

CAPÍTULO VIII - 7. UTILIZACIÓN DE MEMBRANAS Y ALTERNATIVAS PARA LA DESALINIZACIÓN

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN.....	1
2. OPERACIONES DE MEMBRANAS Y TRATAMIENTO DE AGUA.....	2
2.1. CLASIFICACIÓN DE LAS MEMBRANAS Y DE SUS OPERACIONES	4
2.2. BREVE DESCRIPCIÓN DE LAS DIVERSAS OPERACIONES Y DE LAS MEMBRANAS DISPONIBLES	5
2.2.1. Operaciones Disponibles	5
2.2.1.1. Ósmosis Inversa (OI)	5
2.2.1.2. Nanofiltración (NF).....	6
2.2.1.3. Ultrafiltración (UF)	6
2.2.1.4. Microfiltración (MF).....	7
2.2.1.5. Diálisis (DIA).....	7
2.2.1.6. Electrodialisis (ED)	7
2.2.2. Clasificación de las Membranas Utilizadas	8
2.2.2.1. Mecanismo de Separación.....	8
2.2.2.2. Morfología Física	9
2.2.2.3. Geometría	9
2.2.2.4. Naturaleza Química.....	9
2.2.3. Equipamiento.....	11
2.2.4. Configuraciones Utilizadas en los Sistemas de Membranas	14
2.2.4.1. Sistema de Depósito con Bucle Abierto	15
2.2.4.2. Sistema de Depósito con Bucle Cerrado	15
2.2.4.3. Sistema Continuo Mono-Etapa	15
2.2.4.4. Disposición Multietapa con Recirculación	15
2.2.4.5. Definición de Sistemas Multietapa	16
2.2.5. Índices de Ensuciamiento	16
2.2.5.1. Índice de Densidad de Sedimentos (Silt Density Index, SDI).....	16
3. ÓSMOSIS INVERSA Y NANOFILTRACIÓN.....	18

3.1. CONFIGURACIONES DE MEMBRANA UTILIZADAS	18
3.1.1. <i>Módulos de Fibra Fina Hueca (FFH)</i>	19
3.1.2. <i>Módulos Arrollados en Espiral</i>	19
3.2. COMPONENTES DEL SISTEMA Y CONSIDERACIONES DE DISEÑO	20
3.3. AGUA DE ALIMENTACIÓN PARA SISTEMA DE ÓSMOSIS INVERSA	21
3.4. PRETRATAMIENTO	22
3.5. POSTRATAMIENTO	22
3.6. VIDA UTIL DE LAS MEMBRANAS	22
3.7. SISTEMAS DE LIMPIEZA Y RECUPERACIÓN DE LAS MEMBRANAS.....	23
3.8. APLICACIONES DE LOS PROCESOS DE ÓSMOSIS INVERSA Y NANOFILTRACIÓN.....	23
4. ULTRAFILTRACIÓN (UF)	25
4.1. CONFIGURACIONES DE MEMBRANA UTILIZADAS	25
4.1.1. <i>Membranas Capilares</i>	25
4.1.2. <i>Módulos Tubulares</i>	26
4.1.3. <i>Módulos de Arrollamiento en Espiral</i>	26
4.1.4. <i>Módulos de Placa y Bastidor</i>	26
4.2. APLICACIONES DEL PROCESO DE ULTRAFILTRACIÓN.....	27
5. MICROFILTRACIÓN	29
5.1. CONFIGURACIONES DE MÓDULO UTILIZADAS	30
5.1.1. <i>Membranas Capilares de Fibra Hueca</i>	31
5.1.2. <i>Membranas Tubulares</i>	31
5.2. CONFIGURACIÓN DEL PROCESO	31
5.3. PRETRATAMIENTO	33
5.3.1. <i>Prefiltración</i>	33
5.3.2. <i>Ajuste de pH</i>	33
5.3.3. <i>Aplicación de Flotación por Aire Disuelto (DAF)</i>	33
5.4. POSTRATAMIENTO	34
6. ELECTRODIÁLISIS (ED)	35
6.1. PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO	35
6.2. CONFIGURACIÓN DE MEMBRANAS UTILIZADAS.....	37
6.2.1. <i>Componentes de un Módulo</i>	37
6.2.2. <i>Membranas</i>	38
6.2.3. <i>Espaciadores</i>	38
6.2.4. <i>Electrodos</i>	39
6.3. PRETRATAMIENTO	39
6.4. POSTRATAMIENTO	39
7. REACTORES DE ADSORCIÓN CON MEMBRANAS.....	40
7.1. EFECTO DEL TAMAÑO DE LAS PARTÍCULAS.....	41

7.2. DESARROLLOS E INVESTIGACIONES FUTURAS	41
8. TECNOLOGÍAS INNOVADORAS EN EL TRATAMIENTO POR MEMBRANAS	42
8.1. PROCESOS DE CONTACTO EN LA FASE DE MEMBRANA (PCFM) (MEMBRANE PHASE CONTACT PROCESS - MPCPS).....	42
8.2. SISTEMAS COMBINADOS DE REACTORES Y PROCESOS DE MEMBRANA	42
8.3. SISTEMAS INTEGRADOS DE MEMBRANAS	42
8.4. CONSIDERACIONES SOBRE LA CALIDAD DEL AGUA	43
9. BIBLIOGRAFÍA.....	45

LISTA DE ILUSTRACIONES

TABLAS

Tabla 1. Operaciones básicas con membranas en el tratamiento de agua	4
Tabla 2. Comparación de diferentes tipos de módulos	14
Tabla 3. Categorías de sistemas de ósmosis inversa	20
Tabla 4. Datos de calidad de agua requeridos para el diseño de sistemas de ósmosis inversa.....	21
Tabla 5. Ejemplos de aplicación del proceso de ósmosis inversa en la Argentina.....	24
Tabla 6. Ventajas y desventajas de las configuraciones tubular y de fibra hueca para microfiltración	30

FIGURAS

Figura 1. Rangos de separación de procesos.....	3
Figura 2. Esquema de un sistema de ósmosis inversa	6
Figura 3. Esquema de una celda de diálisis por difusión	7
Figura 4. Esquema de una celda de electrodiálisis	8
Figura 5. Módulo de arrollamiento en espiral	11
Figura 6. Módulo de fibra hueca	12
Figura 7. Módulo tubular.....	13
Figura 8. Módulo de placa y bastidor.....	13
Figura 9. Diagrama de un elemento de membrana de fibra fina hueca	19
Figura 10. Diagrama de una membrana de módulo arrollado en espiral	20
Figura 11. Comparación de características constructivas de tres tipos de módulos	27
Figura 12. Varios modos de operación de microfiltración	32
Figura 13. Proceso de electrodiálisis.....	36
Figura 14. Componentes de una batería de electrodiálisis: membrana permeable aniónica (MPA); membrana permeable catiónica (MPC).....	37
Figura 15. Tipos de separadores.....	38

1. INTRODUCCIÓN

El agotamiento de fuentes de agua de abastecimiento, la intrusión salina y la contaminación del agua, producida especialmente por compuestos orgánicos complejos, tales como los contaminantes conocidos en la literatura técnica como prioritarios, han contribuido a la expansión del uso de tecnologías avanzadas de membranas. Estas tecnologías permiten obtener agua potable de calidad superior en forma más eficiente que los sistemas de tratamiento convencionales.

En particular, se ha incrementado el uso de los procesos de membrana en la producción de agua de bebida, en parte por la disminución en cuanto a la disponibilidad de fuentes adecuadas para el suministro de agua potable. Puesto que existe una variedad aceptable de procesos de membrana, es posible satisfacer los requerimientos particulares de calidad de agua cruda y de las aplicaciones del agua tratada.

Estos diferentes procesos pueden clasificarse en parte por la energía requerida para realizar la separación y por la calidad del agua producida.

2. OPERACIONES DE MEMBRANAS Y TRATAMIENTO DE AGUA

El crecimiento de las aplicaciones de la tecnología de membranas ha sido impulsado por fuerzas comerciales y ambientales de gran dinamismo. Los procesos de membrana no requieren generalmente la adición de productos químicos agresivos, pueden desarrollarse a temperatura ambiente, forman una barrera prácticamente absoluta al flujo de contaminantes y son especialmente eficientes, características que los convierten en económicos y ambientalmente atractivos.

La principal fuerza impulsora del desarrollo industrial de las membranas ha sido la desalinización para abastecimiento de agua potable. Desde la década del setenta, se han utilizado los procesos de electrodiálisis (ED) y la ósmosis inversa (OI) en competencia con los procesos de destilación. Al final de la década del ochenta, la nanofiltración (NF) comenzó a despertar interés al ser aplicada para la eliminación de la dureza del agua, y más recientemente para la remoción de los subproductos de la desinfección. Últimamente, se comenzó a implementar el uso de la ultrafiltración (UF) para la remoción de partículas, microorganismos y materia coloidal de los suministros de agua potable.

Dentro de la actividad industrial, la desmineralización por ósmosis inversa ha sido también muy aplicada, especialmente en la industria electrónica, cuyos requerimientos en cuanto a las características físicas y bacteriológicas del agua, se han vuelto muy estrictos. Los últimos desarrollos tecnológicos para el tratamiento del agua potable por membranas se encuentran en etapa de planta piloto o de demostración, y consisten en tratamientos combinados de ultrafiltración/adsorción con carbón activado para la eliminación de microcontaminantes, ultrafiltración/oxidación para eliminar hierro y manganeso, y electrodiálisis o combinación de ultrafiltración/biorreacción para la eliminación de nitratos.

Actualmente, el objetivo último de la aplicación de este tipo de tecnología no es solamente resolver los problemas relacionados con la desalinización, ablandamiento o remoción de microcontaminantes. La meta es más ambiciosa, mediante esta tecnología se busca reemplazar a los procesos de clarificación y desinfección fisicoquímica convencionales, así como también se intenta conseguir la remoción de turbiedad, compuestos orgánicos y precursores de subproductos de desinfección (desinfection by products, DBP's), obteniendo un filtrado de mayor calidad que el que brinda un filtro de arena.

La naturaleza de la alimentación a tratar por el proceso de membrana determinará cual será la mejor membrana para cada aplicación. En la **Figura 1**, se muestran los tipos de membrana utilizados y sus áreas de aplicación, en función del tamaño del contaminante de referencia.

