sus clasificaciones, los criterios de diseño y de operación; direccionando siempre los temas hacia las aplicaciones ambientales y mas exactamente hacia la potabilización del agua que es nuestro problema central. Se tratan los temas de OI y NF simultáneamente por sus similitudes desde todo punto de vista, (la NF es también llamada OI a baja presión) sus diferencias son principalmente el tipo de membrana y la presión de operación, por eso resultaba fácil complementar más la monografía con las dos técnicas de tratamiento.

La investigación comprende también los factores que habría que tener en cuenta para la posible implementación de un sistema de OI o NF en nuestro país, resulta muy complicado abarcar todas las variables asociadas en este sentido, así que se investigó sobre lo que el autor y el director del trabajo creyeron mas conveniente al menos para dar una idea general y que el lector pueda entender claramente las implicaciones básicas a tener en cuenta. Para ello se analizan las ventajas de un sistema de este tipo, la disponibilidad de materias primas, los costos y las necesidades de agua potable como un problema actual y real.

## **ABSTRACT**

This work aspires to give to know the fundamentals to rule the Reverse Osmosis and Nanofiltration operations for the water treatment, like an alternative to implement in Colombia to agree to the actual needs in the water management and technologies possibilities characteristic of process.

Like the them result to much large, it hand the more significative aspects from the technical view point like are the membrane operation principal kinds and our classifications, the design judgment and the operation carry on all the time the them to the ambiental applications, more exactly to the water potabilization that is our central problem.

It management the theme Reverse Osmosis and Nanofiltration simulteneosly for its simile from all view point, (the NF is call too RO pressure low) its differences are principally the membrane tipe and the operation pressure, by that result easy complement the work with the boots treatment technical.

The research include too the factors to have in count for the possible implementation of a system of RO and NF in our country, result to much complicated include all the variables en the sense, by count it research the things to the author and the work director believe more convenient on less to give a general idea and the reader can understand clearly the basics applications to have in count. For them it analyze the advantage from the this system type, the raw material available, the cost and the potable water needs like actual and real problem.

## INTRODUCCIÓN

La ingeniería siempre se ha dado paso a través de la historia con descubrimientos, investigaciones e innovaciones, buscando continuamente desarrollar tecnología para solucionar y mejorar de una u otra manera la vida de las personas. Uno de los grandes problemas que afronta la sociedad contemporánea es el requerimiento de agua en óptimas condiciones para sus respectivos usos, por ejemplo el agua potable y para fines industriales; tratando de dar soluciones satisfactorias a estas carencias en calidad y en cantidad de agua, es que la ingeniería ambiental suministra una ayuda y extiende sus esfuerzos en buscar maneras cada vez mas fáciles y económicas de dotar del valioso recurso según se necesite. Son muchos los factores que llevan a pensar en el uso de nuevas alternativas para el tratamiento de aguas, desde la regulación jurídica que día a día se va haciendo mas estricta y exige que los procesos sean mas limpios y amigables con el medio ambiente, la economía de ahorro que se tiene en las empresas, la necesidad de reducir los costos de inversión y operación, también la escasez del recurso debido a que a veces las cantidades existentes son inferiores a las demandadas por algunas poblaciones, y sobre todo la calidad del agua cuando es de consumo; es por eso que el país debe promover la actualización, profundización y producción de conocimientos en ingeniería sanitaria.

Este trabajo es una breve recopilación de información al respecto de una tecnología relativamente nueva y en gran crecimiento como es el uso de membranas para el tratamiento de agua, mas específicamente de los procesos de Osmosis inversa (OI) y Nanofiltración (NF), que aunque no son métodos convencionales se están convirtiendo en una alternativa de gran uso en países industrializados y lideres en el manejo del agua arrojando resultados muy satisfactorios en cuanto a costos y calidad de la misma. Si se hace un enfoque

a la situación y a las necesidades de nuestro país con respecto a un posible uso de esta tecnología se podrán abrir las puertas para que Colombia también adopte nuevas técnicas y pueda subsanar todas esas carencias sanitarias que produce la insalubridad del agua. Se pretende dar una visión general sobre los principios básicos que rigen las operaciones de Osmosis inversa (OI) y Nanofiltración (NF) , tratando de estimular el estudio y la profundización de estas alternativas considerando tanto sus usos como ventajas, la manera de disponer y operar un sistema de este tipo siempre con miras a una investigación posterior de tipo práctico por ejemplo a nivel de planta piloto, que no solo serviría para ilustrar de manera académica los fenómenos que allí se presenta sino también como un pequeño paso hacia la posible implementación a gran escala y demostrar que se están haciendo actividades que solucionan el control y manejo del agua en nuestro entorno.

## OBJETIVOS

### ➤ General

Estudiar los fundamentos de diseño, aplicación y la viabilidad para los procesos de membrana de Ósmosis inversa (OI) y Nanofiltración (NF) en el tratamiento de agua como alternativa de uso en Colombia.

### ➤ Específicos

- Considerar los tipos de operaciones de membranas y sus clasificaciones.
- Analizar las ventajas que traería el uso de Ósmosis inversa (OI) y Nanofiltración (NF) en Colombia teniendo en cuenta las necesidades actuales en el manejo de aguas.
- Estudiar la disponibilidad de materias primas y posibles costos para un sistema de Ósmosis inversa (OI) y Nanofiltración (NF) en Colombia.
- Considerar los criterios para un diseño preliminar y operación de un sistema convencional de membranas de Ósmosis inversa (OI) y Nanofiltración (NF) en nuestro país.

## **1. Considerar los tipos de operaciones de membranas y sus clasificaciones.**

### **1.1. CONCEPTOS GENERALES DE LA ÓSMOSIS**

El concepto de la ósmosis inversa es muy sencillo: se toma agua que contiene sales disueltas u otros contaminantes y al aplicársele presión, el agua queda prácticamente libre de toda impureza cuando esta pasa a través de una membrana sintética. Debido a que la membrana no está dotada de poros, el agua tiene que disolverse en la membrana y pasar por difusión a través de ésta. Al permear el agua por la membrana, el líquido deja atrás casi todas sus sales, y otras impurezas tales como materia orgánica, coloides, organismos microbiológicos y sílices. El hombre no ha podido fabricar una membrana que sea perfectamente selectiva cuya estructura molecular deje pasar solamente agua y rechace 100% de todas las sales disueltas.

La membrana produce una hiperfiltración del agua que se le alimenta a presión. El agua que ha permeado a través de la membrana es altamente pura y esta prácticamente libre de bacterias, virus, pirógenos, patógenos, larvas, esporas, quistes algas y otras muchas impurezas que pueden afectar a la salud humana.

Una membrana puede definirse como un film muy delgado que separa dos fases y actúa como una barrera selectiva al transporte de materia al existir una diferencia de potencial químico, sus rendimientos en términos de caudales y selectividades dependen principalmente de la naturaleza de los elementos contenidos en las dos fases y de la fuerza directora que se aplica.

## 1.2. OPERACIONES DE MEMBRANA

Un proceso por membranas puede definirse como una operación donde una corriente de alimentación está dividida en dos: un permeado conteniendo el material que ha pasado a través de la membrana y un retenido que contiene las especies que no la atraviesan. Las operaciones de membrana pueden utilizarse para concentrar o purificar una solución o una suspensión (solvente soluto o separación de partículas) y para fraccionar una mezcla (separación soluto-soluto).

Como para todos los fenómenos de transporte, el flujo a través de la membrana, para cada elemento, puede describirse mediante la siguiente expresión:

$$\text{Flujo} = \text{Fuerza} * \text{Concentración} * \text{Movilidad} \quad (1)$$

En la mayoría de los casos la concentración variará con la distancia a través de la membrana y a través de las capas límites en las dos caras o interfaces de la membrana, es apropiado tratar la ecuación anterior como una ecuación local donde las fuerzas locales son los gradientes de potencial químico  $d\mu_i/dx$ . La variación de potencial químico del componente  $i$  puede expresarse como una suma de términos;

$$d\mu_i = RTd \ln a_i + V_i dP + z_i F d\Psi \quad (2)$$

Mientras la actividad  $a_i$  (producto de la concentración por el coeficiente de actividad) no está bajo el control arbitrario del operador, la presión  $P$  y el potencial eléctrico  $\Psi$  pueden variarse para aumentar la separación entre los componentes móviles. Nótese que la presión aplicada actúa sobre cada componente en proporción a su volumen molar  $V_i$ , mientras un campo eléctrico

actúa sobre cada especie iónica de acuerdo con su valencia  $z_i$  y no afecta las especies no iónicas. La ecuación (2) puede ayudar a escoger cualitativamente la funcionalidad de la membrana.

Las operaciones de membrana se pueden diferenciar considerando los siguientes parámetros:

- Fuerza directora
- Mecanismo de separación
- Estructura de membrana
- Fases de contacto

Ahora se analizará las operaciones de membranas de acuerdo a las fuerzas actuantes: Operaciones de diálisis, Operaciones de perneado y Operaciones de membrana mediante presión.

#### 1.2.1. Operaciones de diálisis.

Estas son operaciones de membrana aplicadas a soluciones o disoluciones en las que el soluto es el que se transfiere a través de la membrana. La fuerza motriz es una actividad o una diferencia de potencial eléctrico en ausencia de una diferencia de presión.

Diálisis (DIA): la fuerza directriz es una diferencia de concentración a través de la membrana. En este caso existe un paso selectivo de iones y de sustancias de bajo peso molecular mientras que los solutos coloidales mayores y de gran peso molecular quedan retenidos. Útil en el mejoramiento de bioproductos y recuperación de iones valiosos de agua industrial.

Electrodiálisis (ED): es una operación por la cual los iones son dirigidos a través de membranas selectivas bajo la influencia de una diferencia de potencial eléctrico. Alternando las membranas selectoras catiónicas y aniónicas



en una disposición alterna con canales finos entre ellas, es posible producir canales alternantes de fluidos que están enriquecidos o faltos de iones respectivamente. La aplicación más importante es la producción de agua potable a partir de agua salobre, también para la remoción de nitratos desde una fuente de aguas subterráneas.

### 1.2.2. Operaciones de perneado.

En estas operaciones de membrana la fuerza impulsora es la diferencia de actividad a través de la membrana. Se aplican a soluciones o mezclas. Cuando se aplica a soluciones, es el solvente el que se transfiere a través de la membrana. Las operaciones más significativas son el Perneado gaseoso (PG), Difusión gaseosa, Pervaporación (PV), Stripping de membrana y destilación de membrana. Para el tratamiento de agua no es común su aplicación.

### 1.2.3. Operaciones de membranas mediante presión.

Estas son operaciones de membrana en las que la fuerza directora actuante es una diferencia de presión a través de la membrana. Se encuentra la mayor aplicación para el tratamiento de agua, los tipos de operaciones más importantes son:

Ósmosis inversa (OI): la OI es una operación de membrana en la que, por medio de presión, el solvente de una solución se transfiere a través de una densa membrana fabricada expresamente para retener sales y solutos de bajo peso molecular. Si una solución salina concentrada está separada del agua pura por medio de esta membrana, la diferencia de potencial químico tiende a promover la difusión del agua desde el compartimiento diluido al compartimiento concentrado para igualar las concentraciones. En el equilibrio,

la diferencia de niveles entre los compartimientos corresponde a la presión osmótica de la solución.

Para producir agua pura de una solución salina por ejemplo, debe aplicarse una presión que sea mayor a la presión osmótica de la solución. Del mismo modo, para obtener caudales económicamente viables, al menos debe ejercerse el doble de la presión osmótica; por ejemplo para agua marina se usan presiones de 5 a 8 MPa.

Nanofiltración (NF): La NF, también llamada OI a baja presión o desendurecimiento por membranas, relaciona la OI y la ultrafiltración en términos de selectividad de la membrana, la cual esta diseñada para eliminar iones polivalentes (Calcio y magnesio) en operaciones de ablandamiento. Más recientemente, la NF ha sido empleada para eliminar o separar materia orgánica. En esta técnica los iones monovalentes son rechazados débilmente por la membrana, pues la NF permite contrapresión osmótica mucho más baja que la de OI, la presión de trabajo es de 0.5 a 1.5 MPa.

Ultrafiltración (UF): en el tratamiento de aguas, la UF puede definirse como una operación de clarificación y desinfección por membrana. Las membranas empleadas en la UF son porosas y permiten sólo el rechazo de solutos gruesos (macromoléculas), todo tipo de microorganismos como virus y bacterias y otros tipos de partículas. Debido a que los solutos de bajo peso molecular no son retenidos por UF, la contrapresión osmótica puede ser despreciada y la presión de trabajo se mantiene de 50 a 500 kPa.

Microfiltración (MF): la diferencia fundamental entre MF y UF es el tamaño del poro de la membrana; los de 0,1  $\mu\text{m}$  o mayores. La aplicación primaria de este tipo de operación es la remoción de partículas (clarificación). Las presiones son similares a las de UF.

### 1.3. CLASIFICACION DE LAS MEMBRANAS

Las membranas selectivas semipermeables pueden clasificarse de acuerdo a diferentes criterios tales como mecanismo de separación, morfología física y naturaleza química.

#### 1.3.1. Clasificación según el mecanismo de separación.

Fundamentalmente hay tres mecanismos de separación que depende de alguna propiedad específica de los componentes que serán removidos o retenidos selectivamente por la membrana:

- Separación fundamentada en grandes deferencias de tamaño (electrocriba). Las operaciones fundamentales son MF, UF y DIA.
- Separación basada en la diferencia de solubilidad y difusividad en los materiales en la membrana (mecanismo solución-difusión). Este es típicamente el caso de PG, PV, NF y OI
- Separación fundada en diferencias en las cargas de las especies a separar como en ED.

La clasificación de las membranas basada en mecanismos de separación reduce a tres las clases principales: membranas porosas (efecto criba), membranas no porosas o densas (mecanismo solución-difusión) y membranas cargadas eléctricamente, también llamadas membranas de intercambio iónico.

Membranas porosas. Se subdividen en tres categorías según el tamaño del poro.

- Macroporos, mayores de 50 nm
- Mesoporos, en el rango de 2 a 50 nm
- Microporos, menores de 2 nm

Esto significa que las membranas de MF, UF, NF y DIA son porosas. Estas definiciones pueden propiciar alguna confusión, ya que las membranas de MF tienen macroporos, mientras que las de NF contienen microporos. De hecho, la NF podría clasificarse como una clase intermedia entre membranas porosas y no porosas, ya que los efectos de solución-difusión e incluso los electroquímicos deben ser introducidos en las ecuaciones de transferencia de masa.

Las membranas no porosas pueden considerarse como medios densos. La difusión de especies tiene lugar en el volumen libre que esta presente entre las cadenas macromoleculares de materia de la membrana. Las membranas de PG, PV y de OI son de este tipo.

Las membranas de intercambio iónico son un tipo especial de membranas no porosas. Consisten en geles muy hinchados portadores de cargas positivas o negativas. Una membrana con cargas positivas fijadas se denominan membrana de intercambio aniónico, mientras que una membrana de intercambio catiónico es aquella que posee cargas negativas.

### 1.3.2. Clasificación de acuerdo a la morfología.

Para las operaciones de membrana conducidas por presión y perneado, el flujo de perneado es inversamente proporcional al espesor de la membrana. Las membranas anisotrópicas constan de una capa muy fina, llamada película, soportada por otra capa subyacente más espesa y porosa. La capa pelicular es responsable de las funciones principales de la membrana, ya que el flujo y la selectividad sólo dependen de la estructura de la capa. Su espesor esta en el rango de 0,1 a 0,5  $\mu\text{m}$ , aproximadamente, lo cual corresponde al 1 % del espesor de la capa porosa subyacente. La capa soportante presenta una resistencia despreciable a la transferencia de masa y esta presente sólo como

soporte mecánico. Se pueden distinguir dos tipos de membranas anisotrópicas: asimétricas y mixtas.

Las membranas asimétricas son membranas anisotrópicas preparadas en el mismo material.

Las membranas mixtas son anisotrópicas donde la capa superior y la subcapa son de materiales diferentes. Cada capa puede ser optimizada independientemente. Generalmente, la capa porosa es una membrana asimétrica.

