

PROCESOS DE MEMBRANA EN TRATAMIENTO DE AGUAS

9.0 SISTEMAS DE FILTRACIÓN EN MEDIOS NO GRANULARES

La filtración en medios no granulares es hoy en día una de las técnicas con mayores posibilidades de aplicación y de desarrollo. Este tipo de filtración consiste en hacer pasar un líquido o fluido a través de una superficie porosa o de una membrana depositada sobre un soporte sólido.

Para una mejor clasificación de los diferentes sistemas de filtración consideremos el espectro de filtración representado en la Figura 1.

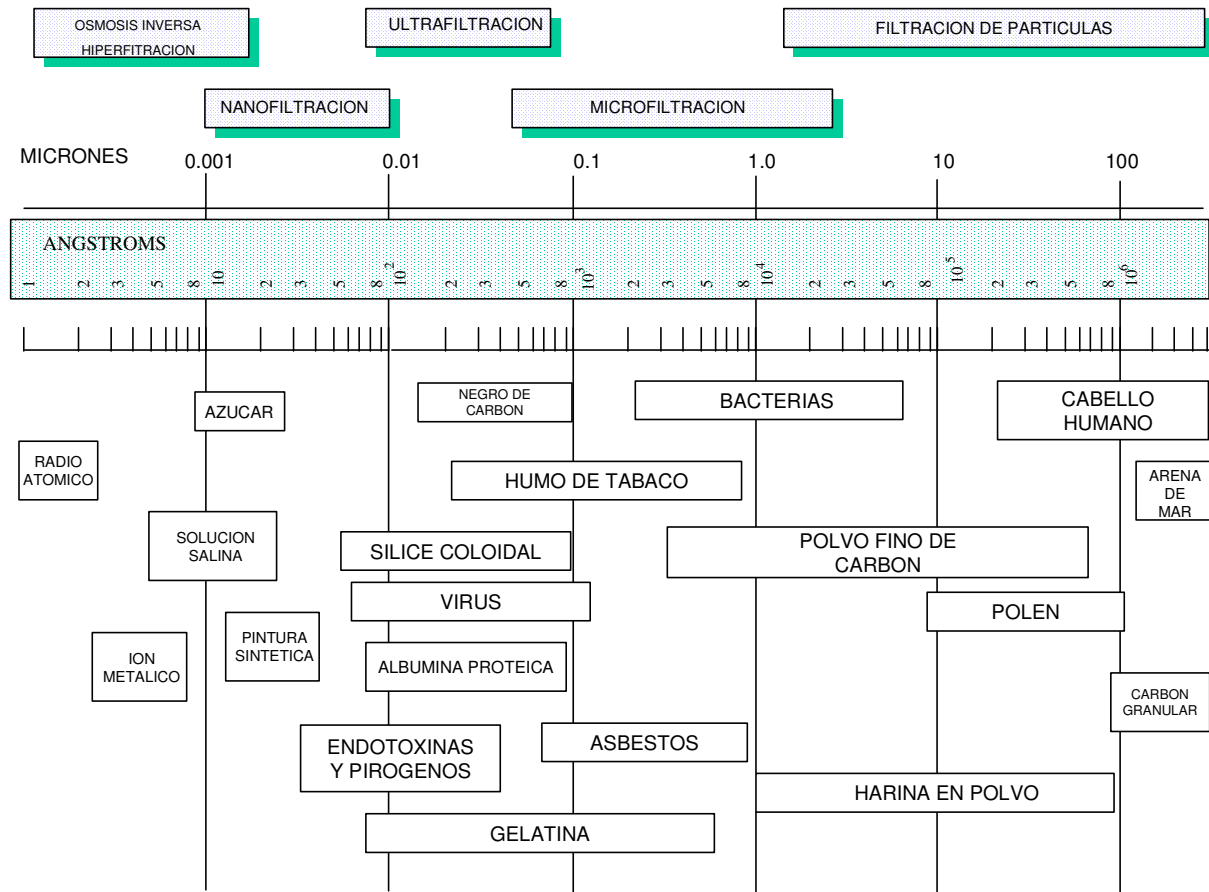


Figura 1: Tipos de Filtración según su clasificación por tamaño.

Filtración de Partículas: de 1 a 1000 μ

Microfiltración: de 0.04 a 2 μ

Ultrafiltración: de 0.05 a 0.1 μ

Nanofiltración: de 10 a 100 Å

Ósmosis inversa: (Hiperfiltración): de 1 a 10 Å

1 m=micrón=10,000 Å=10⁻⁶ mts=0.0001 cm=0.001 milímetros

FILTRACIÓN DE PARTÍCULAS: En la filtración de partículas convencionalmente se han empleado medios tales como: lechos de grava y arena, filtros de diatomeas y filtros de materiales como tela y lona. En estos sistemas de filtración, simplemente por el efecto de la gravedad o por la aplicación de un gradiente de presión, el fluido a tratar es forzado a pasar a través del medio poroso. En su paso por dicho medio, el sólido es retenido en la superficie del material filtrante y el fluido pasa a través del medio hasta un punto de colección de donde es conducido a un siguiente paso de tratamiento o se consume directamente.