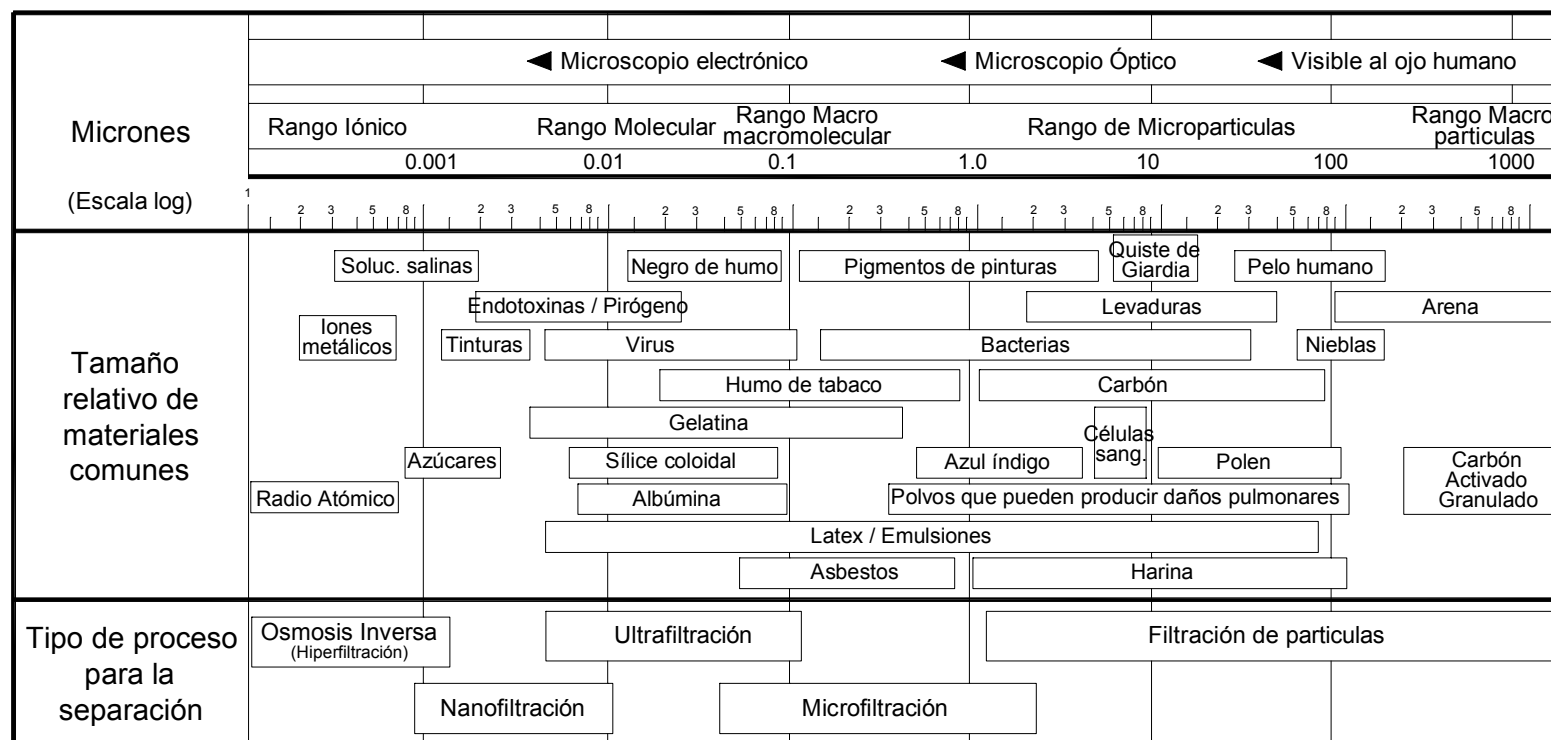


Figura 1. Rangos de separación de procesos

2.1. CLASIFICACIÓN DE LAS MEMBRANAS Y DE SUS OPERACIONES

Una membrana semipermeable puede definirse como una película delgada que separa dos fases y actúa como una barrera selectiva para el transporte de materia, permitiendo el pasaje de agua, iones o moléculas pequeñas a través de ella. Los procesos de separación que se basan en la utilización de membranas, no operan como una filtración convencional. En la mayoría de las aplicaciones, la solución fluye en paralelo a la membrana y la transferencia del soluto o solvente a través de ella tiene lugar por la aplicación de una fuerza impulsora a la solución, como por ejemplo una corriente eléctrica continua (electrodialisis) o presiones elevadas (ósmosis inversa y ultrafiltración).

Las operaciones de membranas 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). Entre las operaciones de separación, la membrana ofrece ventajas básicas:

- La separación se efectúa a temperatura ambiente sin cambio de fase, lo que ofrece una ventaja energética con respecto a la destilación.
- No se necesita la adición de productos químicos como en el caso de la clarificación por sedimentación y filtración convencional, lo cual ofrece una ventaja respecto de la calidad del producto y deja menos residuos contaminantes.
- La separación se produce sin la acumulación de productos dentro de la membrana, por lo cual funcionan continuamente sin un ciclo de regeneración tal como ocurre con las operaciones de intercambio iónico de resinas.

En la **Tabla 1**, que se presenta a continuación se observa una clasificación general de las operaciones de membrana considerando algunos parámetros característicos:

- Fuerza impulsora
- Mecanismo de separación
- Tamaño de las partículas retenidas
- Estructura de la membrana

Operación	Fuerza impulsora	Mecanismo de separación	Diámetro de las partículas separadas	Tamaño de poro	Estructura de la membrana
Microfiltración	Presión	Cribado	0,1 μm	> 50 nm	Macroporos
Ultrafiltración	Presión	Cribado	0,01 μm	2 – 50 nm	Mesoporos
Nanofiltración	Presión	Cribado + (solución/difusión + exclusión)	0,001 μm	< 2 nm	Microporos
Ósmosis Inversa	Presión	Solución/difusión + exclusión	0,0001 μm		Densa
Díalisis	Actividad	Difusión		>50 nm	Mesoporos
Electrodialisis	Potencial eléctrico	Intercambio iónico	0,0004 μm		Intercambio iónico

Fuente: AWWA (1998)

Tabla 1. Operaciones básicas con membranas en el tratamiento de agua

Casi todos los solutos contenidos en el agua potable pueden clasificarse en tres rangos de tamaño: un rango iónico desde $0,0001\ \mu\text{m}$ a $0,01\ \mu\text{m}$, un rango macromolecular desde $0,01\ \mu\text{m}$ a $1\ \mu\text{m}$ y un rango de partícula fina desde 1 a $100\ \mu\text{m}$. Estas divisiones no son exactas, pero son útiles para relacionar aplicaciones de membranas para tratamientos de agua potable. La eliminación de turbiedad o especies biológicas que se requiere para la desinfección puede realizarse por un proceso de membrana accionado por presión, pero es más económico por UF y MF cubriendo rangos de tamaño de aproximadamente $0,003$ a $10\ \mu\text{m}$ y de $0,04$ a $20\ \mu\text{m}$, respectivamente. La OI y la NF retienen los mismos organismos patógenos además de los iones y macromoléculas de aproximadamente $0,0005$ a $0,006\ \mu\text{m}$ y de $0,0007$ a $0,01\ \mu\text{m}$, respectivamente.

2.2. BREVE DESCRIPCIÓN DE LAS DIVERSAS OPERACIONES Y DE LAS MEMBRANAS DISPONIBLES

2.2.1. Operaciones Disponibles

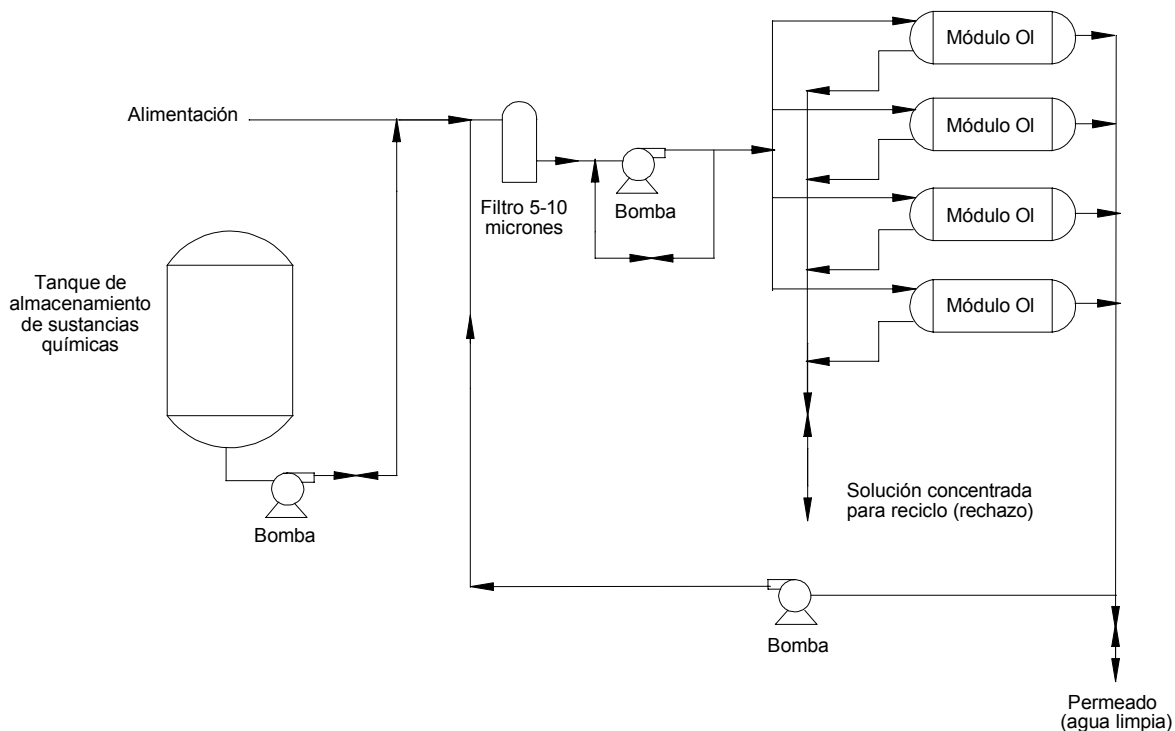
2.2.1.1. Ósmosis Inversa (OI)

La ósmosis es un fenómeno habitual en la naturaleza y consiste en el transporte por difusión de un solvente, como por ejemplo el agua, a través de una membrana semipermeable. Puede definirse como membrana semipermeable a una película delgada que separa dos fases y actúa como una barrera selectiva para el transporte de materia, permitiendo el pasaje de agua, iones o moléculas pequeñas a través de ella. En este fenómeno, la fuerza impulsora que provoca el movimiento del agua es el gradiente de concentración de soluto, el cual presenta un sentido inverso al del flujo de agua, es decir que el agua se mueve hacia el lado de la membrana donde se encuentra la solución concentrada.

El proceso de pasaje de solvente a través de la membrana continúa hasta que se alcanza el equilibrio osmótico por incremento de la presión del lado de la solución salina, el cual se observa a simple vista por el aumento del nivel de líquido en el lado de la membrana donde se aloja la solución concentrada. Al alcanzar el equilibrio osmótico, el pasaje de solvente se detiene. Si ahora se aplica una presión importante del lado de la solución salina, del orden de $1000\ \text{kPa}$, tendrá lugar el pasaje de agua a través de la membrana desde la solución concentrada hasta la solución diluida. Este fenómeno se denomina ósmosis inversa (OI).

Por lo tanto, la ósmosis inversa es un proceso que consiste en la aplicación de una presión, cuyo valor está por encima de la presión osmótica de la solución salina, a una solución concentrada, de tal modo que se fuerza el pasaje del solvente a través de una membrana semipermeable, capaz de retener sales y solutos de bajo peso molecular. La ósmosis inversa es capaz de rechazar contaminantes o partículas, con diámetros del orden de los $0,0001\ \mu\text{m}$, por lo cual puede lograrse la remoción de sales, dureza, patógenos, turbiedad, retención de subproductos de la desinfección y precursores de trihalometanos (THMs), compuestos orgánicos sintéticos, plaguicidas y la mayoría de los contaminantes más comúnmente encontrados en el agua potable.

En la **Figura 2** se muestra un esquema sencillo para ilustrar el proceso de ósmosis inversa.



Fuente: EPA/625/R-96/009 (1996)

Figura 2. Esquema de un sistema de ósmosis inversa

2.2.1.2. Nanofiltración (NF)

La nanofiltración es un proceso de membranas que opera con presiones de trabajo inferiores a la ósmosis inversa, normalmente entre 0,5 a 1,5 MPa. Este proceso también se conoce como ósmosis inversa de baja presión y se emplea para el ablandamiento de aguas mediante la eliminación de iones polivalentes tales como calcio y magnesio. En la actualidad, también se aplica con éxito en la remoción de materia orgánica. Con este proceso de separación, los iones monovalentes son rechazados en forma débil por la membrana, y se registran presiones de trabajo menores que para el caso de la ósmosis inversa. La nanofiltración es capaz de rechazar moléculas con un diámetro de $0,001 \mu\text{m}$, con lo cual es posible retener una gran cantidad de contaminantes, al igual que con la ósmosis inversa.