### 1.3.3. Clasificación según su geometría

Las membranas pueden prepararse en dos formas geométricas: plana y cilíndrica. En base a las diferencias dimensionales, pueden distinguirse los siguientes tipos de membrana cilíndricas:

- Membranas tubulares con diámetro interno mayor de 3 mm.
- Membranas tubulares de fibra hueca con diámetro interno menor de 3 mm.

Las fibras huecas son geoméricamente las membranas tubulares mas pequeñas disponibles, con diámetros exteriores entre 80 y 500  $\mu\text{m}$ . Se utilizan en OI y PG con diámetros mayores se usan UF, NF, y MF en cuyo caso se denominan membranas capilares.

### 1.3.4. Clasificación de acuerdo a su naturaleza química

Las membranas sintéticas pueden realizarse a partir de un gran numero de materiales orgánicos (polímeros) o inorgánicos (metales, cerámica, vidrio etc.).

Las membranas orgánicas serán las primeras a tratar, básicamente todos los polímeros pueden ser utilizados, pero por necesidades del proceso y vida de la membrana, sólo se utiliza en la práctica un número limitado. Los usados más ampliamente son la celulosa y sus derivados. Estos polímeros hidrófilos tienen bajo costo, poca tendencia a la absorción y se utilizan en todos los procesos de presión, hemodiálisis y perneado gaseoso. En el tratamiento de agua, las membranas de ésteres de la celulosa (principalmente el di y triacetato) tienen la ventaja de ser relativamente resistentes al cloro y, a pesar de su sensibilidad a los ácidos, a la hidrólisis alcalina, a la temperatura y a la degradación biológica, se utilizan ampliamente para la desalación, desendurecimiento, desinfección y clarificación.

Otra clase importante de membranas poliméricas hidrofílicas son las realizadas con poliamidas. Las poliamidas aromáticas fueron el segundo tipo de polímero, después del diacetato de celulosa, usado en desalación a causa de su propiedad de selectividad de perneado y por una mejor estabilidad térmica, química e hidrofílica. El grupo amida sin embargo tiene gran sensibilidad a la degradación oxidativa y no puede tolerar exposición de cloro ni siquiera en trazas.

El poliacrilonitrilo (PAN) se utiliza también comúnmente en las membranas de UF. Menos hidrófilo que los dos polímeros anteriores, no tiene la propiedad de permeabilidad selectiva y no se utiliza en OI. Otra clase ampliamente utilizada de polímeros, son las polisulfonas (PSf) y las polietersulfonas (PES). Estos polímeros no son hidrófilos y tienen una tendencia relativamente alta a la absorción, pero tienen muy buena estabilidad química, mecánica y térmica. Se usan normalmente como membranas de UF, como soporte de membranas mixtas o como membranas de hemodiálisis. La mayor parte de las membranas PES y PSf se modifican mezclándolas con polímeros hidrofílicos para dotarlas de mejores propiedades antiensuciamiento. A causa de su excelente estabilidad química y térmica, los siguientes polímeros hidrófobos se utilizan a menudo como membranas macro porosas: politetrafluoroetileno (PTFE), polifluoruro de vinilideno (PVDF), polietileno (PE), policarbonato (PC) o isopolipropileno (PP). En el tratamiento de agua el PP se usa como membrana

de microfiltración. En el ANEXO 1 se encuentran las estructuras moleculares de los principales materiales orgánicos de las membranas. En el ANEXO 2 las propiedades de membranas con rangos de separación, en los ANEXOS 3 y 4 se ilustra la capacidad de rechazo de las diferentes membranas en función de distintos compuestos.

El segundo grupo corresponde a las materias inorgánicas, generalmente poseen mayor estabilidad química, mecánica y térmica en comparación con los polímeros orgánicos. Sin embargo, tienen la desventaja de ser muy frágiles y más caros que las membranas orgánicas. Esto explica por qué su principal campo de aplicación está limitado a la industria química, para tratamiento de fluidos agresivos o de alta temperatura y a las industrias farmacéuticas y lácteas donde se precisa esterilización térmica.

Las membranas cerámicas representan el tipo principal de membranas inorgánicas. Los materiales cerámicos son óxidos, nitruros o carburos de metales, tales como el aluminio, zirconio o titanio.

#### 1.4. SELECCIÓN DE LA MEMBRANA CORRECTA PARA SU APLICACIÓN

Los dos tipos de configuración son la de espiral y la de fibra hueca. También existen aparatos de membrana plana y en configuración tubular. La Membrana en espiral por sus caudales altos y turbulentos, se deben usar con todo tipo de agua difícil, superficial, o incrustante. Las membranas tipo espiral fueron inventadas y perfeccionadas por Fluid Systems hace más de veinte años. Las Membranas de fibra hueca tienen la única ventaja de ocupar menor espacio. Y la desventaja es a la hora de reponer membranas. Las Membranas planas se emplean en la industria alimenticia y en la farmacéutica por ser muy fáciles de lavar. También se usan en electrodiálisis. Las Membranas tubulares ocupan un punto intermedio en costo por metro cuadrado entre las planas y las espirales.

## **2. Analizar las ventajas que traería el uso de Ósmosis inversa (OI) y Nanofiltración (NF) en Colombia teniendo en cuenta las necesidades actuales en el manejo de aguas.**

### **2.1. NECESIDADES ACTUALES DE AGUA POTABLE EN COLOMBIA**

En el país se han venido adelantando grandes transformaciones en las últimas décadas con las correspondientes exigencias y desarrollos, por las cuales el sector de agua potable y saneamiento básico, han tenido que adaptarse permanentemente con el objetivo de alcanzar una mayor efectividad y desempeño.

La situación actual de la prestación de los servicios de agua potable y saneamiento no es la más alentadora, menos aún para un país con una cantidad tan considerable de recursos hídricos, en el ANEXO 5 se muestra la cobertura de servicio de acueducto en el país según el Ministerio de desarrollo. Como resultado de la proyección del censo DANE para 1998, en las zonas rurales del país existen 12.049.669 habitantes; la población con conexiones domiciliarias de acueducto alcanza los 5.024.712, para una cobertura aproximada del 41.7%, de los cuales solo el 10% dispone de agua de buena calidad, a pesar de los grandes esfuerzos y avances logrados en relación con el aumento de cobertura del servicio de acueducto, los avances en términos de calidad del agua han sido más lentos. De una muestra evaluada por el Ministerio de Desarrollo para 971 cabeceras locales, se encontró que el 35% aproximadamente alcanzan coberturas superiores al promedio nacional con dificultades para producir agua apta para consumo humano; de la muestra solo el 21% disponen de planta de tratamiento pero no están funcionando adecuadamente (Ministerio de salud). Dado que la gran mayoría de estas localidades tienen poblaciones menores a 30.000 habitantes, el modelo de selección de tecnología formulado por el Ministerio podría ser aplicado con



resultados e impacto a corto plazo. Se resalta que, aunque existen cabeceras municipales sin infraestructura de tratamiento disponible, estos realizan el proceso de desinfección al agua para consumo humano. De la muestra analizada por el Ministerio de Salud, se puede concluir que todas las cabeceras municipales con mas de 70.000 habitantes realizan desinfección; por el contrario, para las localidades con menos de 2.500 habitantes el promedio alcanza el 79.6%.

Concordando con los datos del ministerio de desarrollo una investigación hecha por la defensoria dada ha conocer en octubre de 2005 dice que la mayoría de los municipios de Colombia todavía no cuenta con suministro de agua potable; de los 1.013 municipios del territorio nacional investigados, la Defensoría obtuvo información de que solo 104 reciben agua potable, en tanto que el resto, es decir 579, que corresponde al 84.8%, no disponen de agua apta para el consumo humano.

Se afirma que en la actualidad 9,5 millones de personas no tienen acceso a agua potable poniendo en riesgo la salud y el disfrute de los derechos a gozar de un ambiente sano, a la seguridad alimentaria y a la prestación eficiente del servicio público. Los departamentos con mayores dificultades en cuanto al acceso a agua potable son: Chocó, Sucre, Santander, Nariño, Boyacá, Cundinamarca, Córdoba, Casanare, Caquetá, Bolívar, Amazonas, Guajira, Guaviare, Magdalena y Vaupés. Un caso muy particular es el de la isla de San Andrés donde se tienen serios problemas con el suministro de agua, incluso llegan a pasar quince días sin el liquido. En la prestación del servicio de agua potable sobresalen los departamentos de Caldas, Quindío y Valle. En cuanto a las capitales de departamento, se encontró que solamente Cali, Armenia, Neiva y Manizales reciben agua apta para el consumo humano, en contraste con Quibdó y Sincelejo que son casos críticos por cuanto no tienen el suministro continuo y suficiente de agua potable.

Se advierte que a partir del año 2015, Colombia podría enfrentar un desabastecimiento de agua potable si el Estado no acata las recomendaciones de las Naciones Unidas relacionadas con prevenir la deforestación, la tala de árboles, la contaminación de ríos y otras medidas ambientales que deben ser tomadas en corto tiempo, de no tomar medidas de conservación y manejo adecuadas, el 66 por ciento de los colombianos podrían estar en alto riesgo de desabastecimiento de agua potable y en condiciones hidrológicas secas.

## 2.2. VENTAJAS DEL USO DE MEMBRANAS

Mientras que las membranas fueron aplicadas inicialmente en situaciones especializadas, tales como la desalación de agua de mar en medio oriente y países asiáticos, la tecnología ha crecido originando un mercado internacional de muchos millones de dólares que crece a un ritmo de casi 16% anual. Este dinámico crecimiento de las aplicaciones de la tecnología de membrana ha sido dirigido por fuerzas comerciales y ambientales, pero nuestro estudio se centra a las aplicaciones ambientales más que en las industriales. Las membranas para tratamiento de agua pueden trabajar en continuo, presentan flexibilidad en el proceso, ahorrar energía, son fácilmente escalables y combinables con otros procesos, alta pureza del producto final, lo que combinado hace que el costo de inversión sea una de las variables más atractivas del proceso.

Las instalaciones de osmosis inversa tienen aplicación en numerosos sectores como por ejemplo:

- Producción de agua potable para consumo humano
- Agua ultrapura para productos farmacéuticos y cosméticos
- Agua de enjuagado electrónico y galvánico

- Agua ultrapura para microcircuitos y pintura
- Industrias del vidrio
- Plantas embotelladoras
- Producción de agua ultrapura en calderas de alta presión y sistemas de vapor
- Producción de agua de riego
- Desalinización
- Elaboración de cervezas y refrescos
- Industria de alimentos (quesos)
- Fabricación de barras y cubitos de hielo

Los procesos de membrana no requieren generalmente la adición de productos químicos agresivos, pueden ser llevados a cabo a temperatura ambiente, forman una barrera absoluta al flujo de contaminantes y son especialmente eficientes.

La naturaleza de la alimentación a tratar por el proceso de membrana determinará cuál será la mejor membrana para cada aplicación (el anexos 3 y 4 se ilustra los tipos de membranas usados y sus áreas de aplicación, en términos de tamaño del contaminante de referencia). El éxito de la aplicación de la tecnología de membrana dependerá de la concentración, aislamiento o remoción del contaminante.

### 2.3. VENTAJAS DE LA ÓSMOSIS INVERSA Y NANOFILTRACIÓN

La Ósmosis inversa y la Nanofiltración son los procesos de membrana utilizados más comúnmente para tratamiento del agua potable en Estados Unidos. Cabe señalar que los procesos en ambos casos son muy similares y la diferencia radica en la presión de trabajo y en el tipo de membranas, pero las implicaciones de operación, diseño y costos difieren muy poco, por tanto la monografía se enfoca a ambas simultáneamente en todo momento a no ser que se especifique lo contrario. Sería interesante mostrar algunos ejemplos de

plantas ya construidas para así poder tener una mejor idea de las descripciones que se harán a lo largo de todo el documento; se muestra en el ANEXO 7 tres ejemplos de sistemas de membranas para tratar agua, como son la planta de nanofiltración de Fort Meyers (Florida- Estados unidos), la planta de ósmosis Inversa de Vero Beach (Florida- Estados unidos) y la Planta de osmosis inversa de Son Tugores (Palma de Mallorca- España) con sus respectivas líneas de flujo y operaciones unitarias.

La Osmosis Inversa es la tecnología mas utilizada para obtener agua segura y con un gran sabor, remueve el espectro completo de contaminantes. Como para cualquier proceso de tratamiento de agua, la OI y NF se seleccionan en base a costo y calidad, teniendo el costo una significación principal la mayoría de veces. La OI es capaz de rechazar contaminantes o partículas de diámetros tan pequeños como de  $0,0001\mu\text{m}$ , mientras que la NF puede rechazar contaminantes tan pequeños como de  $0,001\mu\text{m}$ . Ambas, la OI y la NF pueden describirse como proceso de difusión controlada en que la transferencia de iones a través de las membranas está controlada por difusión. Consecuentemente, estos procesos pueden llevar a la remoción de sales, durezas, patógenos, turbidez, desinfección de subproductos precursores, compuestos orgánicos sintéticos (COS), pesticidas y la mayoría de los contaminantes del agua potable conocidos hoy en día.; la mayoría de los gases disueltos, como el sulfuro de hidrogeno ( $\text{H}_2\text{S}$ ) y el dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) y algunos pesticidas pasan a través de las membranas de OI y NF, por ello en ese caso será necesario un postratamiento (sección 4.1.5). *La tecnología de las membranas puede utilizarse para tratar un mayor número de contaminantes del agua potable, mas que ninguna otra tecnología de tratamiento (AWWA et al, 2000, water treatment membrana processes).*

Una de las primeras aplicaciones de la tecnología de membrana y una de las más usadas es la fabricación de agua potable por OI a partir de agua de mar, agua salobre y agua subterránea; los contaminantes a eliminar en esta

aplicación son las sales disueltas (principalmente el cloruro sódico). Sin embargo se ha demostrado que también pueden ser utilizados cuando el agua de alimentación es agua superficial, con el debido pretratamiento según sea el caso. Se presentan remociones de 95% recuperación de cáustico, 90% reducción de DQO, 95% Ahorro energía (calor y electricidad), 80 al 90% reducción de Calcio, completa facilidad para trabajar con rangos entre 1 a 14 de pH, eliminación de virus, bacterias, plaguicidas y trihalometanos.

Otros contaminantes que no son removidos fácilmente por tecnologías tradicionales pueden ser tratados por OI/NF, por ejemplo los subproductos precursores (SSP) que se forman cuando la materia orgánica natural del agua reacciona con cloro u otros agentes oxidantes químicos utilizados en desinfección. Los SSP son los mayores contaminantes clasificados que pueden controlarse por OI y NF. Las membranas de OI y NF que tienen valores de corte del peso molecular de 500 o menos son aptas para rechazar más del 90% de los precursores de SSP de las aguas superficiales o subterráneas de alto contenido orgánico. La eliminación de materia orgánica natural no sólo reduce la formación SPP, sino además la demanda de cloro en el sistema de distribución. Consecuentemente, se pueden mantener más fácilmente las mínimas concentraciones residuales de desinfectantes requeridas por las normativas, mediante estos sistemas; la eliminación aumentada de materia orgánica natural retirará una fuente de alimentación bacteriológica y de modo muy parecido reducirá la actividad biológica y el crecimiento en los sistemas de distribución.

La turbidez, dureza y color son contaminantes que pueden ser retirados por NF y OI. La NF se desarrolló fundamentalmente como un proceso de desendurecimiento por membranas que como ya se dijo también controla los SSP. La NF elimina de 60 al 80% de la dureza total, del 90 al 100% del color, y virtualmente toda la turbidez en la corriente de alimentación; sin embargo, no es un proceso que pueda usarse con éxito para la eliminación de turbidez a

causa del ensuciamiento, si las partículas que producen la turbidez no son retenidas en el pretratamiento, cegarán o ensuciarán la membrana harán antieconómico el proceso.

Los pesticidas están clasificados como contaminantes que también pueden ser eliminados por NF y OI; pero se precisan estudios piloto para fuentes específicas antes de establecer criterios de tratamiento para el diseño.

La OI y NF por membrana han demostrado ser capaces de rechazar todos los virus, bacterias, quistes y otros organismos patógenos. La NF ha sido propuesta como mecanismo apto para la remoción de nitratos del agua potable, siendo muy económico y con altas tasas de eliminación.