FILTROS DE SEDIMENTOS: Los filtros no granulares operan de una forma similar a como ocurre en los filtros de grava y arena, y el agua o fluido a filtrar pasa por el medio y las partículas suspendidas se separan del líquido filtrado al ser retenidas en la superficie del medio filtrante.

En la filtración en medios no granulares, se emplean películas o aglomerados sintéticos soportados sobre una estructura sólida. Las partículas que no tengan un tamaño lo suficientemente grande para ser atrapados por la estructura del material filtrante, pasan con el fluido y salen con el producto.

A este tipo de filtros les llamaremos filtros de sedimentos, ya que esencialmente su función es remover partículas suspendidas presentes en el agua o líquido que se filtra.

Comercialmente se dispone de estos filtros cuya estructura del material filtrante tiene poros o aberturas de un cierto tamaño. Se pueden conseguir filtros de sedimentos en un rango de 1 a 100 micrones de diámetro en el poro y el material del elemento filtrante pueden ser fibras de policarbonato o una película de celulosa. También los hay de material de tela y lona o de un aglomerado de celulosa.

En la operación de un filtro de este tipo, eventualmente la superficie del material se satura con sólidos y el flujo de agua producida disminuye y si se incrementa la presión en el filtro la calidad de agua producida se deteriora. En este punto, el filtro puede lavarse manualmente, y es posible recuperar la capacidad del elemento filtrante en un 70-90% de la condición original, pero después de una serie de ciclos de saturación y lavado, finalmente el elemento filtrante tiene que cambiarse por uno nuevo. (Figura 1).

Si la calidad de producto es determinante, necesariamente se tendrá que cambiar el filtro en cuanto se tengan condiciones cercanas al punto de saturación, o en forma periódica de acuerdo a la experiencia que se adquiera.

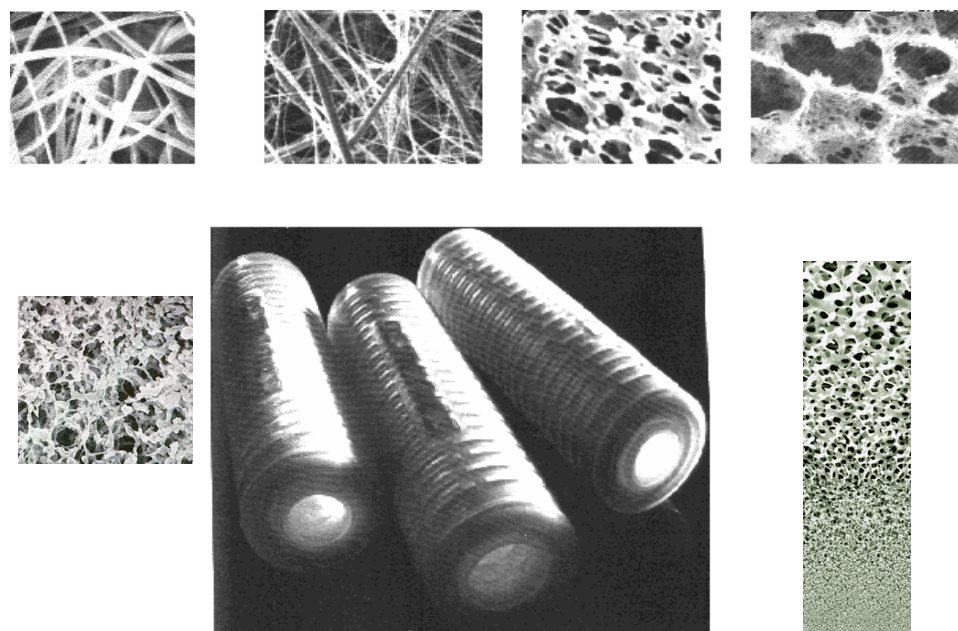


Figura 2: Elementos de filtración y los diferentes materiales en que pueden ser fabricados: fibras de polietileno, polímeros sintéticos, nylon, etc.