2.2.1.3. Ultrafiltración (UF)

Cuando se aplica al tratamiento de aguas, la ultrafiltración puede emplearse para reemplazar a la clarificación y la desinfección. Estas membranas son porosas y rechazan únicamente solutos de elevado peso molecular (macromoléculas) además de todo tipo de microorganismos, tales como virus y bacterias. La presión de trabajo se ubica en el rango de 50 a 500 kPa, en forma similar al caso de la nanofiltración.

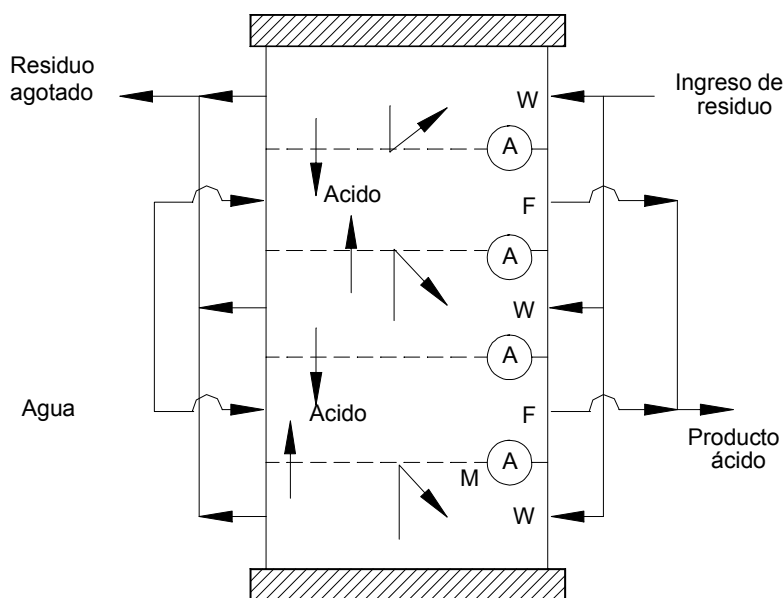
2.2.1.4. Microfiltración (MF)

Aumentando el tamaño de poro de la membrana respecto de la ultrafiltración a un valor típico de $0,1 \mu\text{m}$ se obtiene el proceso de microfiltración. La aplicación básica de este tipo de operación es la remoción de partículas, siendo la presión de trabajo similar a la utilizada en la ultrafiltración.

2.2.1.5. Diálisis (DIA)

En el sistema de separación por diálisis la fuerza impulsora consiste en una diferencia de concentración a través de la membrana semipermeable. De este modo, se produce el paso selectivo de los iones y de las sustancias de bajo peso molecular a través de la membrana y quedan retenidos los solutos coloidales mayores y de gran peso molecular.

En la **Figura 3** se puede observar una celda de diálisis por difusión.



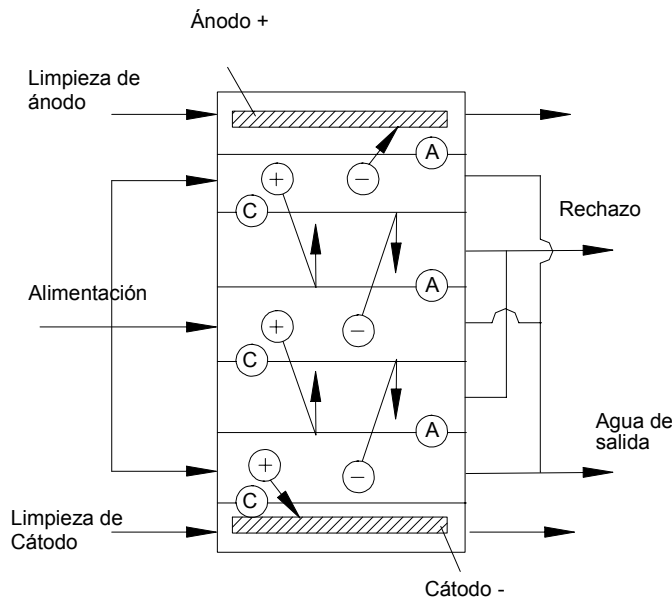
Fuente: EPA/625/R-94/004

Figura 3. Esquema de una celda de diálisis por difusión

2.2.1.6. Electrodialisis (ED)

En la electrodialisis los iones se movilizan debido al efecto de una diferencia de potencial eléctrico a través de la membrana selectiva. La producción de agua potable a partir de aguas con elevada concentración de sales constituye una de las aplicaciones más importante a gran escala de este tipo de tecnología. Otro ejemplo reciente relacionado con el uso de la electrodialisis, tiene que ver con la instalación de la primera unidad de remoción de nitratos de una fuente de agua subterránea en Italia (AWWA, 1998).

En la **Figura 4** se puede observar un esquema de una celda de electrodiálisis.



Fuente: EPA/625/R-94/004

Figura 4. Esquema de una celda de electrodiálisis

2.2.2. Clasificación de las Membranas Utilizadas

Los criterios más utilizados para la clasificación de membranas son: su mecanismo de separación, la morfología física y su naturaleza química.

2.2.2.1. Mecanismo de Separación

Tomando en cuenta el mecanismo de separación se pueden distinguir tres clases principales de membranas:

Membranas porosas

En este tipo de membranas el mecanismo de separación predominante consiste en la diferencia de tamaño entre el poro y la partícula a retener (efecto de tamiz). Según la IUPAC la definición de tamaño de poros adoptada es la siguiente:

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

Dentro de este grupo se encuentran las membranas que permiten efectuar microfiltración (macroporos), ultrafiltración (mesoporos), nanofiltración (microporos) y diálisis (mesoporos).

Membranas no porosas

Para este tipo de membranas, el mecanismo de separación consiste en la difusión de especies en el volumen libre presente entre las cadenas macromoleculares del material de la membrana. Las membranas de ósmosis inversa, por ejemplo, se encuentran dentro de esta clasificación.

Membranas de intercambio iónico

Estas membranas están constituidas por geles portadores de cargas negativas (catiónica) y positivas (aniónica), y representan un tipo especial de membranas no porosas.

2.2.2.2. Morfología Física

Los procesos de membrana se introdujeron en la actividad industrial a partir del desarrollo de las llamadas membranas anisotrópicas, constituidas por una película muy fina, la cual se halla colocada sobre otra capa espesa y porosa. Como es lógico, la estructura de la primera capa es la que regula el flujo de agua a través de la membrana y su selectividad. Por ello puede decirse que la primera capa es responsable de las funciones principales de la membrana. En general, posee un espesor comprendido entre los 0,1 y 0,5 μm , lo cual corresponde al 1% del espesor de la capa porosa subyacente. Se pueden encontrar dos tipos de membranas anisotrópicas: las asimétricas, preparadas utilizando un mismo material y las mixtas o compuestas, donde ambas capas están constituidas por materiales diferentes.

2.2.2.3. Geometría

Las membranas más usadas son de tipo cilíndrico, las que a su vez se subdividen en dos clases:

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

Las membranas tubulares de fibra hueca son las más pequeñas disponibles y se pueden encontrar con diámetros exteriores comprendidos en el rango de 80 a 500 μm . Este tipo de membranas se utiliza en ósmosis inversa, mientras que las membranas capilares, con diámetros mayores, se utilizan en ultrafiltración y microfiltración. También pueden encontrarse membranas de tipo plano.

2.2.2.4. Naturaleza Química

Los materiales a partir de los cuales se fabrican las membranas sintéticas incluyen: compuestos orgánicos (polímeros) o inorgánicos (metales, cerámica, vidrio).

Membranas construidas a partir de compuestos orgánicos

Los materiales más comúnmente empleados en la fabricación de las membranas son la celulosa y sus derivados, tales como el acetato de celulosa (AC) y el triacetato de celulosa (TAC). Estas membranas son generalmente más baratas y pueden tolerar

algunos compuestos de cloro (generalmente menos de 1,0 mg/L como cloro libre en la alimentación), aunque presentan ciertas desventajas. Las membranas de acetato de celulosa son susceptibles de hidrólisis por ataque biológico, lo cual lleva a la transformación del acetato de celulosa en celulosa, y luego, debido a la reacción con agua forman celulosa y ácido acético. Esta reacción tiene una velocidad mayor a valores de pH muy altos o muy bajos, con lo cual se limita su aplicación a condiciones de pH comprendidas entre 4 y 7. La velocidad de hidrólisis se acelera con el aumento de la temperatura del agua de alimentación y también cuando el pH se aleja del rango óptimo de 5 a 6, por lo cual muchas veces es necesario mantener este valor pretratando la corriente de agua con ácido.

Las poliamidas (PA) constituyen otro tipo de material que se emplea para la fabricación de membranas poliméricas, por ejemplo las poliamidas aromáticas, polieteramidas, polieteraminas y polieterurea. Las membranas de capa fina compuestas pueden fabricarse a partir de una amplia variedad de polímeros y consisten en varios materiales distintos: la capa fina y otras capas funcionales en la membrana. Las membranas de poliamidas y capa fina compuesta están sujetas a la degradación si se exponen a cloro u otro tipo de oxidante, sin embargo, no son susceptible del ataque biológico y resisten la hidrólisis, al mismo tiempo que ofrecen buena resistencia a la compactación y a la presencia de ácidos y bases fuertes, soportando además rangos de temperatura amplios.

El politetrafluoretileno (PTFE), polifluoruro de vinilideno (PVDF), polietileno (PE), policarbonato (PC) o isopolipropileno (PP) se emplean con frecuencia para la manufactura de membranas macroporosas particularmente por su excelente estabilidad química y térmica. Por otra parte, las membranas de isopropileno (PP) se utilizan principalmente en el tratamiento de agua, en donde se las emplea como membrana de microfiltración, aunque presentan ciertas limitaciones por su sensibilidad al cloro.

Membranas elaboradas a partir de compuestos inorgánicos

Este tipo de membranas suele tener su principal aplicación en la industria química, en donde se las utiliza para el tratamiento de corrientes con temperatura elevada o bien para fluidos agresivos. Otra aplicación importante se da en industrias donde se requiere aplicar esterilización térmica, como por ejemplo la farmacéutica y la industria láctea. Las principales ventajas que presentan los compuestos inorgánicos son su mayor estabilidad química, mecánica y térmica en comparación con los polímeros orgánicos. Sin embargo, también presentan desventajas, como por ejemplo su mayor fragilidad y costo respecto de los materiales orgánicos. Las membranas inorgánicas más conocidas están constituidas por óxidos, nitruros o carburos de metales, tales como aluminio, circonio o titanio.