#### 2.4. DISCUSIÓN SOBRE LA POSIBLE IMPLEMENTACION EN COLOMBIA.

Para poder evaluar una posible implementación de un sistema de OI/NF en nuestro país es necesario abordar bastantes aspectos simultáneamente y conjugarlos para llegar a un resultado razonable y sobre todo acoplado a la realidad. También es primordial analizar las limitaciones desde todo punto de vista que se puedan presentar en un proyecto de esa magnitud, cabe señalar que estas limitaciones tienen un componente local definitivo, es decir que dependiendo del sitio donde se vaya a planear la implementación se tendrán distintas falencias y fortalezas.

Una limitación muy importante radica en la falta de investigación al respecto por parte de entidades publicas y privadas, aunque es entendible por lo relativamente nueva que resulta esta tecnología y la condición de país tercer mundista que tiene Colombia, aunque la tecnología es ampliamente utilizada en países desarrollados principalmente, países no tan modernizados o en vía

de desarrollo también la usan como lo es México y Argentina. Hay que pensar entonces es por que no se investiga, creo que la principal razón es la falta de recursos para invertir en la misma; también el desconocimiento de la tecnología por parte de los ingenieros investigadores hacen que sea conocida solo como un tratamiento terciario o avanzado, lo cual no es cierto y hace que se convierta en algo “impracticable” para nosotros.

Otra gran limitación muy relacionada con la anterior es la falta de recursos por parte de las entidades encargadas de dotar de agua potable a los ciudadanos, peor aun sabiendo los costos asociados a un equipo de membranas que tienen una inversión inicial muy importante (sección 3.2.1 ), pero que en un análisis de costo beneficio y teniendo en cuenta otras variables como los costo de operación y mantenimiento pueden hacer perfectamente viable el proceso (secciones 3.2.2, 3.2.3) y mucho mas económico que un tratamiento convencional. Es decir que la falta de conocimiento también esta presente en este caso.

Una limitación a tener en cuenta es que tanta presencia gubernamental hay en el sitio, se sabe que en nuestro país hay zonas completamente pobres o sin institucionalidad de ningún tipo, esto afecta mucho en si se cuenta con los recursos necesarios. Además no se pueden dejar atrás los problemas de orden público, guerra y terrorismo que agobian nuestro país día a día.

Si todas esas limitaciones fueran superadas podemos pensar seriamente en la implementación de varios sistemas en Colombia, para cualquier parte del país donde exista disponibilidad de obtener agua de pozos, que en general es un agua de buena calidad la alternativa por OI/NF es definitiva, por las propiedades de esta fuente y por la disminución de los costos. Claro que se pueden usar las fuentes de captación convencionales, como embalses, ríos, lagunas, siendo concientes de las implicaciones asociadas al tratamiento preliminar y posterior que deberá darse. Por último para la zonas costeras o

islas donde la captación debe ser de estuarios o del mar sería sin duda una de las alternativas más importantes a tener en cuenta, aunque los costos son un poco elevados la calidad del agua es muy buena, los estudios al respecto son muy buenos y muchas plantas con este fin ya se han construido en el mundo, pues el proceso de desalinización ha sido la principal aplicación en el de la OI/NF, como sabemos Colombia tiene muchos kilómetros de costa, con ciudades de gran importancia sin agua potable, o sea que la solución se pueda dar con una implementación de un sistema de OI.



### **3. Estudiar la disponibilidad de materias primas y posibles costos para un sistema de Osmosis Inversa (OI) y Nanofiltración (NF) en Colombia.**

Cuando se evalúa la viabilidad de un proceso en ingeniería se deben tener en cuenta una cantidad de variables tal que pueda dar la máxima confiabilidad en el momento de llegar a resultados y poder emitir una conclusión que se acoja a la realidad, sería osado decir que en esta investigación monográfica se arrojará un plan de gestión para la implementación de un sistema de membranas en algún lugar del país. Es por eso que se abordó el tema de una manera general y sujeta a cualquier corrección, se debe ser conciente de la magnitud de los aspectos que se tratan de dar a conocer y que la solución del objetivo se puede abordar de muchas maneras dependiendo del enfoque que el ingeniero quiera darle.

#### **3.1. DISPONIBILIDAD DE MATERIAS PRIMAS EN COLOMBIA.**

Podemos diferenciar las materias primas a usar en el proceso de membranas en tres formas distintas, la primera es la membrana como tal y los respectivos equipos de Osmosis Inversa o Nanofiltración; la segunda es los productos químicos que pueden llegar a intervenir en la operación; y la materia prima principal: el agua a tratar.

##### **3.1.1. Equipos y membranas.**

Los equipos usados en la potabilización por membranas reemplazan las grandes estructuras de los procedimientos convencionales, existen en el mercado gran cantidad de marcas y proveedores (entre algunos de los consultados: Severn Trent Services, Fareco, Corsusa Internacional S.A., Selaga S.R.L. ,Spena , Flujomática S.R.L., ARSA, Interin S.A, Geoline S.A, Puragua Systems, Powermatic S.A. Aquafil ,AQUATEC , G&G Industrial, The

Dow Chemical ) que ofrecen información sobre precios y servicios de asesoría, esta investigación monográfica detectó que hay poco uso de membranas en Colombia, para potabilizar no se encontró aplicación, se utiliza a nivel industrial en las industrias que hacen gaseosas, agua embotellada, fármacos y para recuperar aguas de proceso.

Por ello resalta el hecho que la importación de membranas resulta costoso y hace que se limite bastante su posible aplicación, como en toda gestión de ingeniería será necesario analizar las variables del proyecto para poder tomar una decisión.

Las operaciones complementarias del proceso, sea Osmosis Inversa o Nanofiltración, resultan muy similares, comprenden un pretratamiento y un postratamiento que se describirán más adelante en el objetivo cuatro, por ahora interesa saber que equipos representan importancia:

- Filtros (de cartucho, de arena, de microfiltración)
- Bombas (centrifugas a alta (OI) y baja (NF) presión).
- Tubos de Presión (de PVC, Acero Inoxidable, Fibra de Vidrio).
- Membranas (polímeros).
- Equipos de monitorización y automatización (Caudal, presión, Temperatura, pH, Conductividad).
- Dosificadores y tanques de almacenamiento.

Los precios de las membranas y los tubos de presión son mostradas en el ANEXO 8.

### 3.1.2. Productos químicos.

Los productos químicos que pueden llegar a intervenir en un proceso de membranas son de fácil accesibilidad y en general a bajo costo, lo que se pretende es preparar el agua químicamente (si es necesario) para entrar a las etapas de las membranas y posteriormente preparar el agua para consumo, los

productos a utilizar como ya se dijo cambian dependiendo de la calidad del agua bruta, los más relevantes son:

- Adición de ácido ( $H_2SO_4$ ,  $HCl$ ).
- Adición de anti-incrustante (hexametáfosfato de sodio o fosfato trisódico).
- Adición de recuperador de alcalinidad ( $NaOH$ ,  $Ca(OH)_2$ ).
- Adición de precipitador de ácidos como el  $H_2S$ ,  $CO_2$  ( $NaClO$ ).
- Adición de desinfectante (Cloro o UV).

La disposición de estos elementos no representa problema en consecuencia de que en nuestro país existen suficientes proveedores para estos agentes químicos, no resulta necesario mostrar los precios de los mismos pero si se concluye que en Colombia es fácil acceder a los productos mencionados y que no representan un factor definitivo en el momento de analizar la viabilidad.

### 3.1.3. Agua a tratar.

En Colombia existen serias carencias de agua potable, poca planeación para las que hay y falta de recursos y gestión para las que debería haber; ya se mencionaron algunas cifras que dan cuenta de la insuficiencia en las diferentes regiones de nuestro país. La materia prima principal del proceso de potabilización es el agua, depende de que tipo de agua tengamos las variables cambiarán, en la selección de un proceso de purificación de OI o NF el factor fundamental es el tipo de sales y contaminantes disueltos en el agua que se tienen disponibles para tratar los agentes químicos, conociendo esto diseñaremos las disposiciones, los parámetros del proceso y la operación.

### 3.2. POSIBLES COSTOS DEL MONTAJE Y PUESTA EN MARCHA DE UN SISTEMA DE OI O NF EN COLOMBIA.

Las plantas piloto de OI/NF pueden proporcionar los mayores ahorros con la identificación y confirmación de necesidades de pretratamiento para un proceso efectivo. La maximización de caudal y de recuperación que se puedan mantener sin impactos negativos sobre el proceso son factores que se deben estudiar en ensayos de plantas piloto (la implementación de estos es definitiva y determinante en el momento de pensar en un montaje y puesta en marcha de un sistema). La utilización de ensayos de plantas piloto deberá realizarse para determinar el procedimiento adecuado para recuperar el rendimiento perdido por las características de incrustación específicas del agua objeto de evaluación (agua salobre, agua de mar, agua de pozos, represas, lagos etc.) y para escalar el proceso en pro del manejo de la relación costo/ beneficio. Una vez determinado esto se podría desarrollar estimaciones de costos con un alto grado de certidumbre.

Las estimaciones de costos se dividen en tres categorías diferentes y consisten en los siguientes componentes: Costos de inversión, Costos fijos de operación y mantenimiento y Costos de operación y mantenimiento del proceso, para entender mejor las descripciones cualitativas que se dan a continuación se recomienda repasar el ANEXO 7 donde se muestran diagramas de flujo de sistemas de OI y NF.

#### 3.2.1. Costos de inversión.

##### 3.2.1.1. Sistema de pretratamiento.

El pretratamiento representa un costo de inversión importante, hay que recordar que dependiendo de la calidad del agua a tratar los costos en esta etapa serán mayores con una mala calidad de agua y menores con una

buena calidad, comprende el Bombeo de agua de aporte, la dosificación del reactivo antiincrustante, la dosificación de ácido sulfúrico o clorhídrico y la prefiltración antes de entrar a las bombas que alimentan los módulos de membranas. Es necesario entonces invertir en un equipo de dosificación (Anexo 9), en un equipo de bombeo (si es necesario) dependiendo de donde proviene el agua; y en un filtro adecuado para el agua de alimentación, como ya se mencionó existen varios filtros (Anexo 10) para lograr el objetivo deseado y es decisión de diseñador jugar con las variables de costo-beneficio-necesidad según sea el caso particular de proceso.

#### 3.2.1.2. Sistema de tratamiento por membranas.

Esta parte de la operación comprende el tratamiento por ósmosis inversa y/o Nanofiltración, resulta el más costoso y el que más atención necesita por parte del diseñador y es en esta etapa donde se hace el tratamiento como tal. La manera de cómo se van a disponer y como va a ser la operación de estos elementos es determinante en el momento de estudiar la viabilidad económica de todo el proceso. Comprende el Bombeo de alta presión y el modulo de OI / NF principalmente, pero también podría tener un equipo de limpieza de membranas. En el ANEXO 11 se muestran algunos ejemplos de Bombas y equipos de membranas respectivamente, en el ANEXO 12 se muestran algunos ejemplos de las disposiciones de membranas.

#### 3.2.1.3. Sistema de postratamiento.

Esta etapa tan importante comprende gastos como de equipos de desinfección o sea dosificadores de cloro o ultravioleta (Anexo 9), dosificadores de recuperación de dureza y alcalinidad (Anexo 14). También si por ejemplo el agua contiene H<sub>2</sub>S o CO<sub>2</sub> un equipo de aireación deberá

comprarse y por último Instalaciones de almacenamiento y distribución de agua depurada que son tanques en donde se dispondrá el agua lista para consumo, con sus respectivos equipos de bombeo y distribución según sea el caso.

### 3.2.2. Costos fijos de operación y mantenimiento.

#### 3.2.2.1. Cambio de las membranas

Es una de las variables del proyecto mas importantes, nadie desea estar cambiando sus membranas constantemente ya que acarrear un costo de importancia, se espera que las membranas duren por lo menos cinco años aunque la mayoría de los fabricantes afirman que duran mas entre seis y diez años sus garantías vienen de dos a tres años, recordando que solo responden por fallas de fabrica que según se ha visto son poco usuales, casi siempre el daño a las membranas se debe a un mal diseño o a una incorrecta operación (Ver Recomendaciones de operación sección 4.2.7.).

#### 3.2.2.2. Regeneración y cambios en los módulos.

Los módulos que contienen las membranas viene con una garantía por el fabricante de diez años aproximadamente, pero en la literatura se encuentra que el periodo de vida promedio de un modulo de estos puede ser de quince años o más, entonces es el mantenimiento de los mismos lo que podrá determinar su duración.

#### 3.2.2.3. Cambios de equipos.

El cambio de bombas, equipos de dosificación, medición, tableros de control es un aspecto que no se puede olvidar, se pretende dar el mejor cuidado a todos los equipos para darle la mayor vida útil posible, es importante señalar que el cambio de bombas, principalmente las de alta presión que alimentan el agua a los módulos mantienen todo el tiempo en funcionamiento y es una variable importante a tener en cuenta.

#### 3.2.2.4. Mano de obra.

Como en todos los proyectos la mano de obra es un factor económico a tener en cuenta, para mantener y operar una planta se necesitan muy pocas personas por la naturaleza de la operación y por la necesidad de automatizar los procesos, el personal requerido depende del caudal que se maneje, o sea del tamaño y el número de las disposiciones y de los equipos que realizan las operaciones unitarias, resulta muy complicado determinar el precio que esto conlleva por los sueldos y reglamentaciones legales.

### 3.2.3. Costos de operación y mantenimiento del proceso

#### 3.2.3.1. Consumo de energía.

Es la variable de operación más importante, las bombas y los equipos de monitorización-automatización gastan grandes cantidades de energía pues deben estar en constante funcionamiento, buscar que los gastos anuales de energía sean llevaderos es de trascendencia superior para el éxito del proceso, un análisis muy profundo de estos gastos en el momento de implementar el sistema será necesario. El consumo de

energía de una planta de ósmosis de agua de mar, típicamente es 7,3 Kwh por metro cúbico de producto. Esto justifica tomar medidas para reducirlo un 40-50% utilizando membranas de baja presión (Nanofiltración) y turbinas de recuperación de energía. Existen plantas donde el consumo energético es de 4,8 Kwh/M<sup>3</sup>.

#### 3.2.3.2. Productos químicos del proceso.

Los gastos asociados a los agentes químicos utilizados son un gasto muy importante, aunque no son muy costosos si se necesitan en grandes cantidades, lo mejor para minimizar el hecho de tener que usar constantemente los reactivos es usar un agua de excelente calidad en su estado natural, si no es posible hacer un análisis de costo-beneficio de cuantos químicos se necesitan contra el sostenimiento del proceso.

#### 3.2.3.3. Cambios de instalaciones filtrantes.

Igual que con los parámetros anteriores el cambio de las instalaciones filtrantes resulta un gasto importante, esta muy relacionado con los costos de inversión debido al tipo de prefiltración escogida, así que dependiendo del tipo de instalaciones seleccionadas será el gasto asociado, por ejemplo los filtros de arena resultan más económicos de cambiar que los de microfiltración que son otras membranas.



#### 3.2.4. Comentarios finales.

La inversión y los costos de operación de los sistemas de membranas crecen directamente en función del caudal de permeado de la membrana. Cuanto mayor sea el volumen de agua que atraviesa la superficie de la membrana por cada unidad de tiempo, menor será el área de membrana necesaria para suministrar el caudal de diseño. Esto da como resultado un costo inferior para los módulos de membrana, bombas y tuberías periféricas, equipo de instrumentación, espacio, cimentaciones y edificios. El coste de reemplazo de membranas como reflejo de la vida de la membrana es, a menudo, el mayor componente singular del costo de operaciones. Reduciendo la cantidad de superficie de membranas a reemplazar se obtiene un caudal de permeado mayor y, por tanto, un menor costo de operación. De este modo, el caudal de permeado y los factores que lo influyen son las principales consideraciones que determinan el rendimiento y costo de las membranas.