Una gran ventaja de este sistema de filtración es que se requiere de un espacio mínimo por unidad de área de filtración. En un filtro abierto o de gravedad la relación Gasto/Área G/A es de 1 a 4 $\text{mts}^3/\text{mt}^2\cdot\text{día}$ (0.7 a 2.8 $\text{lts}/\text{min}\cdot\text{mt}^2$). En un filtro cerrado o a presión, esta misma relación es de 100 a 200 $\text{mts}^3/\text{mt}^2\cdot\text{día}$ (70 a 140 $\text{lts}/\text{min}\cdot\text{mt}^2$). En un filtro de membranas se pueden manejar flujos de 300 a 700 $\text{mts}^3/\text{mt}^2\cdot\text{día}$ (210 a 490 $\text{lts}/\text{min}\cdot\text{mt}^2$).

Si comparamos un filtro de arena de 2 pies (0.60 mts) de diámetro, se tendrá un área de filtración de 0.283 mts^2 . Un filtro de diámetro similar podría acomodar 20 cartuchos de 30" de largo y 2.5" de diámetro, lo cual daría un área de filtración por cartucho de 0.152 mts^2 y un área total de 3.04 mts^2 , la cual es casi 11 veces mayor al área de filtración disponible en un filtro de arena, adicionalmente, un metro cuadrado de

área de filtración de un cartucho de sedimentos de este tipo puede manejar un flujo de agua mucho mayor al equivalente en un filtro de grava y arena.



El arreglo de elementos de filtración se cambia cuando sea necesario, aunque es posible lavar estos y volverlos a usar. Existen en el mercado elementos de filtración de diferente diámetro y largo, así como de diferentes tamaños de poro dependiendo del tamaño de partículas suspendidas que se desee retener.

Figura 3: Filtro de cartuchos tipo membrana

Comparando los filtros de membrana para filtración de partículas con filtros de gravedad o a presión se tienen las siguientes ventajas y desventajas:

VENTAJAS:

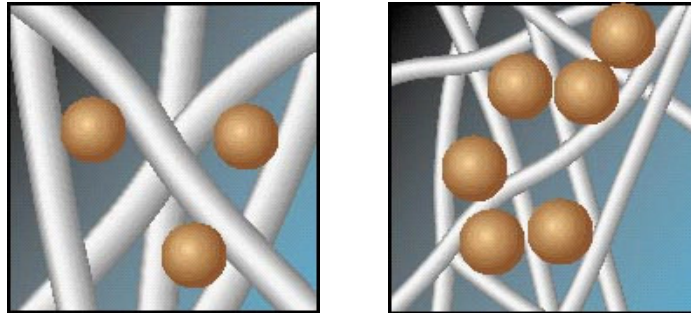
- La filtración en este tipo de medios proporciona un mejor control sobre la calidad del filtrado ya que el tamaño de partículas retenidas es más uniforme y eficiente en las paredes del material filtrante.
- A igual capacidad o área de filtración, el costo de inversión es mucho menor en un filtro de membranas que en un filtro de grava y arena o en un filtro de gravedad.
- En un filtro de membranas es posible cambiar éstas de un tamaño de poro a otro diferente en una forma rápida y sencilla. Esto es sumamente conveniente cuando se desea mejorar la calidad del filtrado, prolongar la vida útil de los cartuchos, etc.
- Las dimensiones de un filtro a presión o un filtro abierto, son mucho mayores a las que tiene un filtro de cartuchos de igual capacidad, por lo que si el espacio es limitado, ésta es una buena opción.
- La instalación y la operación del filtro es mucho más sencilla que un filtro granular, además de que es más económica.

DESVENTAJAS:

- En un filtro de membranas se puede tener un retrolavado, pero no es posible regresar la membrana a su condición original, ya que las partículas sólidas se adhieren firmemente a las paredes de la membrana. En un filtro de arena un retrolavado si es mucho más eficiente.
- El costo de inversión es bajo comparado con un filtro de arena, pero la reposición de las membranas, la cual debe hacerse con mayor o menor regularidad, implica un gasto de operación.

Para aspectos prácticos un filtro de sedimentos para remoción de partículas, consiste de un arreglo de cartuchos dispuestos en una estructura común, la cual está dentro del cuerpo de lo que es propiamente el filtro. El agua o líquido a filtrar es forzado a pasar a través de las membranas por medio de una bomba quedando retenidos los sólidos en la superficie del cartucho y el líquido filtrado se conecta en una tubería de salida.

Este tipo de filtración es sumamente conveniente para tratamiento y acondicionamiento de aguas de un bajo contenido de sólidos en suspensión, si no así, es más conveniente el empleo de sistemas de filtración convencionales como lo es el filtro de grava y arena. Sus posibles aplicaciones son por ejemplo: filtración de agua de albercas, clarificación de aguas potables, remoción de sólidos residuales en aguas de proceso industrial, etc.