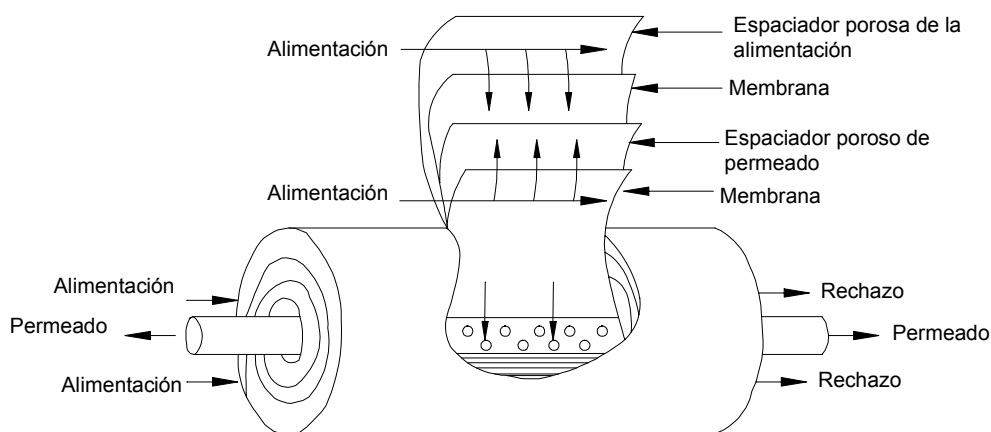
Dado que las propiedades de las membranas están directamente relacionadas con las propiedades de los materiales, es posible introducir un catalizador o cualquier otro compuesto químico dentro de la capa activa de la membrana que permita mejorar la interacción de la misma con componentes químicos específicos presentes en la alimentación. Así por ejemplo, en el tratamiento de gases, se han introducido cristales de zeolita para separar hidrocarburos. Es por ello, que en la actualidad, las investigaciones se orientan a la determinación de procedimientos que permitan sintetizar membranas inorgánicas con selectividad específica.

2.2.3. Equipamiento

El principal elemento del equipamiento que constituye al sistema de tratamiento de agua por membranas está constituido por el módulo que las incluye. Tomando como referencia a la **Figura 2**, se puede definir al módulo de ósmosis inversa como el alojamiento que contiene a las membranas, y otro tipo de elementos como las estructuras de soporte, puntos de entrada de alimentación, salida de rechazo y extracción de permeado. Las membranas generalmente se fabrican utilizando cuatro tipos de configuraciones: arrollamiento espiral, fibra hueca, tubular y placa y bastidor.

La membrana de tipo arrollamiento espiral está constituida por dos láminas lisas separadas por un soporte poroso o placa de refuerzo sellada sobre tres lados para formar una envoltura. El cuarto lado se fija con un adhesivo a un tubo de plástico perforado que recoge el agua de salida. Generalmente se ensamblan dos o más “sándwichs” de este tipo, separándose unos de otros por un elemento espaciador, que puede ser una malla o bien un separador corrugado. La alimentación fluye contra un extremo del espiral y a lo largo de un lado del “sándwich” de membranas.

Las capas soporte se diseñan a fin de minimizar la pérdida de carga y permitir una densidad de empaque elevada. En algunos casos, los proveedores diseñan este tipo de módulos para favorecer la generación de turbulencia y de este modo, incrementar la transferencia de masa a través de la membrana. Además, de este modo se produce el paso de flujo ininterrumpido a fin de disminuir el efecto de ensuciamiento de la membrana. Es muy común encontrar módulos de espirales múltiples conectados en serie en recipientes de fibra de vidrio. Este tipo de sistemas es muy sensible a la obstrucción y no puede utilizarse con agua turbia sin algún tipo de pretratamiento. En la **Figura 5** se representa un esquema de este tipo de módulo de membrana.

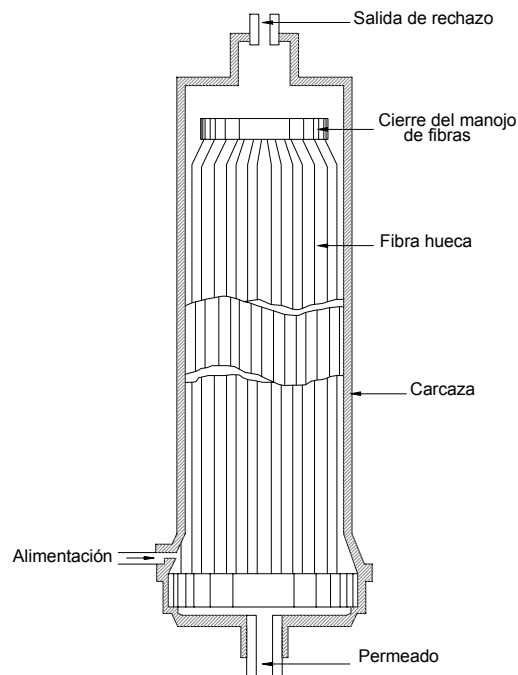


Fuente: EPA/625/R-96/009 (1996)

Figura 5. Módulo de arrollamiento en espiral

Un módulo de fibra hueca está constituido por un haz o paquete compacto de miles de fibras de diámetro muy pequeño, alineadas longitudinalmente y circundando el centro de distribución del agua de alimentación. Cada fibra se coloca en la forma de una U en el

paquete y ambos extremos se encapsulan en una capa del tubo de resina epoxi. El haz está metido en una sobrecapa que se instala en un recipiente a presión construido en fibra de vidrio o acero revestido con epoxi. El permeado fluye hacia el interior de la fibra bajando a lo largo de la misma hasta que el agua producto alcanza el cabezal. La **Figura 6** presenta un esquema de módulos de fibra hueca.



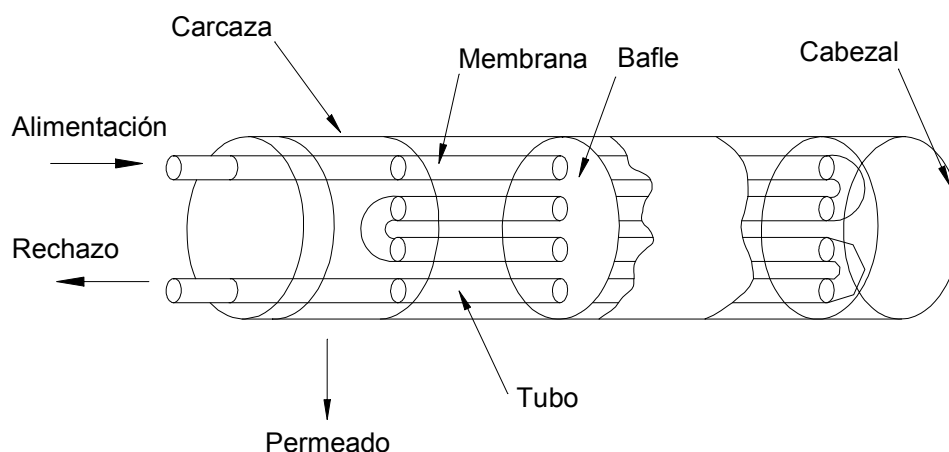
Fuente: EPA/625/R-96/009 (1996)

Figura 6. Módulo de fibra hueca

Una membrana tubular consiste básicamente en una membrana colocada en un tubo poroso. El agua de alimentación ingresa a presión y atraviesa la membrana saliendo a través del tubo poroso. Debido a su costo, esta configuración no se utiliza en sistemas de tratamiento de agua potable cuando las poblaciones a servir son grandes, sin embargo, puede encontrársela en la industria. Una de las principales ventajas que ofrece esta configuración es que no necesita una prefiltración fina de la alimentación y además es de fácil limpieza, ya que el operador puede mantener el servicio y la limpieza de los canales de permeado para removiendo con facilidad las capas obturadas. Entre las desventajas de este tipo de membranas se encuentran: su elevado requerimiento energético para el bombeo de grandes volúmenes de agua, su costo de inversión significativo y la relativamente baja superficie de membrana por unidad de volumen de módulo. En la **Figura 7** se puede ver un módulo tubular.

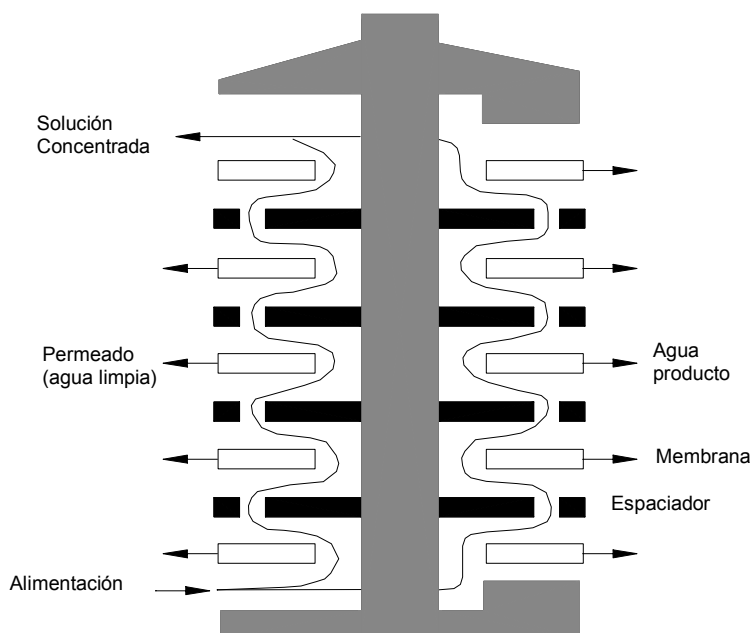
Las membranas del tipo placa y bastidor son membranas colocadas entre dos capas que pueden ser circulares o cuadradas y cuyo diseño se deriva de los filtros prensa. Su disposición hace posible conectar las unidades de modo que la circulación del agua a tratar tenga lugar en paralelo o en serie. De este modo pueden formarse grandes conjuntos unitarios con una superficie de hasta 100 m². El agua de alimentación fluye a lo largo de las láminas y de una capa a la siguiente. El tipo de montaje permite el

mantenimiento de este tipo de módulos, ofreciendo una recuperación elevada en función de la longitud que presentan los canales de alimentación. Por esta razón, este tipo de módulos es adecuado para el tratamiento de aguas que puedan causar problemas de ensuciamiento y hasta obturación. En forma similar a las membranas tubulares, este tipo de configuración generalmente no se utiliza en sistemas de tratamiento de abastecimiento de agua a poblaciones. En la **Figura 8** se representa un esquema del módulo de placa y bastidor.



Fuente: EPA/625/R-96/009 (1996)

Figura 7. Módulo tubular



Fuente: EPA/625/R-96/009 (1996)

Figura 8. Módulo de placa y bastidor

La **Tabla 2** resume las ventajas de los diferentes tipos de módulos, de acuerdo con varios criterios:

Criterios	Placa y bastidor	Arrollamiento espiral	Tubular	Fibra hueca	
				Fibra (OI)	Capilar (UF/MF)
Densidad compacta	+	++	-	+++	+++
Facilidad de limpieza					
• In situ	+	-	++	-	-
• De barrido	-	-	-(1)	-	+++
Costo del módulo	+	+++	-	+++	+++
Caída de presión	-	++	+++	++	++
Volumen extraído	+	+	-	+++	++
Calidad pretratamiento	+	-	+++	-	++

Fuente: AWWA (1998)

Referencias: - Clara desventaja.

+++ Clara ventaja

(1) Con la excepción de ciertos módulos cerámicos, donde la capa que forma la membrana está químicamente limitada por su soporte

Tabla 2. Comparación de diferentes tipos de módulos

La eficiencia de las membranas se deteriora con el paso del tiempo, a medida que se van produciendo la compactación y el ensuciamiento. La compactación de membranas, se conoce también como “declinación del caudal”, y es un fenómeno similar al deslizamiento (creep) que ocurre en los metales y plásticos bajo condiciones de fuerzas de compresión. Como es lógico, la velocidad con que se produce la compactación aumenta cuando la presión aplicada y la temperatura del agua de alimentación son mayores. Este fenómeno ocurre en mayor proporción en el primer año de operación y, en general, es irreversible. Las membranas disponibles en el mercado operaran usualmente en el rango de temperatura dado por los 21 a 35 °C, observándose que a medida que aumenta la temperatura de operación dentro de este rango, el valor de caudal es mayor, principalmente debido a su menor viscosidad.