Es importante decir que cuando se desarrollan costos de operación anuales para presupuestos, los costos anuales de inversión y costos fijos de operación y mantenimiento se estiman en base a la capacidad de diseño de la planta de tratamiento, ya que estos costos ocurren independientemente del volumen de agua tratada (si se requieren cinco personas para operar y mantener la planta, los sueldos serán iguales si la planta funciona al 100 o 50 por ciento de su capacidad de carga). Los cambios de membranas también se basan en una vida estimada de las mismas y una vez puestas en servicio, envejecerán más rápido si se están utilizando o no. De hecho, la mayoría de las membranas envejecen más rápido cuando no se utilizan que cuando están en funcionamiento. Por lo tanto, es mejor operar a un caudal reducido pero manteniendo el flujo de agua por todas las membranas, que operar una sola línea y dejar las otras fuera de servicio. Esto está condicionado solo por la necesidad de mantener un caudal mínimo por las líneas de membrana.

Los costos de operación y mantenimiento del proceso están basados en el caudal medio anual, ya que los costos están directamente relacionados con el volumen de agua tratada. Los sistemas de alimentación de productos químicos se basan en la dosificación por unidad de agua a tratar, por lo que caudales inferiores necesitarán menos productos químicos y costos de operación inferiores.

#### **4. Considerar los criterios para un diseño preliminar y operación de un sistema convencional de membranas de Ósmosis inversa (OI) y Nanofiltración (NF) en nuestro país.**

Para poder diseñar un proceso de potabilización es necesario analizar la calidad del agua a tratar, como ya se ha mencionado, lo primero es entonces tener una muestra representativa de la materia prima, es decir evaluar muy bien los factores físicos y químicos del agua de alimentación. Para dar solución al objetivo se abordará el tema de los criterios de diseño y después los criterios de operación necesarias para la puesta en marcha y el funcionamiento es si, para entender mejor los conceptos descritos sería bueno remitirse al anexo seis.

##### **4.1. CRITERIOS DE DISEÑO**

Lo común es que una corriente bruta utilizada como corriente de alimentación para un proceso de membrana deba comprender un pretratamiento convencional o avanzado, aunque puede haber excepciones pues hay plantas que funcionan sin ningún problema sin pretratamiento. El pretratamiento convencional incluye la adición de ácido o anti-incrustante para evitar la precipitación de las sales durante la filtración de las membranas. El pretratamiento avanzado tiene lugar antes del pretratamiento convencional y es necesario cuando el agua cruda o bruta tiene excesivos materiales ensuciadores. La filtración por membrana es el paso de agua pretratada a través de una membrana activa de OI/NF con un tamaño de poro de 0,001 a 0,0001  $\mu\text{m}$ . El postratamiento incluye operaciones unitarias comunes al tratamiento de agua potable como aireación, desinfección y control de corrosión. En todos los proceso de membrana de agua potable habrá una corriente de alimentación entrante al proceso y dos corrientes de salida abandonando el proceso. El proceso de separación dividido en pretratamiento avanzado, pretratamiento convencional, filtración en membranas y

postratamiento será útil como cuando se analizaron los costos, para obtener una visión amplia del diseño de OI/NF.

#### 4.1.1. Índices de ensuciamiento.

El ensuciamiento de membrana es una consideración importante en el diseño y operación de los sistemas de membranas. Las frecuencias de limpieza, requerimientos de pretratamiento, condiciones de operación, costo y rendimiento están afectados por el ensuciamiento de la membrana. Los índices de ensuciamiento se determinan a partir de pruebas simples de membranas y son similares a los coeficientes de transferencia de masa para membranas utilizadas en la producción de agua potable, en el ANEXO 6 se encuentran algunas aproximaciones para los índices requeridos según la operación de membrana, también en el ANEXO 13 se muestran los principales efectos adversos del bioensuciamiento. Los índices comúnmente usados son:

- Índice de densidad salina (IDS). Es el índice de ensuciamiento más ampliamente utilizado. Es una medida estática de la resistencia, que se determina por muestras tomadas al comienzo y al final de la prueba.
- Índice de ensuciamiento modificado (IEM). Consiste en determinar el espesor de la torta o la capa formada sobre la superficie de la membrana, que se supone directamente proporcional al volumen de filtrado. La resistencia total es la suma de la del filtro y de la torta.
- Mini índice del factor de cegado (MIFC). Se define como la relación del flujo versus tiempo. El MIFC es el mejor indicador del ensuciamiento de la membrana ya que la variación del caudal sobre el tiempo es una medida exacta de la pérdida de productividad.

#### 4.1.2. Pretratamiento.

Las operaciones de membrana requieren algunas medidas de pretratamiento del agua de alimentación aguas arriba del proceso, tres son las principales razones: incrustación, ensuciamiento (Fouling) y ataque a las membranas. Primero sin embargo, es darse cuenta que el pretratamiento es específico del tipo de alimentación que se tenga como ya se mencionó y del proceso que será empleado, por tanto este diferirá dependiendo de las condiciones locales del sistema.

El pretratamiento es la primera etapa para controlar el ensuciamiento de la membrana y puede estar totalmente involucrado. En su forma más simple el pretratamiento implica microfiltrado o filtrado sin adición de productos químicos; sin embargo, cuando se trata de agua superficial, el pretratamiento puede ser mucho más complejo e incluir ajuste de pH, cloración, adición de coagulantes, sedimentación, clarificación, descloración, adsorción en carbón activado, adición de agentes complejos, ajuste de pH y refinado final. Los factores que son importantes y que deben considerarse cuando se contempla un pretratamiento son:

- Material de fabricación de las membranas (celulosa asimétricas o membrana no celulósicas, de film fino o membranas compuestas amídicas).
- Configuración del modulo (enrollado en espiral, fibra fina hueca, tubular).
- Calidad del agua de alimentación.
- Relación de recuperación.
- Calidad final del agua.

El proceso de pretratamiento consta de adición de anti-incrustante y/o ácido y de filtración. Estos procesos de pretratamiento se usan para controlar las incrustaciones y para proteger los elementos de membrana y se requieren en los sistemas convencionales de OI y NF. El ensuciamiento está causado por materiales tales como coloides, que están presentes en el agua sin tratar y

reducirán la productividad de la membrana. La incrustación está producida por la precipitación de sales en el interior de la membrana a causa de la concentración de la corriente de alimentación. Si un agua bruta está excesivamente sucia se precisa un pretratamiento adicional o avanzado. A continuación se muestra un esquema de las sustancias potencialmente perjudiciales para las membranas y de que forman las afectan:

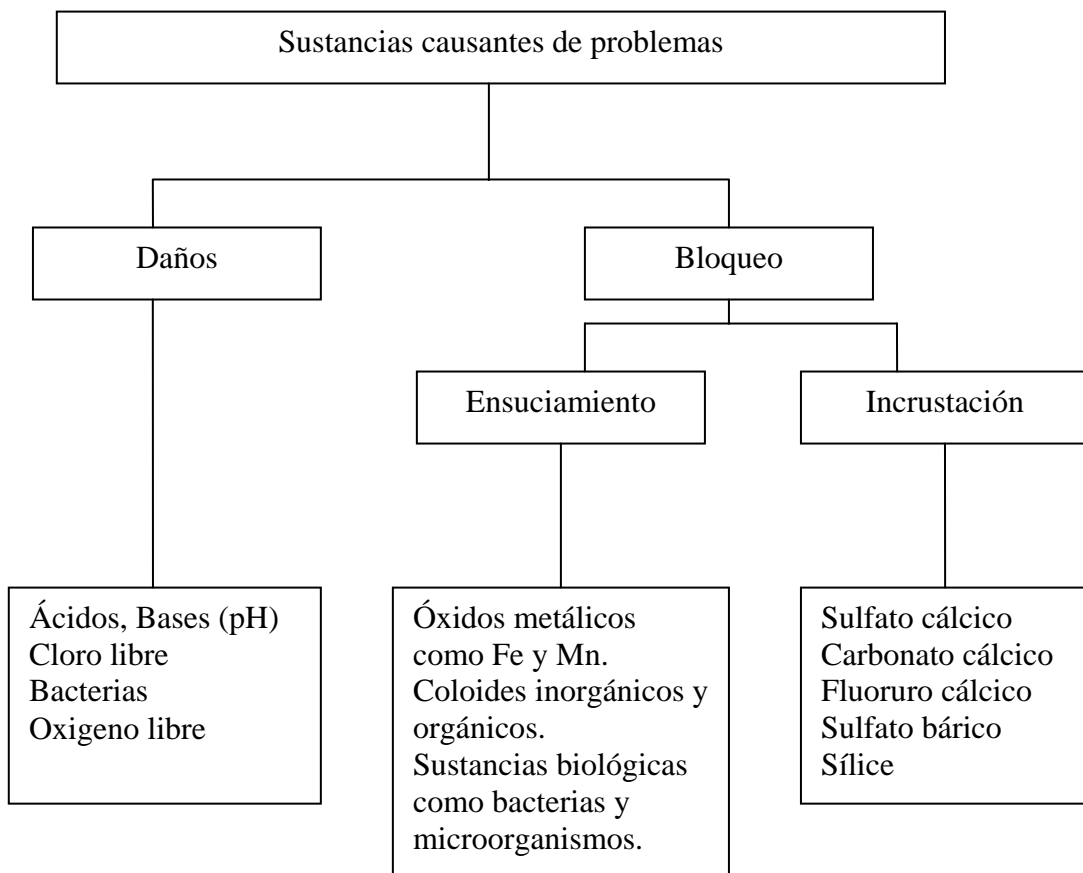


Figura 1. Sustancias causantes de problemas en OI/NF

El pretratamiento avanzado sería una unidad o conjunto de operaciones que precede al control de incrustación y filtración, ejemplos de pretratamiento avanzado sería la coagulación, oxidación seguida de filtración en arena. Sin embargo las normas restrictivas puestas por los fabricantes de membranas

muy a menudo no necesitan introducir mas que los pasos de floculación y coagulación para clarificar antes de la filtración; si los niveles de turbidez son muy altos se puede recurrir a una sedimentación, los lechos filtrantes que se utilizan pueden ser estratificados, filtros medios únicos o multicapas, con las capas consistentes en arena gruesa fina, carbón activado y antracita.

El control de incrustación es esencial en la filtración por membranas de OI/NF. Se discuten dos diferentes métodos de control de precipitación de incrustación en el interior del elemento de membrana con identificación de sal limitante y adición de ácido para evitar el  $\text{CaCO}_3$ .

#### 4.1.3. Modelos de diseño de las disposiciones.

El propósito de los modelos es desarrollar las ecuaciones de disposición y multietapa para predecir la calidad de perneado del agua y por tanto un caudal requerido para la planta, el termino disposiciones se refiere a la manera como están organizadas los sistemas de membranas para un determinado proceso, se explicará los tres principales modelos utilizados: Modelo de solución lineal de difusión, Modelo de la teoría del film y Modelo de acoplamiento.

##### 4.1.3.1. Modelo de solución lineal de difusión.

Hay muchos modelos y teorías diferentes que describen la transferencia de masa en los procesos de difusión controlada en membranas; sin embargo, sólo unos pocos principios o teorías se utilizan para desarrollar la mayoría de estos modelos. Consideremos un diagrama simple de los procesos de membrana y las ecuaciones que lo rigen:

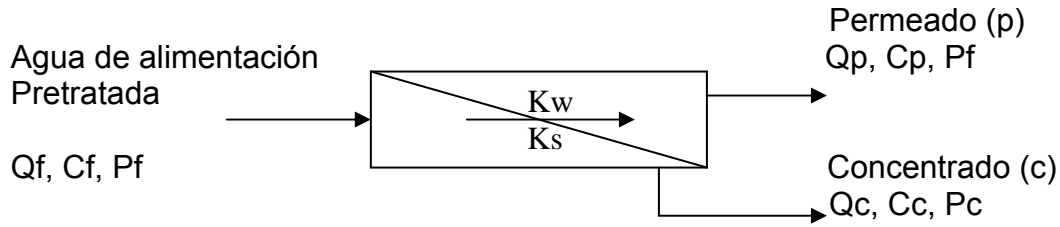


Figura 2. Diagrama del comportamiento de OI/NF.

$$J = k_w (\Delta P - \Delta \Pi) = \frac{Q_p}{A} \quad (3)$$

$$J_i = k_i \Delta C = \frac{Q_p C_p}{A} \quad (4)$$

$$r = \frac{Q_p}{Q_f} \quad (5)$$

$$Q_f = Q_c + Q_p \quad (6)$$

$$Q_f C_f = Q_c C_c + Q_p C_p \quad (7)$$

Donde  $J$  = Caudal de agua,  $L^3/L^2t$   
 $J_i$  = Caudal de soluto,  $M/L^2t$   
 $k_w$  = Coeficiente de transferencia de masa del solvente,  $L^2t/M$   
 $k_i$  = Coeficiente de transferencia de masa del soluto,  $L/t$   
 $\Delta P$  = Gradiente de presión,  $L$ ,  $[(P_f + P_c)/2 - P_p]$   
 $\Delta \Pi$  = Presión osmótica,  $L$ ,  $[(\Pi_f + \Pi_c)/2 - \Pi_p]$   
 $\Delta C$  = Gradiente de concentración,  $M/L^3$ ,  $[(C_f + C_c)/2 - C_p]$   
 $Q_f$  = Caudal de la corriente de alimentación,  $L^3/t$   
 $Q_c$  = Caudal de la corriente de concentrado,  $L^3/t$   
 $Q_p$  = Caudal de la corriente de permeado,  $L^3/t$   
 $C_f$  = Concentración de soluto en la corriente de alimentación,  $M/L^3$   
 $C_c$  = Concentración de soluto en la corriente de concentrado,  $M/L^3$   
 $C_p$  = Concentración de soluto en la corriente de permeado,  $M/L^3$



$r$  = Recuperación  
 $A$  = Área de la membrana,  $L^2$   
 $Z$  = Término combinado de transferencia de masa

Si  $\Delta C$  se define como la diferencia de concentración media de la corriente de alimentación y la de salmuera y la corriente de permeado, entonces de las ecuaciones anteriores puede resultar la siguiente ecuación:

$$C_p = \frac{k_i C_f}{k_w (\Delta P - \Delta \Pi) [(2 - 2r)/(2 - r)] + k_i} = Z_i C_f \quad (8)$$

Este es el modelo mas simple, pero permite considerar el efecto de cinco variables independientes sobre la calidad de agua del perneado; si la presión y todas las demás variables permanecen constantes, la concentración de perneado disminuye. Si la recuperación aumenta y todas las variables permanecen iguales, la concentración de perneado aumenta. En la siguiente grafica se observa dicho comportamiento:

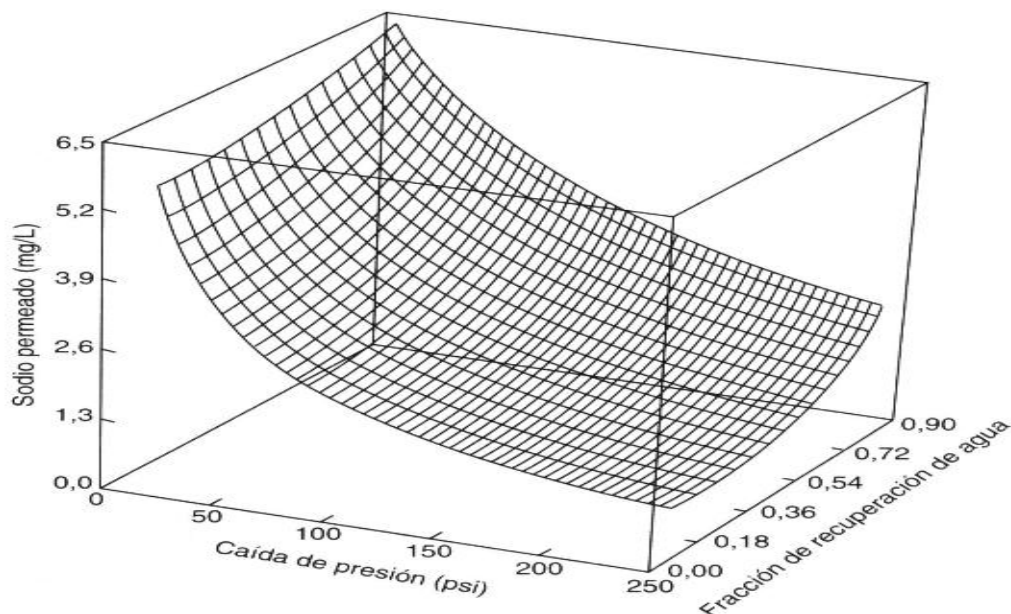


Figura 3. Dibujo tridimensional de la concentración de sólido permeado en función de la caída de presión y de la recuperación de agua.