En microfiltración y filtración de partículas, los sólidos suspendidos quedan atrapados y son retenidos en la estructura del elemento de filtración. Lo compacto de la estructura que retiene los sólidos determina el tamaño de partículas que serán retenidas en el filtro. Cuanto mayor sea el grado de compactación de las fibras que retienen los sólidos, mayor es la saturación del filtro y deberá limpiarse o cambiarse con mayor frecuencia.

Figura 4: Proceso de microfiltración para retención de sólidos suspendidos

9.1 MICROFILTRACIÓN Y ULTRAFILTRACIÓN:

La microfiltración (MF) y ultrafiltración (UF) son métodos de filtración en membrana, en los cuales se utilizan películas con diámetro de poros más pequeños que los empleados en filtros de sedimentos para filtración de partículas. Estas películas son de diferentes materiales tales como: nylon, microfibras de polietileno, microfibras de vidrio, polipropileno, etc.

El mecanismo de remoción de partículas sólidas en el agua es similar al que ocurre en la separación sólido/líquido en un filtro de partículas: la membrana retiene al sólido y el líquido pasa a través de la película de donde es colectado y enviado a un punto de colección.

El rango de separación de sólidos en suspensión para la MF es de 0.04 a 2 m y en la UF el rango de retención de partículas es de 0.005 a 0.1m.

Los sistemas de filtración de este tipo de separación sólido/líquido son similares a los que existen para filtración de partículas. El conjunto de membranas o de cartuchos está dispuesto en una base común, y ésta base se encuentra dentro de un recipiente. El líquido a filtrar es forzado a pasar a través de las membranas por medio de la presión que se ejerce en una bomba. También es posible tener una sola membrana dentro de un portafiltro y esto se emplea cuando el volumen de agua o líquido a filtrar no es muy grande.

9.2 NANOFILTRACIÓN E HIPERFILTRACIÓN:

Nanofiltración: La nanofiltración (NF) es una técnica de remoción parcial de sólidos disueltos contenidos en el agua. En la MF y UF es posible remover sólidos en suspensión (partículas) de tamaño coloidal, bacterias y virus. En la NF es posible separar elementos y moléculas de tamaño aún menor (sólidos disueltos).

La nanofiltración se lleva a efecto en membranas que tienen poros de diámetro del orden de los 10 a los 100 Å (0.01-0.001 m). En membranas de este diámetro es posible separar del agua material orgánico y sustancias que le imparten color y que son precursoras de la formación de trihalometanos (THM) cuando el agua se desinfecta por cloración

Con el uso de membranas de NF también es posible separar calcio Ca^{+2} y magnesio Mg^{+2} los cuales causan dureza en el agua. Esto es una gran ventaja ya que no se requiere del uso de reactivos químicos, lo cual si es necesario en los sistemas tradicionales de ablandamiento de aguas.

Los iones sodio Na^{+} y cloruro Cl^{-} , son de menor tamaño que los iones calcio y magnesio, por lo que si estos atraviesan la membrana y aparecen en el agua o líquido filtrado.

Ósmosis inversa: Consideremos un sistema tal como el representado en la figura 5. Si tenemos dos soluciones, una de ellas con un contenido alto de sales disueltas (A) y otro con un contenido menor de dichas sales (B), separadas ambas soluciones por medio de una membrana semipermeable (una membrana que permita el paso del líquido, pero no el sólido disuelto), se presentará un fenómeno que se conoce como ósmosis.

La solución de menor contenido de sales disueltas tenderá a difundirse a través de la membrana de separación pasando al comportamiento de solución de alto contenido de sales, para de esta manera tratar de equilibrar la concentración en sales en ambos lados de la cámara del sistema.

Este flujo de la región de menor concentración en sales a la región de mayor contenido de sólidos disueltos se presenta por efecto de una fuerza impulsora que se conoce como presión osmótica. Cuanto mayor sea la diferencia en contenido de sales solubles de las dos secciones, mayor es la presión osmótica ejercida y el equilibrio se establece cuando hay una diferencia de niveles en los compartimentos y esta diferencia de niveles es equivalente a la presión osmótica original.