El ensuciamiento de la membrana ocurre por incrustación, deposición coloidal, y la presencia de sedimentos en el agua de alimentación, óxidos metálicos, compuestos orgánicos y silicio entre otros constituyentes. Ocasionalmente, puede requerirse de una etapa de pretratamiento que contenga todos los sistemas de filtración necesarios para la remoción de partículas, así como del agregado de sustancias químicas, a fin de evitar el ensuciamiento prematuro y su hidrólisis, contribuyendo en definitiva a la extensión de la vida útil de la membrana. La utilización de exceso de oxidantes en el sistema de agua, tales como ozono o permanganato debe consultarse con el fabricante de la membrana para asegurarse del nivel máximo permitido.

2.2.4. Configuraciones Utilizadas en los Sistemas de Membranas

Las configuraciones más utilizadas en los sistemas de membranas son la interconexión de módulos en serie o en paralelo, pudiendo realizarse varias combinaciones. Sin

embargo, los cuatro esquemas que se desarrollan a continuación son los que se aplican con mayor frecuencia:

2.2.4.1. Sistema de Depósito con Bucle Abierto

En este sistema, el líquido a tratar está contenido en un depósito y se recircula constantemente. El permeado sale del circuito de recirculación a través de las membranas de ósmosis inversa mientras que el líquido retenido se retorna al depósito. El sistema de bucle abierto está constituido por un depósito de alimentación, una bomba de recirculación, una serie de módulos y una válvula colocada en la línea de retención, cuya función es regular la presión sobre las membranas. A medida que se va retirando la corriente de permeado, su caudal va disminuyendo y la concentración en el depósito aumenta. Este sistema suele utilizarse para tratar volúmenes reducidos en vista de que el costo de la inversión es menor que para otros tipos de operación, sin embargo una de las desventajas que presenta el sistema es su elevado consumo de energía.

2.2.4.2. Sistema de Depósito con Bucle Cerrado

Este sistema es similar al anterior, pero incorpora una bomba adicional de alimentación forzada que se ubica entre el depósito y la bomba de recirculación. La ventaja de esta configuración sobre la de bucle abierto, es que se consigue un ahorro en la energía utilizada para la circulación del agua tratada. Esta ganancia se hace mayor a medida que aumenta la presión de salida. Generalmente, el sistema de bucle abierto se prefiere cuando los caudales a tratar son mayores de 200 a 300 L/día.

2.2.4.3. Sistema Continuo Mono-Etapa

Cuando se necesita producir agua tratada en forma continua, el depósito de alimentación no resulta necesario, ya que el permeado y el rechazo salen de la unidad constantemente. Por ello, el sistema continuo mono-etapa presenta un esquema parecido al de bucle cerrado pero carece de depósito de alimentación. La válvula ubicada en la línea de salida de rechazo regula su caudal y por lo tanto, la proporción de conversión que tiene lugar en la unidad. Por ejemplo, si el caudal de entrada al sistema es de 10 m³/h y el caudal de rechazo es de 1 m³/h, la conversión de la unidad es del 90%. En este caso, el sistema opera con una elevada concentración en el bucle y, el caudal resultante de permeado es bajo. Esta configuración combinada con un sistema de barrido puede utilizarse con módulos de UF o MF de fibra hueca cuando el objetivo es lograr la clarificación del agua.

2.2.4.4. Disposición Multietapa con Recirculación

El sistema de multietapa con recirculación se utiliza habitualmente en instalaciones de UF o MF de gran porte, en donde la corriente de rechazo de cada etapa sirve de alimentación para la siguiente. De acuerdo al nivel de conversión que se desee lograr, se instala el número de módulos en paralelo, en donde sólo la última etapa trabaja con alta conversión.

2.2.4.5. Definición de Sistemas Multietapa

En vista de que los procesos de membrana se encuentran en una fase inicial y que no se dispone de información suficiente para la determinación de parámetros de diseño y operativos, es necesaria la implementación de sistemas piloto y de evaluación in situ tendientes a la obtención de los mismos. El proceso de escalonamiento, conocido también como configuración multietapa, cascada, piramidal o progresiva, se aplica habitualmente para maximizar la recuperación de agua, utilizando la corriente de rechazo que proviene de una etapa previa como alimentación para la siguiente, hasta que la sobresaturación de sales impide más etapas. Este esquema se aplica en sistemas de ósmosis inversa, nanofiltración y electrodiálisis para aguas de alimentación con elevado contenido de sólidos disueltos totales, o bien para conseguir un mayor rechazo de sal que con una etapa única.

Los procesos piloto que buscan la desalinización de corrientes concentradas, para el caso en que se aplique ósmosis inversa, nanofiltración y electrodiálisis, requieren que los módulos de membrana se ubiquen en forma escalonada, dispuestos de una forma que permita obtener la minimización de los costos operativos y de inversión, produciendo el volumen y calidad de agua requeridos. Una vez ajustado el escalonamiento y configuración para el sistema piloto deberán adecuarse las condiciones al proceso de escala real, para lo cual será recomendable la utilización de elementos de menor tamaño para los procesos a presión aunque dispuestos en el mismo número de etapas hidráulicas y eléctricas que la instalación propuesta.

En el caso de ultrafiltración y microfiltración, suele utilizarse una configuración de un módulo o de módulos paralelos, aunque para el caso de sistemas piloto, se recomienda la utilización de al menos tres módulos en paralelo para verificar el cumplimiento de los criterios estadísticos de comportamiento de los módulos.

2.2.5. Índices de Ensuciamiento

Una consideración de vital importancia que debe tenerse en cuenta a la hora del diseño y operación de los sistemas de membrana es el ensuciamiento de las mismas, que afecta a una serie de aspectos, tales como los requerimientos de pretratamiento, frecuencia de limpieza, condiciones de operación, costo y rendimiento. Dentro de los índices de ensuciamiento, el más utilizado es el Índice de densidad de sedimentos SDI (del inglés Silt Density Index).

Los índices de ensuciamiento se determinan a partir de pruebas simples, generalmente utilizando un filtro del tipo Millipore de 0,45 μm de tamaño de poro, con un diámetro interno de 47 mm, presión de trabajo de 207 KPa (30 psi), siendo el tiempo total requerido para completar las pruebas entre 15 minutos y 2 horas, dependiendo del ensuciamiento.

2.2.5.1. Índice de Densidad de Sedimentos (Silt Density Index, SDI)

La tendencia del agua cruda a ensuciar la membrana puede comprobarse con facilidad, a través de una prueba empírica de filtrabilidad, que indica el Índice de densidad de sedimentos (del inglés silt density index, SDI). Las normas ASTM para este ensayo (D4185) se aplican utilizando una membrana de 0,45 μm y 47 mm de diámetro a una

presión de 207 kPa (30 psi), en una cámara de filtración de fondo cerrado. El índice se calcula tomando en cuenta el tiempo necesario para obtener dos muestras filtradas de un volumen determinado (normalmente 500 mL), a través de la membrana. La primera muestra se obtiene cuando la membrana está limpia, de allí surge el tiempo inicial (t_i) necesario para filtrar 500 mL de agua cruda. Luego de un tiempo de filtración, que puede ser de 15 minutos o menor, según sea el nivel de sedimentos que contenga la muestra, se mide el tiempo final (t_f) que corresponde al requerido para filtrar el mismo volumen de muestra (500 mL). El tercer valor necesario para el cálculo es el tiempo de duración total del ensayo (t). El SDI se puede calcular entonces a través de la siguiente expresión:

$$SDI = \frac{100 \cdot (1 - t_i / t_f)}{t}$$

Donde:

t_i = tiempo necesario para filtrar un volumen determinado (normalmente 500 mL) de agua cruda, a través de la membrana limpia, (segundos).

t_f = tiempo necesario para filtrar el mismo volumen de agua cruda a través de la misma membrana que ha sido usada por un tiempo determinado, (segundos).

t = tiempo total de la prueba.

El SDI es un indicador cualitativo útil de la necesidad de pretratamiento y tratabilidad del agua de alimentación. Sin embargo este índice es inadecuado para evaluar el rendimiento de las membranas con fines de diseño o control. Dentro de las limitaciones del ensayo se encuentra su incapacidad de evaluar muchas de las interacciones que tienen lugar en la práctica entre el agua de alimentación y la membrana. Además, las características del rechazo y la mecánica de fluidos de la cámara de prueba difieren sustancialmente de las unidades reales que operan con membranas, por lo cual se requiere de estudios piloto y el conocimiento de los principios que rigen el transporte de masa y de la disminución del caudal permeado, con el fin de confirmar la tratabilidad de un agua de alimentación dada.

Como referencia se puede indicar que el SDI de la alimentación a un sistema de ósmosis inversa debería ser inferior a 2 a fin de minimizar el efecto de ensuciamiento coloidal; sin embargo generalmente las técnicas de clarificación convencional (coagulación/floculación, sedimentación, filtración) aplicadas a aguas superficiales producen aguas con valores de SDI superiores. Cuando se desea pasar a valores de SDI inferiores a 2 puede recurrirse a materiales finos como por ejemplo las tierras diatomeas. La operación exterior de ósmosis inversa en membranas de fibra hueca así como arrolladas en espiral puede admitir valores superiores de SDI, en el orden de 3 a 5.

3. ÓSMOSIS INVERSA Y NANOFILTRACIÓN

La ósmosis inversa (OI) y la nanofiltración (NF) son los procesos de membrana más utilizados en el tratamiento de agua potable. A través de la OI se pueden retener partículas de contaminantes con diámetros del orden de los $0,0001 \mu\text{m}$, mientras que la NF permite separar contaminantes tan pequeños como $0,001 \mu\text{m}$. En ambas tecnologías la transferencia de iones a través de las membranas está controlada por procesos de difusión, por lo cual se puede conseguir la remoción de sales, dureza, patógenos, turbiedad, compuestos orgánicos sintéticos, pesticidas y la mayoría de los contaminantes del agua potable. Estas tecnologías también permiten controlar a ciertas sustancias precursoras de subproductos de la desinfección, los cuales provienen de la reacción entre la materia orgánica natural del agua y los agentes oxidantes utilizados en el proceso de desinfección, como por ejemplo el cloro. En particular, la OI ha sido efectiva para la eliminación de ciertos pesticidas, aunque se necesita desarrollar estudios pilotos para fuentes de agua específicas, antes de establecer criterios de tratamiento.

La OI y la NF también se aplican para la remoción de otro tipo de contaminantes tales como turbiedad, dureza y color, al mismo tiempo que se ha demostrado su capacidad para la retención de virus, bacterias, quistes y otros organismos patógenos. Sin embargo, la UF y la MF son procesos de membrana más baratos y pueden alcanzar el mismo grado de rechazo de patógenos, por lo cual esta última aplicación no es utilizada con frecuencia. Por otra parte, se ha verificado que en ocasiones las bacterias pasan a través de defectos en las membranas, por lo cual un proceso de desinfección es más efectivo que las membranas para lograr el control bacteriológico.