#### 4.1.3.2. Modelo de la teoría del film.

El modelo lineal puede modificarse por la incorporación de la teoría del film (o capa), que supone que la concentración del soluto aumenta exponencialmente desde el centro del canal de la corriente de alimentación hacia la superficie de la membrana y se retrodifunde en la masa de la corriente. Matemáticamente se muestra en la ecuación

$$J_i = -D_s \frac{dC}{dX} + C_i J \quad (9)$$

Donde  $D_s$  = Difusividad

$C_i$  = Concentración desde la masa a la interfaces de membrana

$z$  = Longitud del camino del film

Introduciendo la constante de retrodifusión en la siguiente ecuación:

$$\left[ \frac{C_s - C_p}{C_b - C_p} \right] = e^{J/k_b} \quad (10)$$

Donde  $C_p$  = Concentración del soluto en el permeado de membrana

$C_b$  = Concentración del soluto en la masa de membrana

$C_s$  = Concentración del soluto en la superficie de membrana

$J$  = Caudal de agua a través de la membrana

$k_b = D_s/x$  = Coeficiente de difusión desde la superficie a la masa

Este modelo predice que la concentración en la superficie de la membrana es más elevada que en el seno de la corriente de alimentación, similar efecto se muestra en la siguiente ecuación:

$$C_p = \frac{C_f k_i e^{J/k_b}}{k_w (\Delta P - \Delta \pi) [(2 - 2r)/(2 - r)] + k_i e^{J/k_b}} \quad (11)$$

El coeficiente de retrodifusión  $k_b$  representa la difusión del soluto desde la superficie de la membrana hasta el seno de la corriente de alimentación, que es diferente del coeficiente de transferencia de  $k_w$ , que representa la difusión del soluto a través de la membrana a la corriente de permeado.

#### 4.1.3.3. Modelo de acoplamiento.

El efecto de acoplamiento sobre la transferencia de masa a través de membranas ha sido modelado utilizando una modificación estadística de la energía libre para sistemas de un único soluto, como se muestra en la siguiente ecuación:

$$\frac{1}{\Delta G} = -\frac{1}{E}r - \frac{\Delta}{E} \quad (12)$$

Donde  $\Delta G$  = Energía libre del ión acoplado  
 $E$  = Constante dependiente de la solución  
 $r$  = Radio iónico del acoplamiento  
 $\Delta$  = Constante estadística

El término de energía libre se supone diferente en el seno de la solución y en la superficie de la membrana a causa de la diferente concentración iónica en estas dos localizaciones. Consecuentemente la energía requerida para atraer a los iones a la superficie se ve en la siguiente ecuación que corresponde a la diferencia de la energía libre en el seno y en la superficie de las soluciones:

$$\Delta G = \Delta G_I - \Delta G_B \quad (13)$$

Donde  $\Delta G$  = Diferencia de energía libre del ión acoplado en la interfase I y en el seno o masa B. Los coeficientes de transferencia de masa membrana-soluto específico para sistemas de un soluto se han determinado experimentalmente y relacionado con la energía libre mediante la siguiente ecuación:

$$\ln(k_i) = \ln(C^*) + \sum \left( -\frac{\Delta G}{RT} \right) \quad (14)$$

Donde  $C^*$  = Constante específica de la membrana  
 $k_i$  = Coeficiente de transferencia de masa  
 $R$  = Constante del gas  
 $T$  = Temperatura absoluta

Una vez que se ha determinado la constante específica de la membrana con referencia a un soluto, es posible determinar  $k_s$  para un soluto dado en un sistema de un solo soluto. Así mismo ya conociendo  $k_s$ , puede predecirse el transporte de una masa de un soluto singular en una membrana de difusión controlada.

#### 4.1.4. Diseño de la disposición y variables de diseño

Para el diseño de una disposición lo principal es la determinación de los parámetros físicos que se necesitan para el funcionamiento deseado del sistema, por ejemplo la presión y el caudal de una disposición o sistema de membrana puede estimarse por diseño, utilizando el caudal medio del elemento y el sistema de recuperación.

#### 4.1.4.1. Caudal

Hay que definir el Porcentaje de conversión o recuperación, se define como el porcentaje de alimentación que se extrae como producto:

$$\text{RECUPERACION} = (\text{flujo producto.} / \text{flujo alimentación.}) \times 100$$

En el momento del diseño el primer paso es determinar el agua producida en cada elemento usando el caudal y el área superficial de la membrana como se ve en la ecuación:

$$Q_{p-e} = JA_e \quad (15)$$

Donde  $Q_{p-e}$  es la tasa de flujo permeado producido por un elemento simple,  $J$  es el caudal de diseño del sistema y  $A_e$  es el área de un solo elemento. El caudal permeado de cada recipiente de presión puede determinarse multiplicando el número de elementos por recipiente de presión, por el caudal de permeado producido por un solo elemento, usando la ecuación anterior:

$$Q_{p-v} = N_e Q_{p-e} \quad (16)$$

Donde  $Q_{p-v}$  es la tasa de flujo permeado producido por un recipiente de presión y  $N_e$  es el número de elementos de cada recipiente de presión. El caudal permeado producido por el sistema, usando la siguiente ecuación

$$Q_{p-sis} = \sum_{i=1}^n Q_{p-s(i)} \quad (17)$$

Donde  $Q_{p-sis}$  es la tasa de caudal perneado producido por el sistema, que es igual a la suma de los caudales permeados de todas las etapas de un sistema con n etapas.

El caudal de corriente de alimentación para un recipiente a presión, una etapa, una disposición o un sistema puede estimarse dividiendo el caudal de perneado asociado:

$$Q_{F-(i)} = \frac{Q_{P-(i)}}{R_{(i)}} \quad (18)$$

Donde  $Q_{F-(i)}$  es el caudal de la corriente de alimentación a cada recipiente a presión  $Q_{F-V}$ , una etapa ( $Q_{F-S}$ ) o el sistema ( $Q_{F-sis}$ );  $Q_{p-(i)}$  es el perneado producido por el recipiente a presión ( $Q_{p-v}$ ), etapa ( $Q_{p-s}$ ) o sistema ( $Q_{p-sis}$ ) y  $R_{(i)}$  es la recuperación respectiva para el recipiente a presión, etapa o sistema en fracción decimal.

La tasa de caudal concentrado de rechazo del sistema se calcula como diferencia entra la tasa de caudal de alimentación al sistema y el flujo de perneado producido por el sistema, como se ve en la ecuación:

$$Q_{W-sis} = Q_{F-sis} - Q_{p-sis} \quad (19)$$

Donde  $Q_{W-sis}$  es el caudal de concentrado de rechazo del sistema.

El caudal de reciclado requerido se determina por la diferencia positiva entre el mínimo caudal recomendado por el fabricante y el flujo entrante en el último recipiente a presión  $Q_{F-ue}$ , que se calcula así:

$$Q_{F-ue} = Q_{F-V} - (N_e - 1)Q_{p-e} \quad (20)$$

Donde  $Q_{F-V}$  es el caudal de alimentación en el respectivo recipiente a presión y  $Q_{p-e}$  es el permeado producido por elemento en el recipiente a presión precedente al último elemento. El caudal de reciclo se calcula así:

$$Q_{R \min-V(i)} = Q_{F \min-e} - Q_{F-ue} \quad (21)$$

Donde  $Q_{R-V(i)}$  si es positivo, es el caudal reciclado requerido para cumplir con el caudal mínimo de alimentación  $Q_{F \min-e}$  recomendado por el fabricante.

El caudal mínimo del sistema de corriente afluyente  $Q_{\min-sis}$  puede determinarse añadiendo el caudal de alimentación  $Q_{Fsis-e}$  basado en el caudal y recuperación del elemento al caudal de reciclado requerido para cada etapa  $Q_{R-s(i)}$ , como se muestra:

$$Q_{\min-sis} = Q_{F-sis} + \sum_{i=1}^n Q_{R-S(i)} \quad (22)$$

La siguiente ecuación calcula la tasa de caudal afluyente a una etapa  $Q_{I-s}$  y  $Q_R$  es la tasa de caudal reciclado:

$$Q_{I-s} = Q_{F-s} + Q_R \quad (23)$$

Por último la siguiente ecuación se usa para calcular la relación de reciclado:

$$r = \frac{Q_R}{Q_F} \quad (24)$$

#### 4.1.4.2. Presión.

La presión requerida de corriente de alimentación puede determinarse, ya que se estima el gradiente de presión osmótica del sistema y se tienen en cuenta

las pérdidas hidráulicas a través de la etapa y elementos de membrana. El gradiente de presión osmótica del sistema de los sólidos totales disueltos del sistema afluente:

$$\Delta\pi_{sis} = \left[ \left( \frac{STD_I + STD_W}{2} \right) - STD_P \right] * 0.01 \quad (25)$$

Donde  $\Delta\pi_{sis}$  = Estimación del medio del gradiente de presión osmótica para el sistema en lb/in<sup>2</sup>

$STD_I$  = es la concentración de sólidos totales disueltos afluente en mg/L

$STD_W$  = es la cantidad de sólidos totales disueltos del concentrado del rechazo en mg/L

$STD_P$  = es la concentración de sólidos totales disueltos del permeado en mg/L

Las pérdidas hidráulicas y por acción de las membranas se pueden calcular por una ecuación de conservación de energía según sea el caso.

#### 4.1.4.3. Temperatura.

La temperatura tiene una gran influencia en los costos de operación, lo más relevante es decir que a mayor temperatura de diseño más flujo de permeado se produce y consecuentemente menor cantidad de membranas se necesitan, se precisa entonces estudiar detenidamente la relación costo y beneficio para un uso de más energía a menos membranas o de más membranas a menos energía; cabe señalar que el diseñar a temperaturas elevadas puede acortar la vida de las membranas ya que acelera la degradación química y física de las mismas.



#### 4.1.5. Postratamiento.

El postratamiento consta de varias unidades de operación diferentes. La elección y la secuencia de esas operaciones unitarias son función del criterio del diseñador y de la calidad del agua. Las operaciones de postratamiento principales son: remoción de sulfuros, recuperación de alcalinidad, aireación, desinfección y estabilización. Una visión de los sistemas de postratamiento puede ser útil para darse cuenta de lo que el diseñador puede desear para cumplirlo. El proceso de membranas en este punto ha eliminado esencialmente todos los organismos patógenos y la mayoría de los subproductos precursores, sales y otros solutos en la corriente de alimentación. La eliminación de soluto ha incluido alcalinidad de carbonatos; sin embargo, todos los gases disueltos incluyendo dióxido de carbono y sulfuro de hidrogeno, han pasado a través de la membrana. El diseñador tiene que tener cuidado de no producir un agua final después de postratamiento que no tenga casi alcalinidad ni que posea una significativa turbidez por sulfuros de forma que cumpla los requisitos de desinfección.

##### 4.1.5.1. Remoción de sulfuro de hidrogeno.

Muchas de las aguas subterráneas usadas para alimentar plantas de OI o NF contiene sulfuro de hidrogeno. Ni el proceso convencional de pretratamiento, ni el proceso de membranas, elimina el sulfuro de hidrogeno. La aireación y oxidación son los dos medios primarios de eliminación de sulfuro de hidrogeno. El pH para el sulfuro de hidrogeno es 7, y el gas  $H_2S$  puede ser eliminado completamente a pHs por debajo de 6,5 sin formación de turbidez, en un proceso de arrastre por aire. La aireación o aireación por tiro, sin embargo, implica mucha menos área superficial que para el arrastre por aire y puede formar azufre elemental. El azufre elemental producido por oxidación biológica o química se ve normalmente en las torres de aireación de plantas de agua que tratan agua subterránea conteniendo sulfuros.

#### 4.1.5.2. Recuperación de alcalinidad.

Si se usa la adición de ácido para control de la incrustación, toda la alcalinidad del agua bruta será destruida pero no perdida. La membrana es un sistema cerrado y el dióxido de carbono permanecerá bajo presión hasta que sea expuesto en un sistema abierto. La recuperación de la alcalinidad necesita considerarse durante el control de incrustación y depende de cuanto CO<sub>2</sub> y bicarbonato haya en el agua bruta.

### 4.2. CRITERIOS DE OPERACIÓN

La operación de una planta de OI/NF requiere monitorización constante de la producción y calidad de agua. Hay varios parámetros diferentes de operación que pueden monitorizarse con éxito para controlar el rendimiento total de la planta. Hay que tener en mente como es una planta, en el ANEXO 14 se muestra la vista en planta de una planta de Osmosis inversa. Los parámetros más comunes para monitorizar son presión diferencial, caudal, conductividad y calidad del agua.

#### 4.2.1. Monitorización.

Los parámetros a monitorizar son los que permitirán llevar un buen control en todos los aspectos de proceso, un informe de puesta en marcha debería incluir una descripción completa de la planta, rendimiento de la unidad de pretratamiento, rendimiento de las membranas y rendimiento del postratamiento, los informes de trabajo deben conservarse también como parte de la monitorización. La información incluye:

- Caudales (de producto y concentrado de cada etapa)
- Presiones (de alimentación, producto y concentrado de cada etapa, y muestra de la salmuera del producto de permeado)
- Temperatura (de alimentación y producto)
- pH (alimentación, producto y concentrado)
- Conductividades, sólidos totales disueltos de cada etapa y cada permeador (alimentación, producto y concentrado)
- Incidentes inusuales (cambios de pH, presión, caudal, paradas etcétera)
- Calibración de todos los indicadores y aparatos de medida.

Deben guardarse los registros de mantenimiento de la planta. Ellos proporcionarán información acerca del rendimiento de los permeadores y del equipo mecánico de la planta. La información incluye:

- Mantenimiento rutinario
- Fallos mecánicos
- Reemplazos del permeador
- Limpiezas (agentes de limpieza y condiciones de uso)
- Postratamientos químicos (tipo y condiciones utilizadas)
- Frecuencia de reemplazo de los filtros
- Calibrado de equipos de medida (termómetros, manómetros, rotámetros, etc.)

#### 4.2.2. Cantidad.

La producción de agua esta monitorizada normalmente por la caída de presión a lo largo de las vasijas o recipientes a presión. Las membranas producirán naturalmente una resistencia al paso del agua a través de la capa activa de la membrana. Las membranas necesitan limpieza cuando esta resistencia produce un incremento del 10 % o más de la pérdida de presión inicial. Las

frecuencias de limpieza de las membranas varían en las aplicaciones normales de planta, desde tres meses hasta dos años, siendo el promedio aproximado de ocho meses. Existe una relación entre la temperatura y el caudal, contamos con una ecuación que permite hacer la corrección por temperatura:

$$FCT = \frac{J_{T^{\circ}C}}{J_{25^{\circ}C}} = 1,03^{(T-25)} \quad (26)$$

Donde:

$FCT$  = factor de corrección de temperatura

$J_{T^{\circ}C}$  = caudal a la temperatura actual

$J_{25^{\circ}C}$  = caudal de temperatura de 25°C

$T$  = temperatura actual real

#### 4.2.3. Calidad.

La calidad del agua en la plantas de membranas de OI/NF esta monitorizada normalmente por la medida de conductividad cada 48 ó 24 horas. Se debería esperar que las membranas se deteriorasen naturalmente con el uso, sin embargo, la tasa de deterioro de calidad normalmente no será mayor del 2 al 3% anual. Las puntas o incrementos repentinos de conductividad indicarían un fallo de la junta o anillo de sellado, en oposición al fallo o rotura de la superficie de la membrana.

La temperatura también afecta la transferencia de masa de los solutos; el efecto resultante es que a medida que la temperatura aumenta, el rechazo de los solutos controlados por difusión disminuirá incluso aunque aumente el caudal en las mismas condiciones. Es importante que la temperatura del agua se monitorice durante la operación de las plantas de OI/NF y que se mantenga una vigilancia de los efectos de la temperatura sobre la transferencia de masa cuando se realizan comparaciones de datos de plantas o instalaciones.