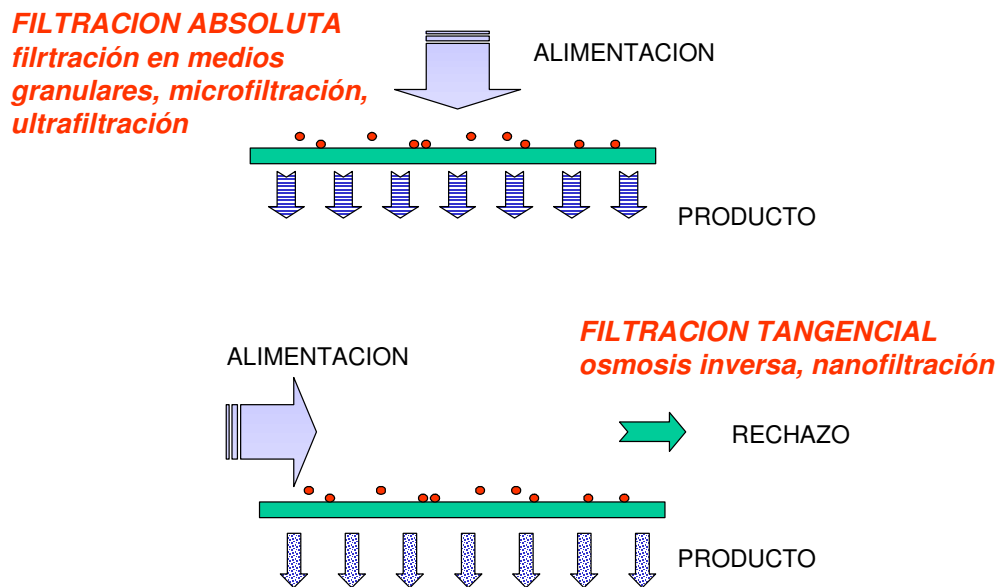


Figura 5: Filtración absoluta y filtración tangencial. En la filtración absoluta, todo el fluido pasa por el filtro. En la filtración tangencial, una parte del flujo sale como filtrado y otra parte del flujo arrastra los componentes a remover y sale como rechazo.

Si del lado B se ejerce una presión (P_{ap} =Presión aplicada) mayor a la presión osmótica natural, ocurrirá un flujo de agua a través de la membrana pasando de la región de menor concentración a una región de mayor concentración en sales. Esto aplicado a aspectos prácticos, significa que es posible producir agua de alta pureza colocando una membrana para separar agua de alto y bajo contenido de sales, y al mismo tiempo ejerciendo una presión lo suficientemente alta para vencer la presión osmótica natural y la resistencia al flujo que ofrece la membrana.

En ósmosis inversa se hace fluir agua a presión a través de una película o membrana produciendo agua de alta pureza en una sección de la membrana y en una segunda sección de la membrana se queda agua con un mayor contenido de sales. Cuanto mayor es la cantidad de sales en la solución concentrada, mayor es la

presión osmótica que se tiene que vencer, por lo que es más conveniente estar purgando continuamente esta agua que acarrea las sales y así se tiene lo que se conoce como rechazo.

9.3 TIPOS DE MEMBRANAS:

Inicialmente se emplearon membranas de acetato de celulosa, pero éstas son degradadas por bacterias por lo que el agua a tratar deberá estar libre de microorganismos y deberán protegerse del medio exterior con biocidas adecuados para proteger las membranas del ataque microbiano.

Además de este inconveniente se tiene una baja producción de agua por unidad de área de las membranas y se requiere de muy altas presiones para la operación del sistema.

La necesidad de tener mayores flujos de agua tratada producida a menores presiones de operación ha conducido a un desarrollo constante de unas nuevas membranas. Uno de los primeros logros en este sentido fue la producción de una membrana mixta a partir de poliamida y polisulfona. A este tipo de membranas se les llama membranas de tipo TFC (Thin Film Composite), que traducido al español podría ser membranas mixtas de capa fina.

Las membranas TFC dan mucho mayores volúmenes de producción a menores presiones aplicadas y con una mejor calidad del agua producida, pero su desventaja es que es susceptible al ataque químico, especialmente por los agentes oxidantes como el cloro, por lo que el agua que se alimenta a un equipo de ósmosis inversa con membranas de este tipo, deberá declorarse completamente o de lo contrario la membrana se daña irreversiblemente.

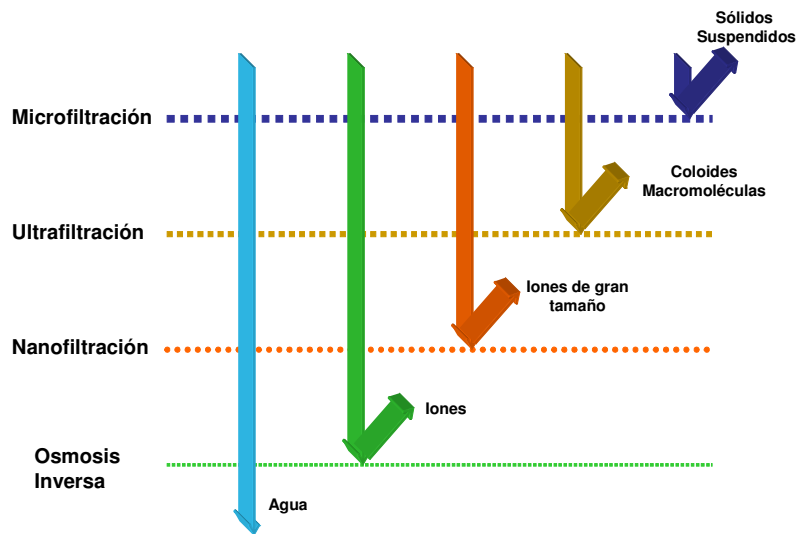


Figura 6: Diferentes tipos de filtración en membrana y componentes que se pueden separar en cada tipo de filtración