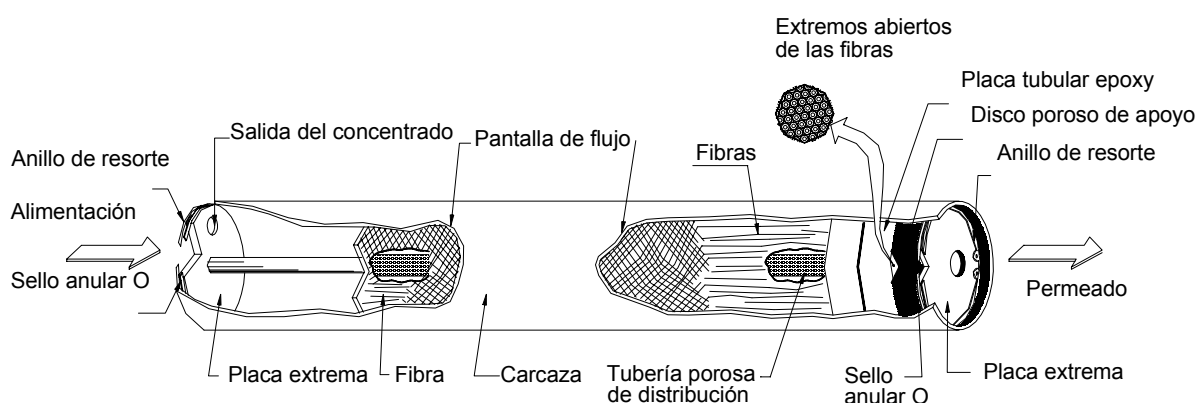
Dentro de las primeras aplicaciones del proceso de ósmosis inversa se puede mencionar la obtención de agua potable a partir de agua de mar, a través de la eliminación de sales disueltas, especialmente cloruro de sodio. Existen numerosos trabajos realizados en este campo, que garantizan una eliminación del 98,5% de los iones monovalentes, obteniéndose agua potable en un solo paso de desalinización, con lo cual la OI compite con los procesos de destilación. Por otra parte, el consumo eléctrico puede limitarse a un valor aproximado de 5 kWh/m^3 de agua desalinizada, resultando un ahorro energético significativo frente a instalaciones de destilación. Las primeras membranas que se utilizaron fueron las de acetato de celulosa, cuyas características principales eran su baja permeabilidad con respecto a las membranas modernas y el requerimiento de presiones de trabajo mayores, del orden de 6900 kPa (1000 psi ó 68 atm), recuperándose como producto solamente del 10 al 25% del agua cruda; por otra parte, el costo energético resultaba elevado. Sin embargo en ciertos lugares esta tecnología continúa siendo el método más económico de producción de agua potable.

3.1. CONFIGURACIONES DE MEMBRANA UTILIZADAS

Las configuraciones que se utilizan con mayor frecuencia en la práctica industrial para la producción de agua potable son las de fibra fina hueca y los elementos arrollados en espiral.

3.1.1. Módulos de Fibra Fina Hueca (FFH)

Los módulos de fibra fina hueca están constituidos por fibras de muy pequeño diámetro que forman un mazo colocado dentro de un recipiente a presión cilíndrico, tal como el que puede observarse en la **Figura 9**. Una membrana típica que puede encontrarse en el mercado contiene alrededor de 650.000 fibras huecas que son de aproximadamente 1,28 m de largo y con una superficie de 139 m², siendo los diámetros interior y exterior de 41 y 90 µm, respectivamente. En general, suele colocarse a los módulos en el interior del tubo, dispuestos en forma de U, fundiéndolos con resina epoxi por uno de los extremos en una placa final. El agua a tratar ingresa a presión y se distribuye en forma radial desde el centro hacia el canal externo de recolección de salmuera por medio de un tubo axial poroso o perforado. El agua pura atraviesa la pared de la fibra por efecto de la presión externa, pasa por el canal central y sale del módulo luego de atravesar la placa epoxi de estanqueidad.



Fuente: Kurita (1978)

Figura 9. Diagrama de un elemento de membrana de fibra fina hueca

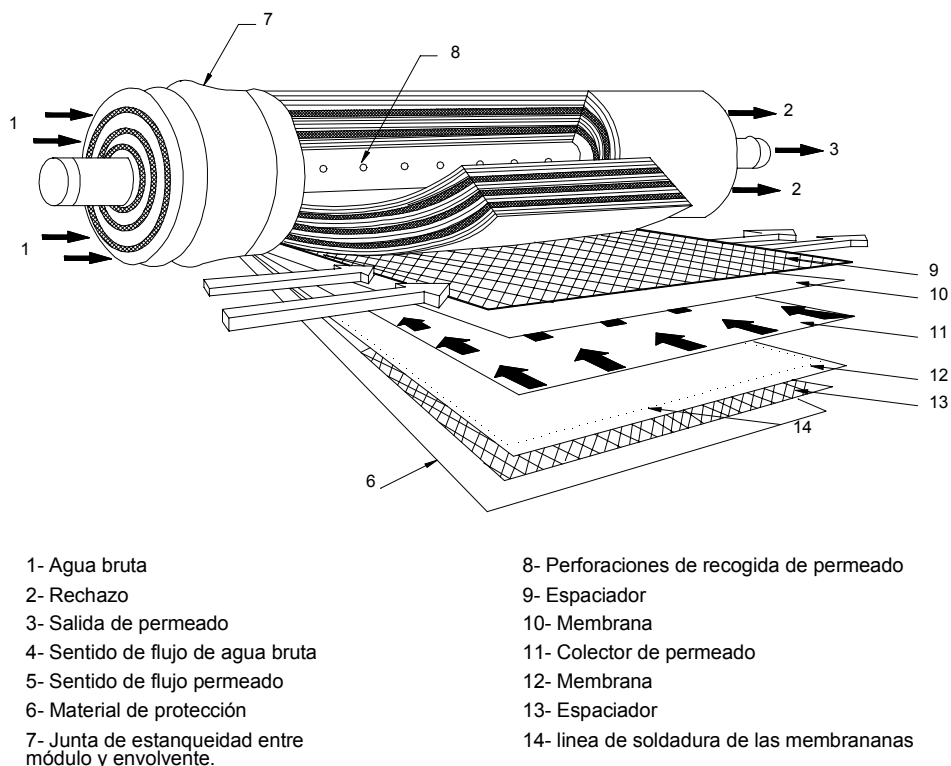
La mayor velocidad se verifica en el punto de ingreso de la alimentación, registrándose el menor valor en el exterior del mazo de fibras. La recuperación de un elemento de fibra fina hueca varía entre el 10 al 50% y es normalmente más elevada que la de un elemento de membrana arrollado en espiral (AWWA,1998).

3.1.2. Módulos Arrollados en Espiral

Los módulos arrollados en espiral están constituidos por dos hojas planas de membrana envueltas en un tubo central o separador de corriente cuya función principal es la de recoger la corriente de agua permeada. Cada hoja plana está compuesta por dos capas integrales y una capa permeable selectiva que se encuentra situada sobre un espaciador de textura porosa, en la parte exterior del arrollamiento.

La alimentación ingresa por el extremo abierto del módulo y circula paralelamente al tubo colector central, a lo largo de los espacios o canales formados por los espaciadores entre

las dos caras activas de las membranas. La corriente de permeado se dirige hacia la parte exterior siguiendo un camino en forma de espiral. La recuperación en un elemento arrollado en espiral es de aproximadamente el 5 y 15% (AWWA, 1998). En la **Figura 10** puede observarse el esquema de un elemento de este tipo.



Fuente: Degremont (1979)

Figura 10. Diagrama de una membrana de módulo arrollado en espiral

3.2. COMPONENTES DEL SISTEMA Y CONSIDERACIONES DE DISEÑO

En la **Tabla 3** se resumen las categorías de sistemas de ósmosis inversa, y a continuación se presenta una descripción de sus componentes principales.

Sistema	Rango de presión operativa sobre la membrana [psi]	Rango de presión operativa sobre la membrana [kPa]	Rango de STD de Salinidad [mg/L]	Relación de recuperación [%]
Agua de mar	800-1500	5000-10000	10000-50000	15-55
Presión estándar	400-650	3000-4500	3500-10000	50-85
Presión baja	200-300	1000-2000	500-3500	50-85
Nanofiltración	45-150	310-1000	> 500	75-90

Fuente: AWWA (1990)

Tabla 3. Categorías de sistemas de ósmosis inversa

3.3. AGUA DE ALIMENTACIÓN PARA SISTEMA DE ÓSMOSIS INVERSA

En general, se prefiere el uso de agua subterránea en el abastecimiento de agua a una población, por su estabilidad química. En un comienzo, los pozos de abastecimiento, utilizaron encamisados de acero, prensaestopas estándar y bombas de turbina vertical con componentes de bronce y acero. A través de la experiencia, se observó que la corrosión de los componentes de hierro y bronce, contribuían al ensuciamiento de los sistemas de membrana. Además pudo comprobarse que este efecto lo ejercía el aire que ingresaba al sistema a través de los prensaestopas, razón por la cual, los componentes originales se reemplazaron por materiales no corrosivos tales como el acero inoxidable, el cloruro de polivinilo y la fibra de vidrio. Otra modificación importante la constituye la utilización de bombas de turbina vertical provistas de sello mecánico o bombas sumergibles, de modo que pueda asegurarse la hermeticidad.

Un aspecto que adquiere suma importancia es el cuidado que se ponga en el muestreo y análisis de la calidad del agua, recomendándose para el diseño de los sistemas de membrana una serie de parámetros críticos, listados en la **Tabla 4**, que se presenta continuación:

<ul style="list-style-type: none"> • Calcio • Magnesio • Potasio • Manganeseo • Sodio • Hierro • Bario • Estroncio • Hidróxido • pH • Conductancia específica • Temperatura • Cloro residual • Color • Sólidos disueltos totales (STD) • Análisis bacteriológico (conteo heterotrófico en placa) • Dureza total (como CaCO_3) • Alcalinidad total (como CaCO_3) 	<ul style="list-style-type: none"> • Dióxido de carbono • Bicarbonato • Sulfato • Cloruro • Fluoruro • Nitrato • Amoníaco • Fosfato • Silicio (soluble) • Silicio (insoluble) • Sulfuro de hidrógeno • Índice de densidad de sedimentos • Sólidos suspendidos • Turbiedad (UNT)
---	---

Fuente: AWWA (1990)

Tabla 4. Datos de calidad de agua requeridos para el diseño de sistemas de ósmosis inversa

Las aguas superficiales requieren de un pretratamiento adicional para compensar las variaciones estacionales, que influyen en la calidad de la fuente de abastecimiento.

3.4. PRETRATAMIENTO

Un sistema de pretratamiento bien diseñado es un factor importante en el ciclo de vida de las membranas. En especial, deben removerse la turbiedad y los sólidos suspendidos con anterioridad al ingreso del agua al equipo de ósmosis inversa, para evitar que el material quede retenido en la estructura de la membrana, causando canalizaciones, mala distribución del líquido y taponamiento de la misma.

Además, suelen adicionarse productos químicos tales como el ácido sulfúrico (H_2SO_4) para prevenir la precipitación de carbonato de calcio ($CaCO_3$) y de magnesio ($MgCO_3$). Otro método que se emplea con frecuencia es el intercambio iónico (ciclo sodio), aunque es una alternativa más cara que el ajuste de pH con ácido.

La eliminación del sulfato es más problemática que el control de carbonatos, especialmente para el caso de sistemas de agua salada, en donde se produce la precipitación de los sulfatos de calcio, bario y estroncio, por lo cual se recomienda no superar su límite de solubilidad. Históricamente, el hexametáfosfato de sodio es el compuesto que se ha utilizado como secuestrante para inhibir la precipitación de los sulfatos, aunque presenta la desventaja de hidrolizarse a la forma de ortofosfato el cual resulta ineficaz para el control de la deposición de sulfatos. Actualmente se busca reemplazar al hexametáfosfato por polímeros de cadena larga.

Si el sistema se detiene por un período prolongado, es conveniente desinfectar o esterilizar las membranas con alguna solución bactericida tal como formaldehído o metabisulfito de sodio. Los compuestos orgánicos inmiscibles en agua pueden afectar la eficiencia de la membrana, por lo cual es indispensable mantener el nivel de carbono orgánico total en un valor menor a 20 mg/L. En el caso particular de aceites y grasas, se produce una película sobre la superficie de la membrana, afectando su calidad.