#### 4.2.4. Caudal y coeficiente de transferencia de masa.

Un buen método de monitorizar la productividad es monitorizar el coeficiente de transferencia de masa del agua a lo largo del tiempo de producción. El coeficiente de transferencia de masa se describe a veces como un caudal específico, ya que es la relación del caudal a la pérdida de presión a través de la membrana. El coeficiente de transferencia de masa es una buena medida de la eficiencia y puede monitorizarse, como presión, para determinar la aceptabilidad de la producción. La monitorización de la presión es aceptable en tanto se mantenga como una constante de la producción, cuya cantidad es una medida equivalente de coeficiente de transferencia de masa. El caudal es aceptable para monitorizar la producción en tanto que la presión se mantenga constante, lo cual no es aceptable para cumplir el objetivo de la producción. Como con el caudal, el coeficiente de transferencia de masa de la membrana debe también ajustarse en temperatura para efectuar comparaciones.

#### 4.2.5. Vida de la membrana.

El rechazo de los solutos y productividad de la membrana se deteriorará con el tiempo debido a la compactación, reacciones químicas o biodegradación de la superficie de las membranas. La vida promedio de una membrana dependiendo del material va según los fabricantes de 3 a 5 años, la vida útil real puede llegar fácilmente a los 6-7 años, pero si no se cuidan las membranas durante el trabajo, o los sistemas de pretratamiento no están diseñados adecuadamente, el reemplazo de las membranas puede ser necesario en menos de un año.

#### 4.2.6. Limpieza de las membranas.

Las membranas deben ser limpiadas regularmente durante su vida operativa. La frecuencia y tipo de la limpieza depende de la calidad del agua de alimentación. Un limpiador orgánico de elevado pH se utiliza para eliminar solutos orgánicos depositados en la superficie de la membrana. El ácido etilendiaminotetracético en solución de NaOH es muy común para la limpieza orgánica. El ácido fosfórico se utiliza normalmente para eliminar depósitos inorgánicos como el carbonato cálcico. Sin embargo el azufre elemental y las arcillas coloidales son casi imposibles de eliminar de la superficie de la membrana una vez que se hayan depositado. Hay diferentes soluciones y productos químicos usados para limpiar membranas. Los detergentes comunes con base de fosfatos han sido utilizados con éxito para eliminar productos orgánicos de la superficie de las membranas. Los fabricantes normalmente recomiendan las condiciones de limpieza. Tales como la temperatura, rango de pH, frecuencia y duración.

#### 4.2.7. Recomendaciones de operación

Por último en esta sección se pretende dar a conocer algunos aspectos importantes que se deben saber en el momento de operar el sistema, recomendaciones que nacen de la experiencia de las firmas constructoras y de investigadores o diseñadores de operaciones de membranas de OI/NF:

- No aumentar nunca la producción de diseño de una instalación aumentando la presión de trabajo, como ya vimos en el diseño un cambio de la presión sería catastrófico y podría significar un colapso de las membranas.

- Si se produce un aumento de la temperatura del agua a tratar y en consecuencia un aumento de producción, ajuste la recuperación del equipo a la de diseño para no suscitar una mala calidad del agua y evitar sobrediseño de las instalaciones.
- No aumentar el porcentaje de recuperación de diseño, cerrando la válvula de concentrado, ya que se aumentaría en caudal repercutiendo en el deterioro de las membranas acortándose su vida del orden de cuatro veces si por ejemplo se dobla el flujo.
- Si se sospecha que en las membranas hay incrustaciones con carbonatos debido a una falla en la dosificación de ácido o por otro motivo, no se puede poner a funcionar la bomba de ácido. Hay que parar la planta y enjuagar las membranas con la solución de ácido orgánico recomendada por el fabricante, y así se retirarán los carbonatos como citratos.
- Si la planta es nueva, el operador debe cerciorarse que la instalación mecánica y eléctrica este efectuado correctamente antes de arrancar el sistema. En todos los casos, se deben guiar por los instructivos del fabricante del equipo; de no hacerlo, pondría en grave riesgo la vida útil de sus membranas y de su planta.

## 5. CONCLUSIONES

- Es viable la implementación de un sistema de Osmosis inversa o Nanofiltración en el país siempre y cuando existan recursos económicos para soportar una investigación preliminar y una inversión inicial.
- La tecnología de Osmosis inversa o Nanofiltración no resulta tan costosa como lo era hace unos años, pues aunque la inversión inicial es importante, los costos de operación y mantenimiento pueden ser más bajos que en los tratamientos convencionales.
- La falta de investigación y búsqueda de soluciones alternativas hacen que no se disponga de sistemas de tratamiento por membrana para agua de consumo en Colombia, limitándose estos sistemas a aplicaciones industriales.
- En el diseño preliminar, puesta en marcha, análisis de costos y condiciones de operación resulta útil estudiar el proceso en tres etapas por separado así: Sistema de pretratamiento, Sistema de tratamiento por membranas y Sistema de postratamiento
- Para la posible implementación de un sistema de Osmosis inversa o Nanofiltración se hace primordial un estudio de costo-beneficio asociado principalmente a la calidad del agua a tratar.
- Para evaluar si un sistema de Osmosis inversa (o Nanofiltración) es el proceso más indicado para el agua de alimento es cuestión de evaluar principalmente: Que calidad y cantidad de producto quiere en su proceso y que clase de agua bruta tiene usted para procesar.
- En Colombia existen serias falencias en el suministro de agua potable, no disponen del recurso 9,5 millones de personas (DANE 1998), se proyecta que en el 2015 el 66 por ciento de los colombianos podrían estar en alto riesgo de desabastecimiento de agua potable (Defensoría 2005), lo cual es un llamado a los investigadores y al gobierno a buscar



alternativas como los sistemas de membrana para que en el futuro este problema no exista.

- La inversión y los costos de operación de los sistemas de membranas crecen directamente en función del caudal de permeado de la membrana.
- Los sistemas de Nanofiltración son muy similares en apariencia y operación a la Osmosis Inversa, por tanto se pueden estudiar simultáneamente, las corrientes de flujo en ambos casos son: alimentación, rechazo, y producto (permeado).
- Los sistemas de Nanofiltración y Osmosis Inversa difieren en el tamaño de poro de membrana y en la presión de operación. La osmosis inversa presenta menor tamaño de poro y mayor presión de operación por tanto es más costosa que la Nanofiltración.
- Cada membrana tiene una producción determinada, la cual no se debe sobrepasar y viene dada por el fabricante, igualmente la recuperación de cada elemento no debe ser superior a la de diseño.
- El trabajar a recuperaciones altas repercute en la precipitación de sales y materia coloidal sobre las membranas, necesitándose lavados químicos más frecuentes, además el caudal de salida del último elemento no debe ser inferior al mínimo recomendado y hay que instalar el adecuado número de membranas dispuestas en etapas.
- A una presión fija y para cada tipo de agua, una membrana va a dejar pasar un número determinado de metros cúbicos de producto antes de ensuciarse. Si se aumenta la productividad por metro cuadrado, va a acortarse proporcionalmente el tiempo entre limpiezas, por tanto disminuyéndose la vida útil de las membranas influyendo en los costos.
- Si operamos al 100% de recuperación, a corto plazo comenzarían a precipitar sales poco solubles como sulfatos y carbonatos de Calcio y Magnesio, que bajarían notablemente la eficiencia y productividad en la planta, la conversión no debe ser tan alta que el caudal de descarga del rechazo sea inferior al caudal mínimo de los elementos.

- A mayor temperatura de diseño más flujo de permeado se produce y consecuentemente menor cantidad de membranas se necesitan. Cabe señalar que el diseñar a temperaturas elevadas puede acortar la vida de las membranas ya que acelera la degradación química y física de las mismas.
- Las membranas tienen grandes ventajas, pueden ser llevados a cabo a temperatura ambiente, presentan grandes porcentajes de remoción, trabajan en continuo, son fácilmente escalables, no requieren generalmente la adición de productos químicos agresivos, remueven sales, durezas, patógenos, turbidez, compuestos orgánicos sintéticos, pesticidas y la mayoría de los contaminantes del agua potable conocidos hoy en día.

## BIBLIOGRAFIA

1. A W W A. Water treatment membrane processes. McGraw Hill.
2. PERRY. R. Manual del ingeniero químico. Sexto edición. Tomo cuatro. McGrawHill.
3. RAMALHO .R. Tratamiento de aguas residuales. Reverte S.A.
4. GEANKOPLIS. C. Procesos de transporte y operaciones unitarias. Cesca.
5. METCALF INC. Ingeniería de aguas residuales. Tratamiento, vertido y Reutilización. McGraw Hil.
6. RIGOLA. M. Tratamiento de aguas industriales: Aguas de proceso y Residuales. Marcombo.
7. WALAS.S. Chemical process equipment. Butterworth-Heinemann series in Chemical.
8. CAMPA. J. "Membranas de separación". Revista de plásticos modernos. Volumen 81, páginas 716-723, 2001.
9. MALFORD, A. "NF perfonmance at full pilot scale". Journal American Water Works Association. Volumen 91, páginas 64-75, 1999.
10. SINGH, RAJADAR, "Effectively control reverse osmosis systems". Chemical Engineering progress. Volumen 95, páginas 57-84, 1999.
11. MALFEITO, J. "Polímeros en membranas de Ósmosis Inversa" Revista de Plásticos modernos. Volumen 98, páginas 282-294, 1998.
12. STRIDSBERG,S. "Filtro de membranas de gran capacidad para purificación De Aguas residuales industriales". Revista AAB, No 2, Pág. 9-14.

13. MANTZANINOS, DINISSIOS. "Beneficial combination of met oxidation, membrane Separation and biodegradation process for treatment of polymer Processing wastewater". The Canadian journal of Chemical Engineering.
14. SCHELER,C. "Mass transfer coefficients in reverse osmosis from desalation Process". Canadian journal of Chemical Engineering. Volumen 77, Páginas 863-868. 2000.
15. MASCAN, FAZILET, WILY, "optimal design of reverse osmosis module networks". Aiche Journal. Volumen 46.Paginas 964-954.2000
16. ECHASING, SALLAGO. "Instalación desaladora de agua de mar de Dhekelia (Chipre): Diseño, construcción y puesta en servicio de la planta de Osmosis inversa". Ingeniería Civil: Cedey. Número 110. Páginas 11-173. 1998.
17. HELLER, R. "Fuente de vida en el desierto". New World. Número 4. Páginas 8-18.2001 .
18. RIERADEWALL, J. "Ecodiseño y ecoproductos". Barcelona Rubes 1999.
19. YOKOEZEK, A. "Osmotic pressures studied using a simple equation of state". Applied Energy. Volumen 83. 2006.
20. BAKON, PELLEGRINO, PRICE. "Measurement of water permeation kinetics Across Reverse osmosis and nanofiltration membranes Apparatus Development". Journal of Membrane Science. 09-2005.
21. PICKERING,K. WIESER,M. "Cost model for low-pressure membrane Filtration" Journal of environmental engineering. Páginas 119-126. 1998.
22. STRATHMAN,H. "Economic evaluation of membrane technology".. Aiche Journal. Volumen 40. Páginas 121-130. 1999.
23. BUCKLEY,C. "Membrane technology for the treatment of effluents". Chemical Engineering. April 45-50. 1998.
24. BRIAN,P. "Osmosis systems design". Aiche Journal. 1990.

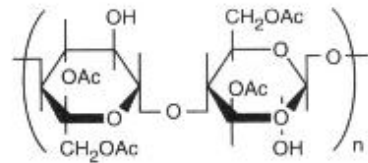
25. KENAL, I. "Integration of seawater desalation with power generation"  
Desalation. Volumen 180, Páginas 217-229. 2005.
26. BADAL, GOMEZ. "Viability study of different reverse osmosis membranes  
for Application in the tertiary treatment of wastes from the industry"  
Desalation. Volumen 180, 2005.
27. DECRETO 475 DE 1998, calidad del agua
28. MINISTERIO DEL MEDIO AMBIENTE, diagnóstico e inventario de los  
sistemas de tratamiento de aguas residuales municipales, 1998
29. [www.Unicef.Org/Spanish/Infobycountry/Colombia\\_Statistics.Html](http://www.Unicef.Org/Spanish/Infobycountry/Colombia_Statistics.Html)
30. [www.col.ops-oms.org](http://www.col.ops-oms.org)
31. [www.cepis.ops-oms.org](http://www.cepis.ops-oms.org)
32. [www.defensoria.org.co](http://www.defensoria.org.co)
33. [www.minambiente.gov.co](http://www.minambiente.gov.co)
34. [www.presidencia.gov.co/](http://www.presidencia.gov.co/)
35. [http://mx.geocities.com/osmosis\\_inversa\\_agua/index.htm](http://mx.geocities.com/osmosis_inversa_agua/index.htm)
36. [www.fao.org](http://www.fao.org)
37. [www.ncbi.nlm.nih.gov](http://www.ncbi.nlm.nih.gov)
38. [www.cnpml.org](http://www.cnpml.org).
39. [www.dow.com/liquidseps/design](http://www.dow.com/liquidseps/design)
40. [www.membrane.unsw.edu.au/](http://www.membrane.unsw.edu.au/)
41. [www.ampacusa.net](http://www.ampacusa.net)
42. [www.acqua-pura.net](http://www.acqua-pura.net)
43. [www.accepta.com/Reverse\\_Osmosis](http://www.accepta.com/Reverse_Osmosis)
44. [www.aguadecalidad.com](http://www.aguadecalidad.com)
45. [www.acsmedioambiente.com](http://www.acsmedioambiente.com)

46. [www.aquapurificacion.com](http://www.aquapurificacion.com)
47. [www.dhptraining.com](http://www.dhptraining.com)
48. [www.advicechemical.com](http://www.advicechemical.com)
49. [www.newtec.com.uk](http://www.newtec.com.uk)
50. [www.lenntech.com](http://www.lenntech.com)
51. [www.ictp.csic.es](http://www.ictp.csic.es)
52. [www.zenon.com](http://www.zenon.com)
53. [www.ca.finance.yahoo](http://www.ca.finance.yahoo)
54. [www.conicit.go.cr/boletin/aguas\\_resid.shtml](http://www.conicit.go.cr/boletin/aguas_resid.shtml)
55. [www.aquasystem.com.mx](http://www.aquasystem.com.mx)
56. [www.superfund.pharmacy.arizona.edu](http://www.superfund.pharmacy.arizona.edu)
57. [www.veoliawatersystems.es](http://www.veoliawatersystems.es)
58. [www.aquasource.com](http://www.aquasource.com)
59. [www.niroinc.com](http://www.niroinc.com)
60. <http://usinfo.state.gov/journals/>
61. [www.asime.com.mx/](http://www.asime.com.mx/)
62. [www.ecoionics.com](http://www.ecoionics.com)
63. [www.ua.es/iuaca/oi.htm](http://www.ua.es/iuaca/oi.htm)
64. <http://dgsalut.caib.es/user/>
65. [www.serina.es/empresas/fenacore2](http://www.serina.es/empresas/fenacore2)
66. <http://hispagua.cedex.es>
67. <http://tar5.eup.us.es/tar/enlaces/index.htm>
68. [www.FluidSystems.com](http://www.FluidSystems.com)

## 6. ANEXOS

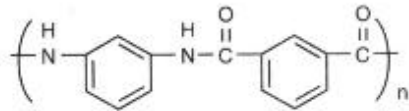
### 6.1. ANEXO 1.

Estructuras moleculares de los principales materiales orgánicos de las membranas.