9.4 OPERACIÓN DE LA MEMBRANA DE ÓSMOSIS INVERSA:

Existen dos tipos de patrón de flujo en microfiltración (MF), ultrafiltración (UF), nanofiltración (NF) y ósmosis inversa (OI) o hiperfiltración: filtración directa y filtración tangencial. En la filtración directa el fluido pasa en su totalidad a través de la membrana y los sólidos o partículas mayores al diámetro o disposición de poros de la membrana son retenidos en la superficie de la misma. Después del paso de un cierto volumen de agua a través del filtro de membrana la superficie del filtro se colapsa y se satura en sólidos por lo que es necesario lavar este filtro o cambiarlo por un cartucho nuevo. Esto es lo que ocurre en MF, UF; en Nanofiltración y Ósmosis Inversa se emplea un sistema de filtración tangencial.

En este patrón de flujo una parte del líquido pasa a través de la película o membrana y aparecerá en el agua producto, pero otra parte del gasto inicial fluye tangencialmente y arrastra las partículas que quedan en la superficie de la membrana (Figura 6).

Para NF y OI este flujo tangencial es más adecuado ya que la membrana se saturaría rápidamente por los sólidos que se quedan en la superficie. También, de no estarse removiendo continuamente el agua

remanente en una membrana de OI, la presión osmótica se incrementa drásticamente por la saturación de sólidos disueltos en el agua que no pasa por la membrana, y sería necesario aplicar grandes presiones para hacer fluir el agua a través de una membrana.

Por este hecho la Ósmosis Inversa y la Nanofiltración son procesos de filtración en membrana donde se tiene un flujo de entrada o alimentación y dos flujos de salida: uno de ellos es el producto y el otro flujo es el rechazo, El producto es agua con un contenido mínimo de sales disueltas y de una alta pureza, mientras que el rechazo es el subproducto que acarrea consigo las sales disueltas, moléculas y sólidos que no atraviesan la membrana.

Dependiendo de las condiciones de operación de la membrana y del equipo empleado para la ósmosis, se tiene en promedio un 10-30% del flujo de entrada en el producto y un 70-90% del flujo de entrada del rechazo.

Tabla I: Porcentajes de rechazo de diferentes sustancias en una membrana de ósmosis inversa típica.

<i>Sustancia</i>	<i>% de Rechazo</i>	<i>Sustancia</i>	<i>% de Rechazo</i>
Calcio	95-98	Borato	40-70
Sodio	94-98	Fluoruro	93-95
Magnesio	95-98	Polifosfato	98-99
Fierro	97-98	Ortofosfato	98-99
Potasio	94-98	Cromato	90-97
Manganeso	97-98	Bacterias	99+
Aluminio	97-98	Plomo	96-98
Cobre	97-98	Sodio	97-93
Níquel	97-98	Calcio	94-97
Cadmio	95-98	Magnesio	96-98
Plata	95-97	Potasio	87-94
Zinc	97-99	Fierro	95-98
Mercurio	95-97	Magnesio	95-98
Dureza Ca y Mg	95-98	Aluminio	96-99
Radioactividad	95-98	Amonio	86-92
Cloro	90-95	Cobre	98-99
Amonio	85-95	Níquel	98-99
Bromo	93-96	Zinc	98-99
Fosfato	97-98	Estroncio	96-98
Cianuro	90-95	Cadmio	96-98
Sulfato	97-98	Plata	93-98
Tiosulfato	97-98	Mercurio	96-98
Silicato	94-96	Bario	96-98
Silice	85-90	Cromo	96-98
Nitrato	92-95	Plomo	96-98
Boro	60-70	Cloro	87-93

9.5 APLICACIONES:

Una de las características más importantes de los sistemas de ósmosis inversa es la alta eficiencia y selectividad de las membranas en lo referente a la remoción de sólidos en suspensión y de sales disueltas. La Tabla I muestra el porcentaje de rechazo de diferentes iones y partículas en una membrana típica de ósmosis inversa.