3.5. POSTRATAMIENTO

La desgasificación puede resultar necesaria para la remoción de dióxido de carbono y sulfuro de hidrógeno. La reducción de CO_2 aumentará el valor de pH, lo cual puede ayudar en la estabilización del agua de salida y evitar el agregado de sustancias alcalinas tales como soda cáustica o cal. Por otra parte, la remoción de H_2S permitirá la eliminación de olores indeseados. También suele agregarse cloro para desinfección.

3.6. VIDA UTIL DE LAS MEMBRANAS

Algunos de los factores que afectan la productividad y selectividad de la membrana tienen que ver con procesos de compactación y biodegradación, así como con el desarrollo de reacciones químicas. Para el caso de la biodegradación, suele aplicarse algún tipo de pretratamiento, tal como la cloración, especialmente para las membranas de acetato de celulosa (AC) y sus derivados, susceptibles del ataque microbiano. Esta práctica no es necesaria para el caso en que se trabaje con membranas de capa fina compuestas (PFC) y de poliamida (PA), puesto que las mismas son resistentes a la biodegradación, sin embargo pueden dañarse por la presencia de oxidantes, tales como el cloro. En general, puede decirse que la vida normal de las membranas suele estar

comprendida entre los tres y cinco años. A pesar de que las membranas de AC pueden llegar a estar garantizadas para más de tres años y que las de PFC normalmente tienen una garantía de cinco años, en la práctica, muchas instalaciones no han reemplazado las membranas en más de 10 años, lo cual tiene que ver con aspectos relacionados con el cuidado de la membrana y la aplicación de tecnologías de pretratamiento adecuadas.

3.7. SISTEMAS DE LIMPIEZA Y RECUPERACIÓN DE LAS MEMBRANAS

Dentro de la planta de tratamiento debe existir un sistema de limpieza de membranas, que en general está constituido por una bomba de acero inoxidable, un filtro de cartucho de 1 a 5 μm , cañerías resistentes a la corrosión, válvulas y controles. Las soluciones de limpieza para el ensuciamiento biológico o químico suelen ser recomendadas por el fabricante, al punto que existen empresas que comercializan productos específicos para la limpieza de las membranas.

De acuerdo al grado de ensuciamiento, puede requerirse la recuperación de la membrana, para lo cual pueden utilizarse algunos productos químicos o mezcla de ellos, que en general son recomendados por los fabricantes. Algunos de estos productos recomendados son: el ácido crotonico/acetato de polivinilo, metil-polivinil éter y el ácido tánico.

3.8. APLICACIONES DE LOS PROCESOS DE ÓSMOSIS INVERSA Y NANOFILTRACIÓN

La ósmosis inversa se ha aplicado con frecuencia en instalaciones que tratan agua de mar para convertirla en un agua adecuada para bebida, con valores relativamente bajos en cuanto al rendimiento de agua de alimentación (generalmente 40 a 50%) y operando a presiones que se encuentran en el rango de 7 MPa a 8 MPa (1.015 a 1.160 psi). También se ha aplicado la ósmosis inversa con éxito a presión ultrabaja para el tratamiento de aguas subterráneas que contienen hierro, manganeso o nitratos (Ventresque et al., 1997).

La nanofiltración se ha aplicado para el ablandamiento de agua en Florida y para la remoción de sulfatos de aguas contaminadas provenientes de minas. Del mismo modo se ha utilizado este tipo de proceso para el tratamiento de aguas subterráneas con elevada concentración de fluoruro (Ventresque et al., 1997). En general este tipo de membranas opera a presiones comprendidas entre los 690 y 1000 kPa (100 a 145 psi), obteniéndose alrededor de un 85% de agua tratada respecto del agua de alimentación.

Las condiciones actuales del mercado requieren de la aplicación de tecnologías de tratamiento que permitan incrementar la calidad del agua producida y al mismo tiempo cumplir con las reglamentaciones vigentes en lo referente a las concentraciones de cierto tipo de contaminantes, como por ejemplo plaguicidas y subproductos de desinfección. Considerando lo antedicho, los sistemas de nanofiltración pueden producir agua con los atributos deseados por los consumidores y los organismos de control correspondientes. Sin embargo, deben instrumentarse algunos cambios para que esta tecnología pueda considerarse como una solución práctica:

- 1). La nanofiltración requiere operar a valores de presión relativamente elevados, con lo cual el costo energético necesario se convierte en un factor limitante de importancia.
- 2). Las membranas utilizadas para el tratamiento de aguas superficiales tienen propensión al ensuciamiento por la adherencia de compuestos orgánicos a su superficie.
- 3). El rendimiento de estos sistemas se encuentra entre un 75 y 80%, siendo este valor inferior al obtenido para procesos tradicionales que recuperan un 95% del agua cruda tratada.
- 4). Las plantas que utilizan tecnologías de membrana deben considerar la disposición segura de las corrientes de rechazo, así como de las soluciones de limpieza empleadas para prevenir el ensuciamiento de las membranas.
- 5). La aplicación de la nanofiltración producirá agua desmineralizada por el rechazo de alcalinidad y dureza, lo cual implica la necesidad de remineralizarla antes de su distribución como agua potable.

En el artículo presentado por Ventresque (1997), se describen las instalaciones de la planta de agua de bebida ubicada en Méry - sur - Oise, en los suburbios de París, perteneciente a Syndicat des Eaux d'Île de France (SEDIF). SEDIF necesitó incrementar la capacidad de tratamiento de la planta de 200.000 m³/d a 340.000 m³/d, para lo cual se propuso la aplicación de nanofiltración para mejorar la calidad del agua suministrada. Se construyó una planta piloto que le permitió a SEDIF probar distintas variantes del proceso, de modo de optimizar el sistema y lograr así efectuar los cambios propuestos anteriormente. En la referencia citada puede encontrarse los detalles relacionados con las características y puesta en marcha del sistema, aspectos relacionados con la selectividad de la membrana, caracterización del agua afluente al sistema, etc.

En la **Tabla 5** se presenta un resumen de algunos ejemplos de aplicación de esta tecnología en la Argentina.

Organismo	Provincia	Observaciones
Cooperativa de Provisión de Agua Potable y Otros Servicios Publico de Sunchales Ltda.	Santa Fe	Sistema de ósmosis inversa de 130 m ³ /h
Municipalidad Pascanas	Córdoba	Sistema de ósmosis inversa de 10 m ³ /h
Dipos - Santiago Del Estero	Santiago Del Estero	24 sistemas ósmosis inversa para pequeñas localidades
Ministerio De Salud y Acción Social de la Nación		150 sistemas ósmosis inversa. Tasa de flujo para sistemas de filtración : 10- 50 m ³ /h Tasa de flujo para sistemas de o.i : 3-10 m ³ /h
Ministerio De Salud Y Acción Social de la Provincia De Buenos Aires	Buenos Aires	80 sistemas ósmosis inversa. Tasa de flujo para sistemas de filtrado: 50- 450 m ³ /hr. Tasa de flujo para sistemas de o.i: 3-100 m ³ /hr
Municipalidad de Quimili	Santiago Del Estero	Sistemas de ósmosis inversa de 2 m ³ /hr

Fuente: U.S. Filter Argentina (1999)

Tabla 5. Ejemplos de aplicación del proceso de ósmosis inversa en la Argentina

4. ULTRAFILTRACIÓN (UF)

La ultrafiltración (UF) es un proceso por presión que permite retener coloides, partículas y especies solubles de elevada masa molecular, a través de un mecanismo de exclusión por tamaño. En general, esta tecnología permite el pasaje de la mayoría de las especies iónicas inorgánicas, reteniendo partículas y especies orgánicas iónicas y no iónicas, dependiendo del peso molecular de corte de la membrana (PMC). Dicho valor es una especificación técnica utilizada por los fabricantes de membranas, que permite describir su capacidad de retención, referida a la masa molecular de un soluto con capacidad de retención mayor del 90%, que normalmente es polietilenglicol, dextrano o proteína.

La separación por membrana, unida a la adsorción por carbón activado, ha demostrado ser una tecnología capaz de lograr bajos niveles de carbono orgánico total y de reducir los valores de partículas submicrónicas a los niveles requeridos para el agua potable municipal e incluso para aplicaciones industriales como por ejemplo la industria electrónica (AWWA, 1998).

El proceso de ultrafiltración como parte de un tren de tratamiento presenta muchas ventajas sobre las operaciones convencionales de clarificación y filtración, como por ejemplo: no requiere la utilización de productos químicos, tales como coagulantes, floculantes, desinfectantes o ajustes de pH; calidad del agua tratada adecuada y constante en cuanto a la eliminación de partículas y microorganismos; compacidad del proceso y de la planta de tratamiento y automatización sencilla.

4.1. CONFIGURACIONES DE MEMBRANA UTILIZADAS

Las configuraciones más utilizadas en la ultrafiltración son de tipo tubular o plana. Las membranas se realizan normalmente sobre un material portador que le otorga resistencia mecánica y que la protege durante la fabricación y manipulación. En general, las membranas operadas por presión se colocan en unidades operacionales llamadas módulos que le confieren resistencia a las presiones de trabajo, constituidas además por, estructuras de soporte, puntos de entrada de la alimentación, distribuidores de caudal y puntos de salida del permeado y del rechazo. Cada una de las membrana constituye un elemento y un conjunto de elementos conforman el módulo.

4.1.1. Membranas Capilares

Dentro de este grupo se considera a las membranas delgadas y cilíndricas con diámetro exterior del orden de 500 a 2000 μm , con diámetro interior correspondiente a un 25 a 40% del diámetro exterior. Las membranas tubulares más pequeñas o fibras huecas alcanzan diámetros interiores de 350 a 1000 μm .

Este tipo de membrana se opera en general en flujo cruzado, para lo cual deben aplicarse diversos métodos de enrollamiento y disposición de las membranas. La solución de alimentación puede dirigirse a través de la luz o paso de la membrana, aunque también puede fluir radialmente paralelamente al eje de la misma hacia el exterior.

Otra clase de módulos dispone las membranas perpendicularmente a la dirección del flujo, trabajando en modo de flujo transversal. Esta configuración presenta una serie de ventajas, por ejemplo, la eliminación de zonas de canalización, mejor eficiencia en la transferencia de masa y tasa de barrido elevada con consumo de energía moderado. En contraposición, su mayor desventaja es la restricción de la presión que limita la velocidad de flujo cruzado.

Las membranas capilares tienen la propiedad de ser las más económicas del mercado, aunque la limitación de su fabricación mantiene los costos emparejados con los de los módulos de las membranas enrolladas en espiral.

4.1.2. Módulos Tubulares

En esta configuración la membrana se realiza sobre la cara interior de un tubo soporte poroso, con diámetros comprendidos entre los 6 y 25 mm, siendo de 13 mm la membrana que se utiliza con mayor frecuencia en el tratamiento de aguas residuales.

Una de las ventajas que presentan las membranas tubulares es que son capaces de trabajar con cargas de sólidos en suspensión más elevadas que otras configuraciones y que pueden aplicarse con sistemas de pretratamiento del agua de alimentación relativamente sencillos. En contrapartida presenta como desventajas, costo elevado y baja densidad de los módulos de membrana.

4.1.3. Módulos de Arrollamiento en Espiral

La membrana está conformada por una envolvente de dos membranas que incluyen espaciador de permeado sellado a lo largo de tres lados, conectándose el cuarto lado con un tubo perforado que lleva el agua producto. Los elementos se insertan en un recipiente a presión, pudiéndose conectar varios elementos en el interior. Las capas del elemento enrollado están separadas por un espaciador del lado alimentación, que permite el paso de la corriente de alimentación, al mismo tiempo que cumple la función de mezclado a fin de aumentar la transferencia de masa con baja energía de entrada.