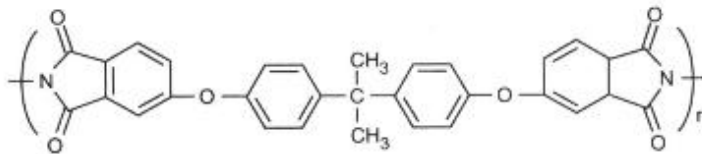


Acetato de celulosa (AC)

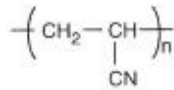
Ac: OCOCH<sub>3</sub>



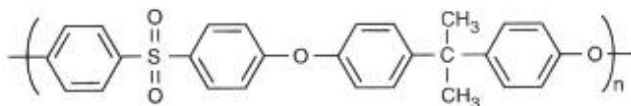
Poli (m-fenileno isoftalamida) ("Noynex")



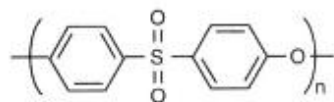
Polieteramida ("Ulteno")



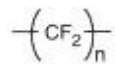
Poliacrilnitrilo (PAN)



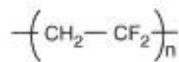
Polisulfona (PSf)



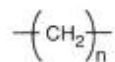
Polietersulfona (PES)



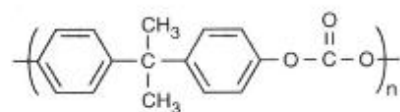
Teflón



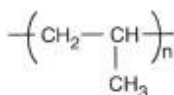
Polifluoruro de vinilideno (PVDF)



Polieteileno (PE)



Policarbonato (PC)



Polipropileno (PP)

## 6.2. ANEXO 2.

### Propiedades de membranas con rangos de separación

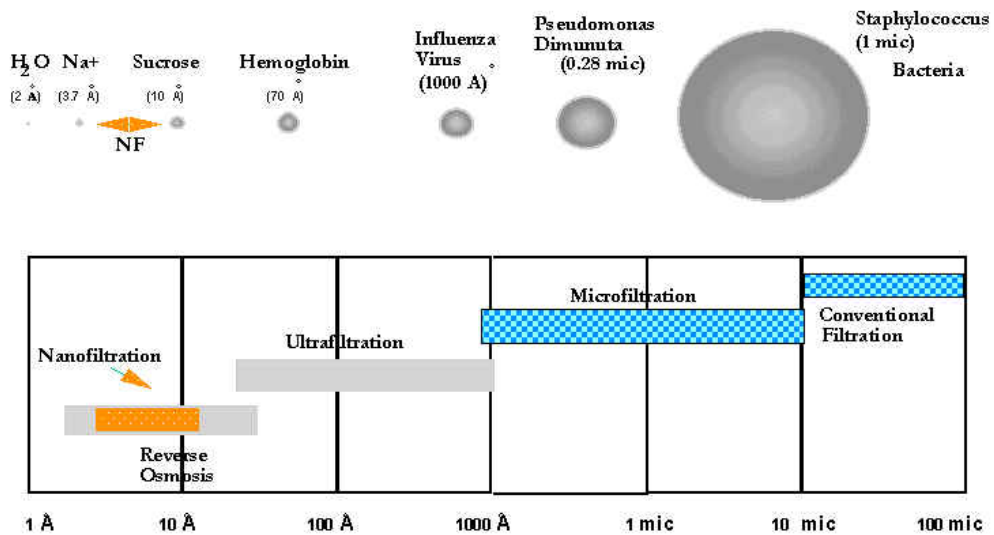
Membranas	<b>Osmosis Inversa</b>	<b>Nanofiltración</b>	<b>Ultrafiltración</b>	<b>Microfiltración</b>
	Asimétrica	Asimétrica	Asimétrica	Simétrica
<b>Grueso</b>	150 um	150 um	150-250 um	Asimétrica 10-150 um
<b>Capa Superficial</b>	1um	1um	1 um	1 um
<b>Tamaño de Poro</b>	0.002 um	0.002 um	0.05-0.2 um	0.2-5 um
<b>Rechazos</b>	HMWC*	HMWC, mono, di y oligosacáridos, aniones polivalentes	Macromoléculas*  Proteínas, polisacáridos, virus	Partículas barro, bacterias
	LMWC			
	Cloruro			
	Sodio, glucosa			
	Aminoácidos			
<b>Materiales de membranas</b>	Proteínas CA* capa delgada	CA* capa delgada	Cerámica, PSO* CA* PVDF, capa delgada	Cerámica Pp*, PSO* PVDF*
<b>Módulo de membrana</b>	<u>Tubular,</u> <u>Espiral</u>	<u>Tubular, Espiral</u>	<u>Tubular, Espiral</u>	<u>Tubular,</u>  <u>Espiral</u>
<b>Presión</b>	15-150 bars	5.35 bars	1-10 bars	2 bars

\*CA- acetato de celulosa; \*PSO-fluoruro de polivinil diseño, \*PP-polipropileno;  
\*HMWC- (compuestos de alto peso molecular); 100,000 a 1 millones de moles/g;  
LMWC (compuestos de bajo peso molecular): 1,000 a 100,000



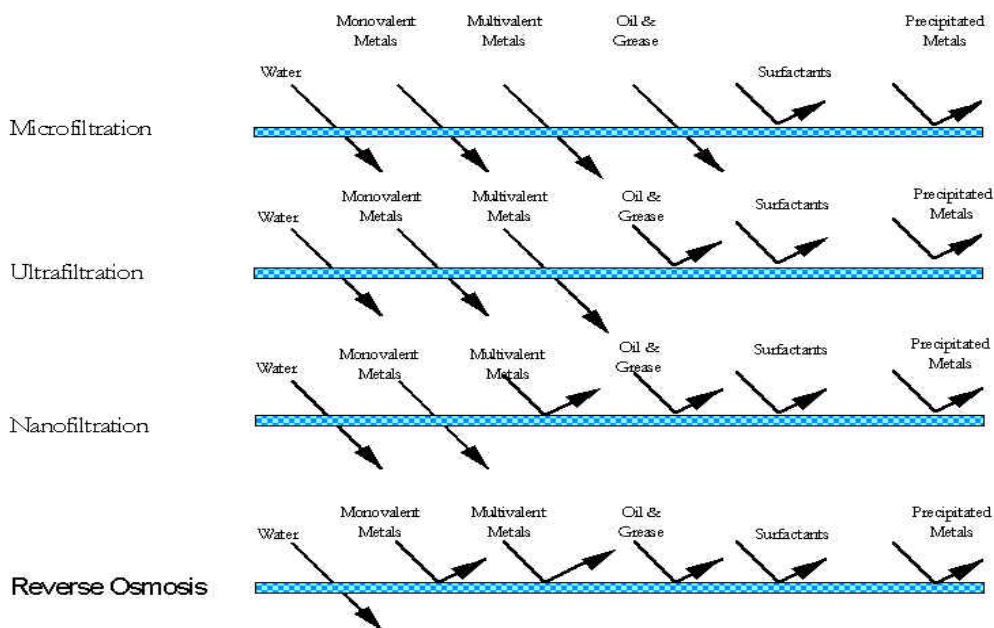
### 6.3. ANEXO 3.

Se ilustra capacidad de rechazo de las diferentes membranas en función de algunos componentes biológicos presentes en la aguas a potabilizar:



### 6.4. ANEXO 4.

Se ilustra capacidad de rechazo de las diferentes membranas en función de algunos componentes metálicos, surfactantes, gasolina y grasas:



## 6.5. ANEXO 5.

Muestra las Coberturas Urbanas de Acueducto por Rangos Municipales de población:

Distribución por Población	N° Municipios	Población Urbana DANE 1998	Población Rural DANE 1998	Cobertura Urbana Acueducto 1998	Población Urbana Servida Acueducto 1998
Áreas Metropolitanas	9	13,235,061	278,064	92.2%	12,202,726
0-2.500	403	514,116	2,512,653	93.6%	481,213
2.501-12.000	463	2,740,486	5,382,079	88.9%	2,436,292
12.001-30.000	94	1,823,136	1,460,070	88.7%	1,617,122
30.001-70.000	46	2,059,164	1,053,896	89.0%	1,832,656
>70.000	16	1,857,360	429,573	87.2%	1,619,618
Capitales <100.000	11	386,074	205,290	63.8%	246,315
Capitales >100.000	12	3,526,943	413,747	84.3%	2,973,213
Sub-Total	1,045	12,907,279	11,457,308	86.2%	11,126,074
Total	1,091	28,719,052	12,049,669	89.2%	25,619,498

Fuente: Ministerio de Desarrollo - 1998

## 6.6. ANEXO 6.

Rangos del índice de ensuciamiento según su aplicación.

(IEM= Índice de ensuciamiento modificado. MIFC= Mini-índice del factor cegado. IDS= Índice de densidad salina)

Índice de ensuciamiento	Rango	Aplicación
<b>IEM</b>	0 a 2 $s / L^2$	Ósmosis inversa
	0 a 10 $s / L^2$	Nanofiltración
<b>MIFC</b>	0 a $3 \cdot 10^{-5} L / s^2$	Ósmosis inversa
	0 a $1,5 \cdot 10^{-4} L / s^2$	Nanofiltración
<b>IDS</b>	0 a 2	Ósmosis inversa
	0 a 3	Nanofiltración

## 6.7. ANEXO 7.

Tres ejemplos de sistemas de membranas para tratar agua.

Diagrama de flujo de la planta de Nanofiltración de Fort Meyers, ubicada en Florida (Estados Unidos)

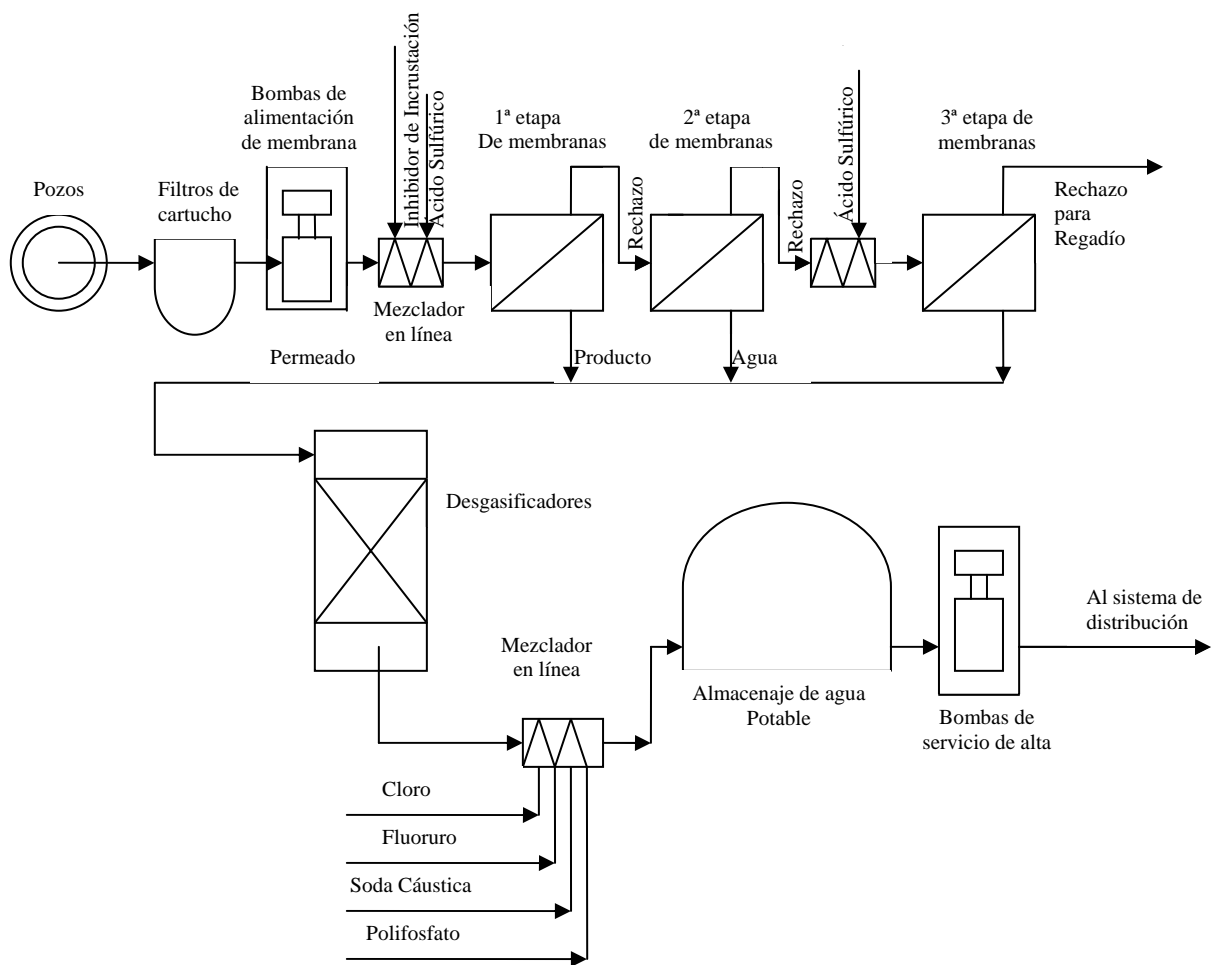
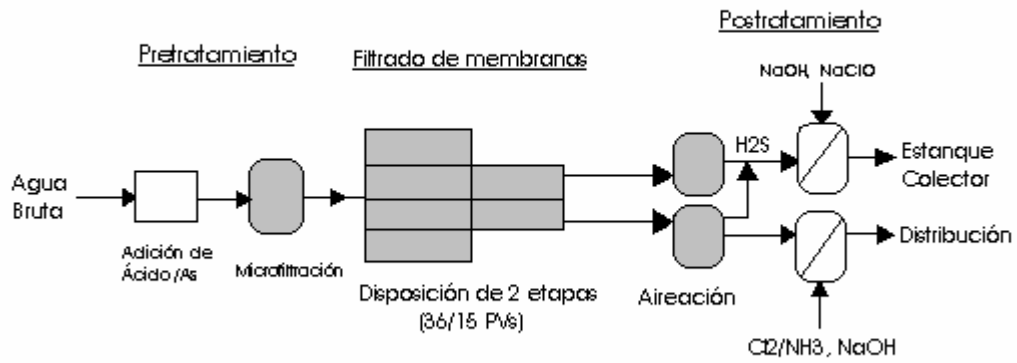
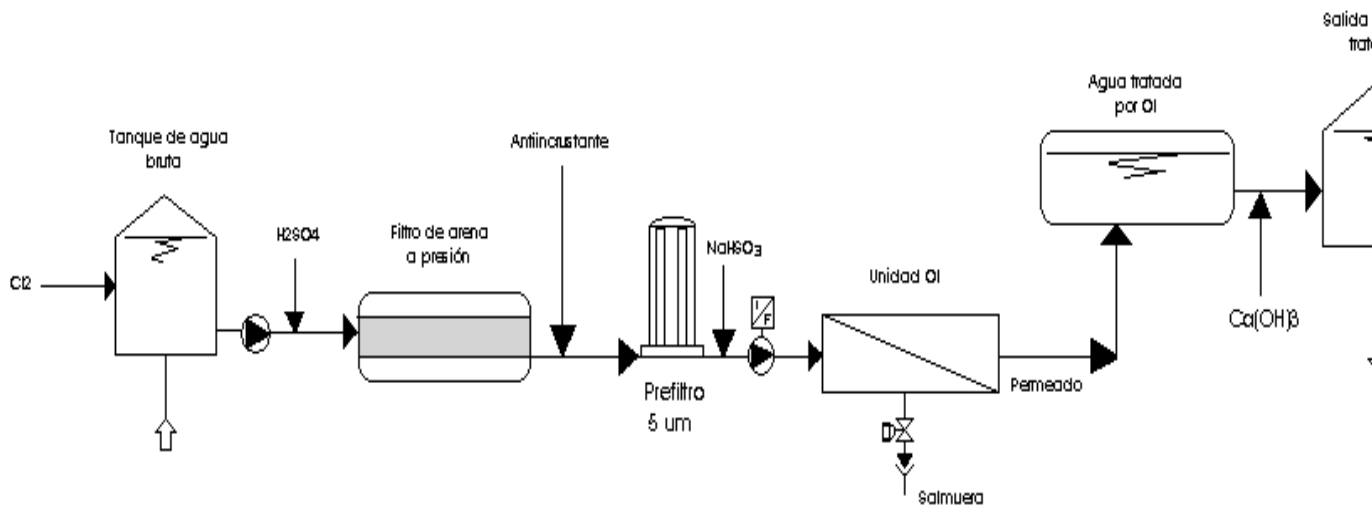


Diagrama de flujo de la planta de ósmosis Inversa de Vero Beach, ubicada en Florida (Estados Unidos)



Esquema simplificado del proceso de la Planta de osmosis inversa de Son Tugores, ubicada en Palma de Mallorca (España)



## 6.8. ANEXO 8

Las especificaciones de membranas de OI según el agua de alimentación (**Agua superficial, subterránea y salobre, de mar**) y los precios EN PESOS de acuerdo a su tamaño, flujo de permeado y porcentaje de rechazo. También se muestra las especificaciones para membranas de Nanofiltración.