Esta gran capacidad de rechazo de contaminantes y concomitantes del agua, ha motivado un desarrollo creciente en los usos de las membranas de ósmosis inversa en diferentes aplicaciones, como por ejemplo:

⇒ En un tratamiento y acondicionamiento de aguas con un alto contenido de sólidos. Si el agua disponible tiene grandes cantidades de sólidos, seguramente las características organolépticas del agua no serán muy agradables al consumidor. Pasando el agua a través de una membrana es posible remover prácticamente todos los sólidos que el agua pueda contener y de esta manera ser consumida como agua potable sin ningún problema.

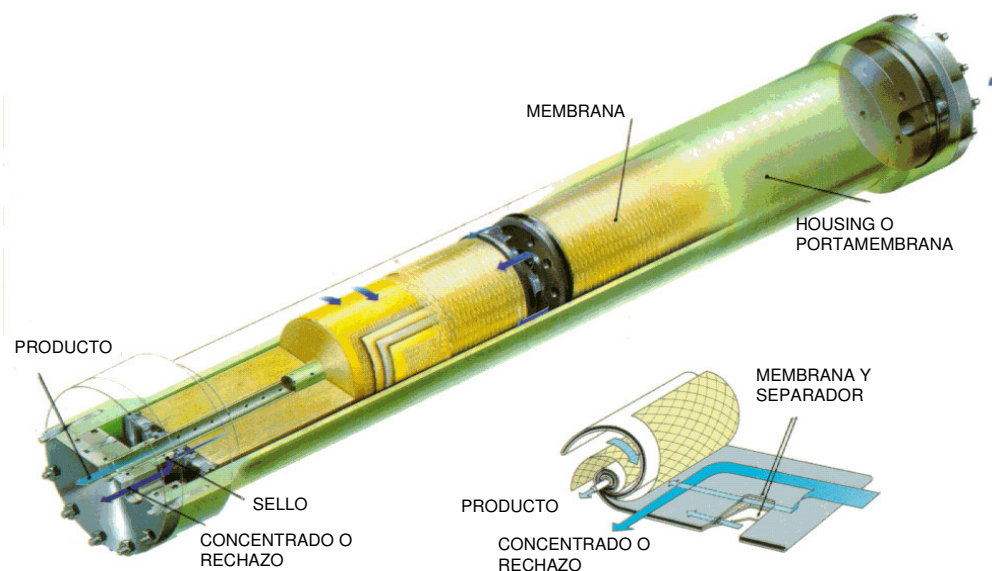


Figura 7: Portamembrana o housing y membrana. Detalles de su operación.

⇒ Si el contenido de sólidos es muy alto, el agua no puede ser empleada directamente en sistemas de enfriamiento por agua, o para aditivo de algún proceso (por ejemplo la elaboración de un producto alimenticio), por lo que es necesaria una disminución en el contenido de sólidos disueltos y la ósmosis inversa es la opción más adecuada.

⇒ Si el agua a consumir tiene algún contaminante, aún en mínimas cantidades, la membrana de ósmosis inversa evita la aparición de tal contaminante en el agua obtenida como producto. Por ejemplo si se sabe que el agua de un pozo contiene cantidades de arsénico mayores al límite máximo recomendado, y no existe otra fuente de abastecimiento, una opción es implementar un sistema de ósmosis inversa para producir agua con características de potable y segura.

⇒ Industrias tales como la farmacéutica, la de producción de microchips para electrónica, la industria de generación de energía nuclear, etc., requieren de agua ultrapura para sus procesos. Por ejemplo en la medicina y la farmacia se requiere de una agua exenta de bacterias y pirógenos. Con el uso de membranas de OI es factible tener agua de estas características.

⇒ La industria de elaboración de componentes electrónicos micro, requiere de un agua completamente libre de sólidos y de impurezas ya que en el lavado de los microchips producidos, la mínima deposición de las sales o sólidos puede arruinar el producto o provocarle fallas posteriores en el equipo electrónico producido con estos componentes.

⇒ En la generación de energía es necesario agua de alta calidad y con cero sólidos para proteger las turbinas y los equipos generadores de energía que están en contacto con el vapor o con el agua.

⇒ En control ambiental también tienen aplicación estas membranas ya que es posible minimizar el volumen de residuos líquidos producidos por membranas NF o de OI.

⇒ En la industria de alimentos las membranas tienen amplio campo de aplicación como una forma de concentrar un producto sólido que no pasa a través de la membrana.

⇒ En biotecnología y medicina también son empleadas con excelentes resultados.

9.6 ASPECTOS PRÁCTICOS DEL USO DE MEMBRANAS:

Las membranas de filtración de partículas, microfiltración y ultrafiltración pueden estar contenidas en recipientes individuales o contenedores que tienen un arreglo para disponer de más de un cartucho de membrana (Figura 8).

Las membranas de NF y de OI, generalmente se encuentran en recipientes individuales donde se acomoda cada membrana, normalmente se dispone en el mercado de membranas de 2,4 y 6" de diámetro por 40" de largo. Este tipo de membranas se encuentran dispuestas en forma de rollo con un tubo colector al centro. El área de filtración es toda la membrana que se encuentra alrededor del tubo, por lo que a mayor diámetro de membrana, mayor área de filtración o de membrana y mayor capacidad de volumen de filtración. Datos típicos de un fabricante son los presentados en la tabla II.

De acuerdo a las necesidades se pueden poner dos, tres, cuatro o más membranas en serie, alimentadas por una bomba en común, para juntar el producto de las diferentes membranas individuales y así satisfacer la demanda de agua requerida (Figura 9).

Una membrana de NF o de OI esta construida de materiales tipo polímero que son susceptibles a diferentes tipos de ataque químico. Los oxidantes fuertes como el cloro causan daños irreversibles en las membranas más comerciales utilizadas que son las de compósitos de poliamida. Los ácidos también causan daños a largo plazo en las membranas por lo que el pH del agua esta limitado a valores de 4-10, o de lo contrario la membrana se daña por reacciones de hidrólisis .

La vida útil de una membrana, que opera en aguas promedio es de 5 a 8 años, pero con el tiempo pierde sus cualidades por lo que ocasionalmente es más conveniente su reposición antes de éste tiempo, sobre todo si la calidad del producto es crítica.

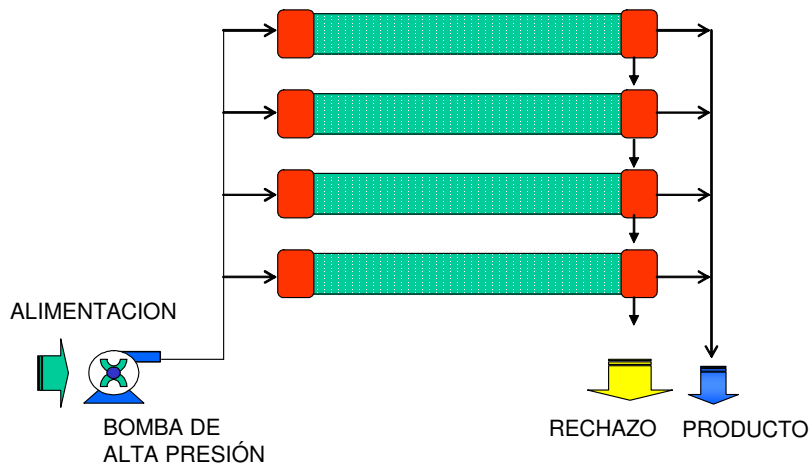


Figura 8: Sistema de membranas dispuestas en serie, alimentadas por una bomba individual con producto y rechazo común.

También la dureza excesiva produce la calcificación de la membrana, por lo que si se permite el depósito de carbonatos de calcio y magnesio, la membrana se daña y se pierde. Para esto es necesario remover en un paso previo el exceso de dureza antes de alimentar el agua a la membrana. Aún y cuando se tenga un paso de ablandamiento previo a la membrana, el flujo de agua producida en ésta disminuye paulatinamente con el tiempo, por lo que es necesario limpiar periódicamente la membrana, para remover los depósitos que se adhieren a la membrana pero que si es posible remover antes de que estos se calcifiquen.

Los depósitos de material orgánico se adhieren a la superficie del polímero y lo pueden hacer en forma irreversible, por lo que también se requiere de un paso previo de filtración de partículas y de MF o UF para remover todos los contaminantes en suspensión que el agua pueda contener, y así proteger la membrana.

Tabla II: Características de membranas comerciales.

DIÁMETRO (PULGADAS)	LARGO (PULGADAS)	PRODUCTO (Gal/día)	EFICIENCIA EN RECHAZO (%)
2.5	40	650	96-98
4.0	14	450	96-98
4.0	21	900	96-98
4.0	40	2000	96-98
8.0	40	12000	96-98

Para vencer la presión osmótica se requiere de la aplicación de altas presiones: Las presiones de operación aumenta a medida que el contenido de sales se incrementa. Por ejemplo: Se requiere de la aplicación de presiones del orden de las 250 lb/in² (psias) para vencer la presión osmótica y producir agua sin sales a partir de aguas superficiales “estándar o normales”. Para lograr obtener agua desmineralizada a partir del agua de mar se requiere de aplicar presiones del orden de las 1000 lb/in².

Para esto se requiere de bombas especiales y se demandan altos consumos de energía. Los esfuerzos en este momento están dedicados a producir membranas que operen eficientemente a bajas presiones (100-150 lb/in²) con altos volúmenes de agua como producto.