### Agua superficial - Membranas de Diámetro de 2.5 a 4 Pulgadas

Fabricante	Modelo	Tamaño de la Membrana (Pulgadas)	Flujo de Permeado (Galones x Día)	Rechazo Mínimo	Rechazo Típico	Precio en Pesos x1000
Dow / Filmtec	TW30-2514	2.5" x 14"	175	98%	99%	<b>\$ 84</b>
Dow / Filmtec	TW30-2521	2.5" x 21"	300	98%	99%	<b>\$112</b>
Fluid Systems	TW30-2540	2.5" x 40"	650	98%	99%	<b>\$155</b>
Trisep	TW30-4014	4" x 14"	525	98%	99%	<b>\$225</b>
Dow / Filmtec	TW30-4021	4" x 21"	900	98%	99%	<b>\$250</b>
Dow / Filmtec	TW30-4040	4" x 40"	2200	98%	99%	<b>\$259</b>
Fluid Systems	SC-4040-HF	4" x 40"	3200	98%	98.2%	<b>\$290</b>

**Agua subterránea y salobre - Membranas de Diámetro de 2.5 y 4 Pulgadaa**

<b>Fabricante</b>	<b>Modelo</b>	<b>Tamaño de la Membrana (Pulgadas)</b>	<b>Flujo de Permeado (Galones x Dia)</b>	<b>Rechazo Mínimo</b>	<b>Rechazo Típico</b>	<b>Precio en Pesos x1000</b>
Dow / Filmtec	BW30-2540	2.5" x 40"	650	98%	99%"	<b>\$201</b>
Fluid Systems	SC-2540-HR	2.5" x 40"	750	98.8%	99.4%	<b>\$173</b>
Dow / Filmtec	BW30LE-4040	4" x 40"	2800	98%	99%	<b>\$292</b>
Hydranautics	ESPA2-4040	4" x 40"	1900	99.5%	99.6%	<b>\$311</b>
Hydranautics	CPA2-4040	4" x 40"	2250	99.2%	99.5%	<b>\$287</b>
Fluid Systems	4820-HR	4" x 40"	2300	98.8%	99.4%	<b>\$320</b>
Trisep	4040-ACM3	4" x 40"	2600	99%	99.2%	<b>\$329</b>

**Agua subterránea y salobre - Membranas de Diámetro de 8 Pulgadas**

<b>Fabricante</b>	<b>Modelo</b>	<b>Tamaño de la Membrana (Pulgadas)</b>	<b>Flujo de Permeado (Galones x Dia)</b>	<b>Rechazo Mínimo</b>	<b>Rechazo Típico</b>	<b>Precio en Pesos x1000</b>
Dow / Filmtec	BW30-365	8" x 40"	9500	98%	99%"	<b>\$ 783</b>
Trisep	8040-ACM3-	8" x 40"	10500	98%	99%	<b>\$ 801</b>
Dow / Filmtec	BW30LE-440	8" x 40"	11500	99%	99%	<b>\$ 951</b>
Trisep	8040-ACM4	8" x 40"	14000	98%	99%	<b>\$ 873</b>
Fluid Systems	8821ULP-400	8" x 40"	8500	98%	98.5%	<b>\$1214</b>
Hydranautics	CPA4	8" x 40"	6000	99.5%	99.7%	<b>\$ 993</b>
Hydranautics	ESPA1	8" x 40"	12000	99%	99.5%	<b>\$ 875</b>
Hydranautics	ESPA3	8" x 40"	15000	98%	99.5%	<b>\$ 925</b>

**Agua de MAR - Membranas de Diámetro de 2.5, 4 y 8 Pulgadas**

<b>Fabricante</b>	<b>Modelo</b>	<b>Tamaño de la Membrana (Pulgadas)</b>	<b>Flujo de Permeado (Galones x Dia)</b>	<b>Rechazo Mínimo</b>	<b>Rechazo Típico</b>	<b>Precio en Pesos x1000</b>
Dow / Filmtec	SW30-2514	2.5" x 14"	100	99.2%	99.4%"	<b>\$ 167</b>
Dow / Filmtec	SW30-2521	2.5" x 21"	200	99.2%	99.4%	<b>\$ 175</b>
Hydranautics	SWC1-2540	2.5" x 40"	400	99.5%	99.6%	<b>\$ 227</b>
Hydranautics	SWC2-2540	2.5" x 40"	500	99.2%	99.4%	<b>\$ 227</b>
Dow / Filmtec	SW30-4021	4" x 21"	600	99.2%	99.4%	<b>\$ 354</b>
Dow / Filmtec	SW30-4040	4" x 40"	1500	99.2%	99.4%	<b>\$ 550</b>
Dow / Filmtec	SW30HR-8040	8" x 40"	4000	99.2%	99.4%	<b>\$1262</b>
Fluid Systems	2822SS	8" x 40"	5000	99.3%	99.6%	<b>\$1114</b>
Fluid Systems	2822SS-360	8" x 40"	6000	99.3%	99.6%	<b>\$1220</b>

**Membranas de Nanofiltración:**

**NANO Filtración - Membranas de Diámetro de 2.5, 4 y 8 Pulgadas**

<b>Fabricante</b>	<b>Modelo</b>	<b>Tamaño de la Membrana (Pulgadas)</b>	<b>Flujo de Permeado (Galones x Dia)</b>	<b>Rechazo Mínimo</b>	<b>Precio en Pesos x1000</b>
Fluid Systems	2540 S	2.5" x 14"	1160	75%"	<b>\$ 147</b>
Dow / Filmtec	NF70-4040	4" x 40"	2200	95%	<b>\$ 387</b>
Dow / Filmtec	NF90-4040	4" x 40"	1700	95%	<b>\$ 384</b>
Fluid Systems	4040 S	4" x 40"	2965	75%	<b>\$ 325</b>
Dow / Filmtec	NF270-400	8" x 40"	12500	95%	<b>\$1018</b>
Dow / Filmtec	NF90-400	8" x 40"	10300	95%	<b>\$1018</b>
Fluid Systems	8921S-365	8" x 40"	7000	85%	<b>\$1128</b>
Fluid Systems	8921S-400	8" x 40"	8000	85%	<b>\$1254</b>



Tubos de Presión de PVC - Membranas de Diámetro de 2.5 y 4 pulgadas

<b>MODELO</b>	<b>Acomoda Membranas de Tamaño</b>	<b>Membranas por Tubo de Presión</b>	<b>Presión de operación (psi)</b>	<b>Precio en Pesos x1000</b>
HEO01L	2.5" x 14"	1	300	\$96
HEO02L	2.5" x 21"	1	300	\$97
HEO03L	2.5" x 40"	1	300	\$96
HEO05L	4" x 14"	1	200	\$110
HEO06L	4" x 21"	1	200	\$113
HEO07L	4" x 40"	1	200	\$121
HEO08L	4" x 40"	2	200	\$129
HEO09L	4" x 40"	3	200	\$147
HEO010L	4" x 40"	4	200	\$204
HEO011L	4" x 40"	5	200	\$192
HEO012L	4" x 40"	6	200	\$234

**Tubos de Presión de Acero Inoxidable****Membranas de Diámetro de 4 Pulgadas**

<b>MODELO</b>	<b>Acomoda Membranas de Tamaño</b>	<b>Membranas por Tubo de Presión</b>	<b>Presión de operación (psi)</b>	<b>Precio en Pesos x1000</b>
HEF42	2.5" x 14"	1	600	\$192
HEF01	2.5" x 14"	1	1000	\$202
HEF43	2.5" x 21"	1	600	\$212
HEF06-3	4" x 40"	1	600	\$384
HEF36	4" x 40"	1	1000	\$581
HEG07	4" x 40"	2	400	\$505
HEF07	4" x 40"	2	1000	\$732
HEG08	4" x 40"	3	400	\$662
HEF08	4" x 40"	3	600	\$682
HEF38	4" x 40"	3	1000	\$884
HEF09	4" x 40"	4	600	\$838
HEF39	4" x 40"	4	1000	\$1040
HEF10	4" x 40"	5	600	\$995
HEF40	4" x 40"	5	1000	\$1111
HEF11	4" x 40"	6	600	\$1146
HEF41	4" x 40"	6	1000	\$1348

**Tubos de Presión de Fibra de vidrio****Membranas de Diámetro de 8 Pulgadas**

<b>MODELO</b>	<b>Membranas por Tubo</b>	<b>Presión de operación psi</b>	<b>Precio en Pesos x1000</b>
80A1501	1	150	\$2076
80A1502	2	150	\$2202
80A1507	7	150	\$3005
80A30-1	1	300	\$2303
80A30-2	2	300	\$2444
80A30-7	7	300	\$3343
80A60-1	1	600	\$3212
80A60-2	2	600	\$3434
80A60-7	7	600	\$4515
E8S/SP1	1	1000	\$3889
E8S/SP2	2	1000	\$41920
E8S/SP7	7	1000	\$5813
E8H/SP1	1	1200	\$4121
E8H/SP2	2	1200	\$4424
E8H/SP7	7	1200	\$6126
E8H/SP8	8	1200	\$6580

## 6.9. ANEXO 9.

Equipo de dosificación de reactivos



## 6.10. ANEXO 10

Filtros de pretratamiento



## 6.11. ANEXO 11.

Se muestran algunos ejemplos de Bombas de aporte y de alta presión.

### **BOMBAS DE APORTE**



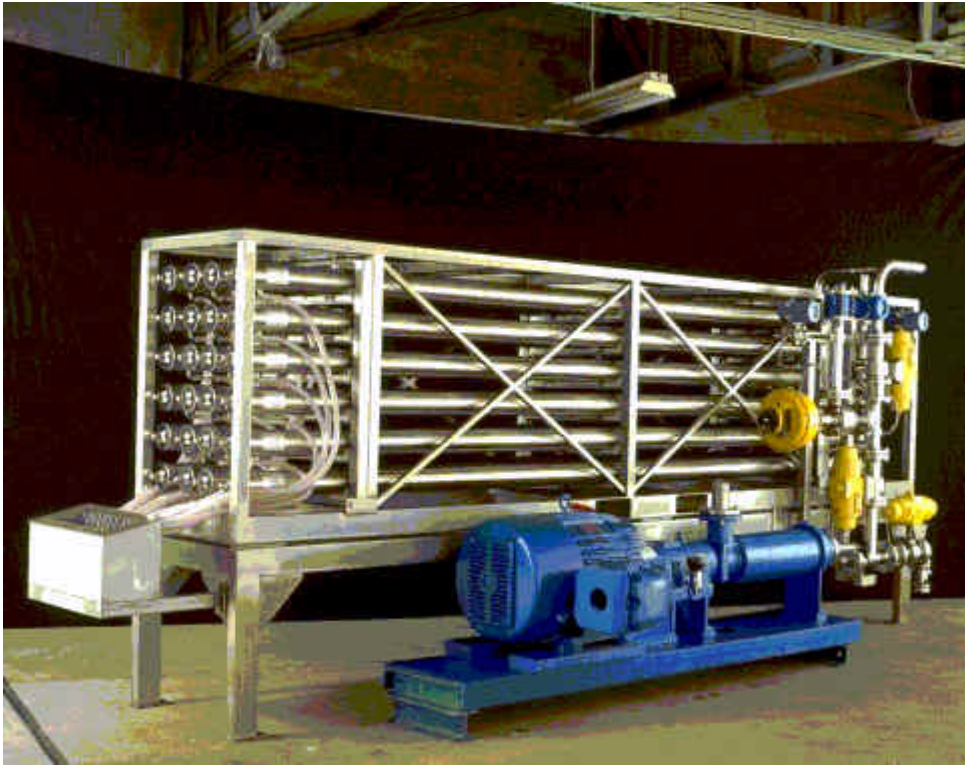
### **BOMBAS DE ALTA PRESIÓN**



## 6.12. ANEXO 12.

Se muestran algunos ejemplos de módulos y disposiciones de membranas.





### 6.13. ANEXO 13.

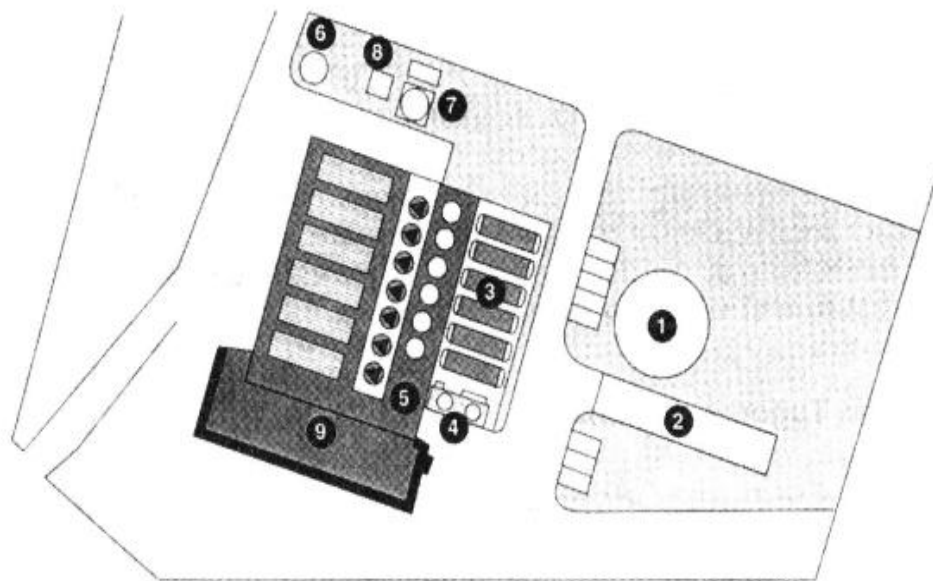
Se muestran los principales efectos adversos del bioensuciamiento de las membranas

<b>Efecto observado del bioensuciamiento</b>	<b>Descripción/Comentario</b>
Disminución de caudal de membrana	Pérdida gradual de caudal de agua debido a la acumulación de biocapa, produciendo en correspondencia un aumento de los costes del sistema; el caudal puede ser restaurado parcialmente mediante la limpieza química periódica.
Reducción del rechazo de soluto	Resulta del aumento de oportunidad para la concentración-polarización en el interior de la biocapa de la membrana, que tiene una consistencia de hidrogel; puede también resultar de la biodegradación de la membrana.
Aumento de la incrustación mineral	La formación de biocapa incrementa la oportunidad para la incrustación mineral, debido al incremento de concentración de polarización o por proporcionar puntos de nucleación para el crecimiento de precipitado.
Incremento de la presión diferencial a través del modulo	Resulta del aumento del tiro friccional del fluido (pérdidas de energía) asociado con la formación de la biocapa superficial, también está causado por el bloqueo de espacios del canal de alimentación debido al crecimiento biológico, el efecto puede ser severo; el efecto puede ser o no reversible, por limpieza o tratamiento biocida.
Contaminación del permeado	Causado por desprendimiento celular y/o de biomasa de las superficies colonizadas del permeado de las membranas, incluyendo fibras soportes de poliéster, líneas de aglutinado, materiales de colección del permeado, etc.
Biodegradación de la membrana	Causada por hidrólisis enzimática directa de los polímeros de la membrana o por pH extremos asociados con microcolonias sobre la superficie de la membrana; puede ocurrir rápidamente bajo circunstancias fisiológicamente favorables (por ejemplo, temperaturas cálidas, nutrientes adecuados), el efecto es esencialmente irreversible dando por resultado una permanente pérdida de las propiedades de rechazo del soluto.
Biodeterioro de los componentes del módulo	Normalmente resulta de la biodegradación de la línea de aglutinado
Reducción del tiempo de vida de la membrana	Resulta de una combinación de todos los factores anteriores; aplicaciones inadecuadas o excesivas de biocida y excesiva frecuencia de limpieza contribuyen a acortar la vida de las membranas



## 6.14. ANEXO 14.

### Vista general de la disposición de una planta de Osmosis inversa



1. Tanque de agua bruta (precloración).
2. Estación de bombeo del pretratamiento.
3. Filtros de arena a presión.
4. Estación de dosificación química ( $H_2SO_4$ , anti-incrustante y  $NaHSO_3$ ).
5. Edificio de OI.
6. Tanque de almacenaje de agua de lavado.
7. Saturador de cal.
8. Tanque de almacenamiento de cal.
9. Edificio de administración.