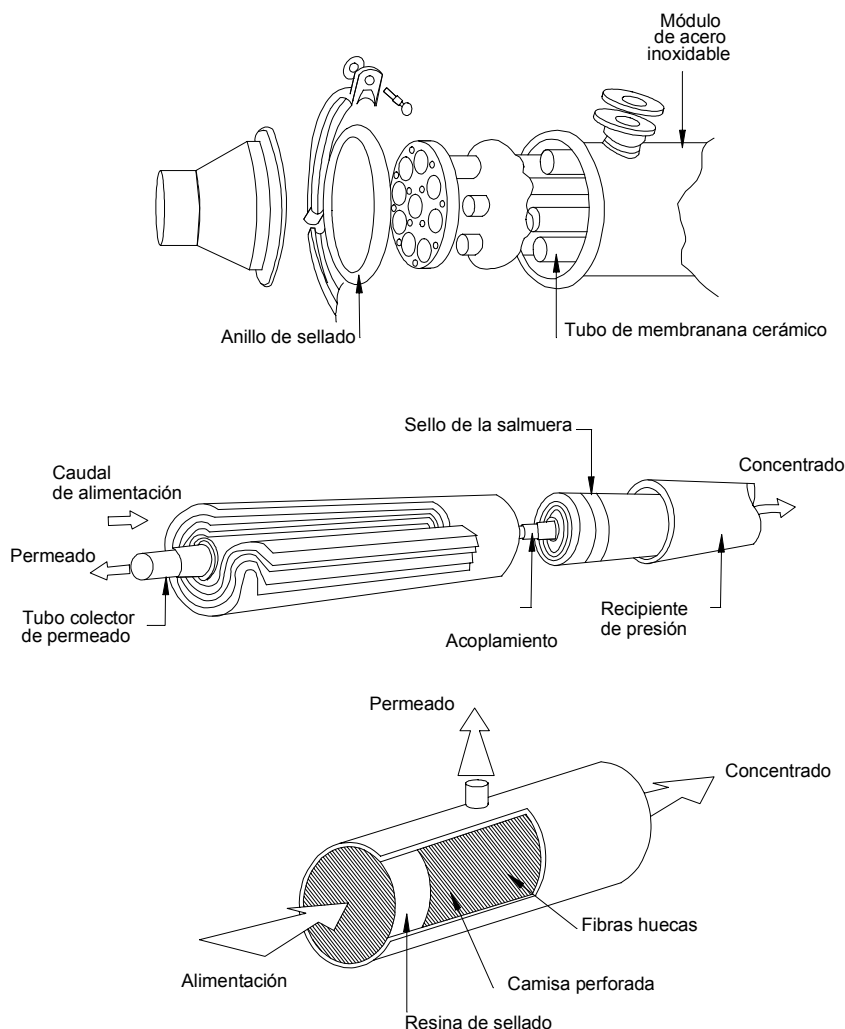
La configuración arrollada en espiral es en general, la opción de ultrafiltración más económica, sin embargo presentan problemas de ensuciamiento más serios que para el caso de soporte tubular y de placa y bastidor.

4.1.4. Módulos de Placa y Bastidor

En esta configuración se utilizan las membranas de hoja plana, que pueden formar conjuntos de membranas por ensamble de varias de ellas. La solución de alimentación fluye a lo largo de pasajes estrechos. La densidad del empaquetado de la unidad de placa y bastidor es de alrededor de 100 a 400 m²/m³ y ofrece alta versatilidad comparada con otras unidades, aunque a un costo mayor de inversión.

En general se verifica que los costos de reemplazo de membranas son bajos, lo cual se compensa con costos de instalación altos. Una ventaja que se presenta en algunos diseños es que el permeado puede recolectarse de las placas individuales, por lo cual se simplifica la tarea de detección de fallas.

En la **Figura 11** pueden observarse algunas de las configuraciones que se han descrito en párrafos anteriores.



a) conexión de un módulo tubular cerámico; b) conjunto de elementos de membranas de ósmosis inversa enrollados en espiral; c) módulo de fibra hueca construcción epoxi
Fuente: AWWA, 1998

Figura 11. Comparación de características constructivas de tres tipos de módulos

4.2. APLICACIONES DEL PROCESO DE ULTRAFILTRACIÓN

Los procesos de membrana producen un cambio importante en la naturaleza química del agua tratada. La tecnología de ultrafiltración en especial permite la remoción de partículas y compite con los procesos convencionales de filtración y coagulación para instalaciones pequeñas. En particular, la ultrafiltración facilita la remoción de ciertos compuestos

orgánicos y virus, especialmente para el caso de aguas provenientes de lagos y ríos, lo cual le otorga ventajas adicionales sobre las tecnologías de tratamiento convencionales, aun en aplicaciones a escala real. En este sentido, ciertas características de la membrana, tales como su elevado nivel de selectividad, no han sido suficientemente explotadas aun. Así por ejemplo, en el caso de aguas superficiales, la selectividad de la membrana puede producir agua de calidad excepcional, reduciendo el contenido de materia orgánica, precursores de subproductos clorados, bacterias virus, sulfatos y fluoruros a través de la utilización de membranas elegidas para una aplicación específica (Ventresque et.al., 1997).

5. MICROFILTRACIÓN

La microfiltración consiste en la separación de partículas micrométricas presentes en una solución, por medio de su pasaje a través del material específico que conforma la membrana. Es un tipo de filtración en profundidad, que da lugar a la retención de partículas y microorganismos en el interior de la estructura interna del filtro, el cual se reemplaza una vez colmatado o bien, cuando la caída de presión supera algún valor previamente especificado. Este tipo de filtros ha tenido aplicación limitada en el tratamiento primario de agua potable debido a la necesidad del reemplazo regular de los mismos, aunque sigue siendo aplicado como una etapa de pretratamiento para la ósmosis inversa en sistemas de pequeña escala.

Con esta tecnología se logra la retención de contaminantes sobre la superficie de la membrana y se eliminan en forma absoluta de la corriente de alimentación. El diámetro del poro puede variar en el rango de 0,05 a 5 μm , utilizándose por esta razón para la eliminación de partículas y microbios bajo condiciones de presión ultrabajas. Sin embargo, además de la membrana propiamente dicha, la presencia de una capa de torta sobre el material filtrante provee de mecanismos adicionales de separación de contaminantes; pero en este caso, la separación lograda no se basa en el tamaño del poro de membrana.

El impulso y desarrollo de los sistemas de microfiltración ha estado estrechamente vinculado con la aplicación de requerimientos más severos para maximizar la eliminación de partículas y microorganismos de los suministros de agua potable, lo cual finalmente derivó en un uso más amplio de esta tecnología. Posteriormente, se han ido desarrollando en forma progresiva diversas alternativas del sistema, en función de las ventajas potenciales que presenta. En particular se ha enfatizado en la incorporación de esta tecnología como parte de un tren de tratamiento, compuesto además por una etapa de pretratamiento (cribado) y otra de postratamiento (desinfección).

Uno de los principales obstáculos para la aplicación extensiva de la microfiltración en los sistemas de tratamiento de agua de bebida es la disminución progresiva de la capacidad de producción de agua, producida por la resistencia a la filtración. La característica más importante de este mecanismo es que no resulta reversible por la acción hidrodinámica del proceso de retrolavado. Muchas veces, el motivo por el cual se produce un incremento de la resistencia a la filtración es la combinación de factores, tales como sólidos suspendidos (turbiedad, partículas), materiales coloidales, carbono orgánico total (COT) y microorganismos (algas y bacterias) en el agua de alimentación a la unidad de microfiltración. En estudios recientes, se atribuye el desarrollo progresivo de la resistencia a la filtración al ensuciamiento de la membrana de MF, causado por el crecimiento de la capa de torta acumulada, constituida por los materiales rechazados los cuales se depositan sobre la superficie de la membrana.

Se cree que la formación de la capa de torta y el consecuente bloqueo de los poros, constituye un mecanismo importante que contribuye a la disminución del flujo a través de la membrana, particularmente en el tratamiento de aguas superficiales con una concentración muy variable de turbiedad. Por lo tanto, las técnicas de pretratamiento para la remoción de sólidos y material particulado de las aguas crudas, pueden mejorar notablemente la eficiencia operativa de la microfiltración.

En la literatura técnica de sistemas de membranas, se hace referencia al empleo de métodos de pretratamiento suplementario antes del tratamiento por membranas a baja presión. Estos pretratamientos están orientados a la remoción de constituyentes disueltos, como por ejemplo el carbono orgánico total y compuestos que confieren olor y sabor al agua cruda. Los métodos de pretratamiento estudiados son la coagulación, empleando iones metálicos y la adsorción por adición de carbón activado en polvo.

5.1. CONFIGURACIONES DE MÓDULO UTILIZADAS

Dentro de las configuraciones que se utilizan con mayor frecuencia se destacan las de tipo tubular y la de fibra hueca capilar, por las ventajas que presentan en cuanto a su capacidad para el control de ensuciamiento, a través de la aplicación del retrolavado. A continuación se presenta la **Tabla 6** en la que se resumen las ventajas y desventajas de estas configuraciones.

Ventajas	Desventajas
<i>Fibra hueca</i>	
<ul style="list-style-type: none"> Flujo cruzado de baja velocidad, en el rango de 0 a 2,5 m/s Con modelos de flujo interior-exterior, las tasas de restricción son altas debido a las pequeñas luces del interior de la fibra. Elevada relación superficie / volumen o densidad de compactación de membranas Las fibras pueden ser retrolavadas Presiones bajas sobre las membranas, normalmente de 0,2 a 1 bar Caída de presión baja en el módulo, en el rango de 0,1 a 1 bar. 	<ul style="list-style-type: none"> Las membranas de diámetro pequeño de tubo son susceptibles de obturación, a no ser que se aplique un precibado El gran número de fibras en el módulo presenta dificultades para detectar fallas de integridad que se traducen en fugas de la membrana para las plantas grandes
<i>Tubular</i>	
<ul style="list-style-type: none"> Diámetros de canales grandes (1 a 2,5 cm) permiten el tratamiento de aguas con alto contenido de sólidos y partículas grandes Se pueden emplear velocidades de flujo transversal elevadas (hasta 5 m/s), para controlar el ensuciamiento Los diámetros grandes de canales permiten una limpieza fácil, en algunos casos también puede utilizarse limpieza mecánica Las membranas cerámicas tubulares muestran buena resistencia mecánica 	<ul style="list-style-type: none"> Baja relación superficie/volumen o densidad de compactación de membranas Las membranas cerámicas tienen un costo mayor por m² de área de filtración comparadas con otras configuraciones de membranas

Fuente: Buckley (1998)

Tabla 6. Ventajas y desventajas de las configuraciones tubular y de fibra hueca para microfiltración

5.1.1. Membranas Capilares de Fibra Hueca

Tal como se explicó con anterioridad, estas unidades de microfiltración están constituidas por una serie de fibras huecas colocadas en un módulo y unidas a una placa de resina epoxi. Los diámetros internos de las fibras están comprendidos en el rango de 0,4 a 1,5 mm, verificándose que el tamaño pequeño de las mismas favorece la operación a presión elevada, evitando su colapso. Existen dos regímenes de flujo en la microfiltración por fibra hueca: interior-exterior y exterior-interior. La primera de ellas (interior-exterior), permite un buen control sobre la hidrodinámica del módulo, mientras que en la configuración exterior-interior resulta difícil de controlar la canalización del flujo y/o las zonas muertas, aunque presenta la ventaja de que la pérdida de carga en el módulo es menor.

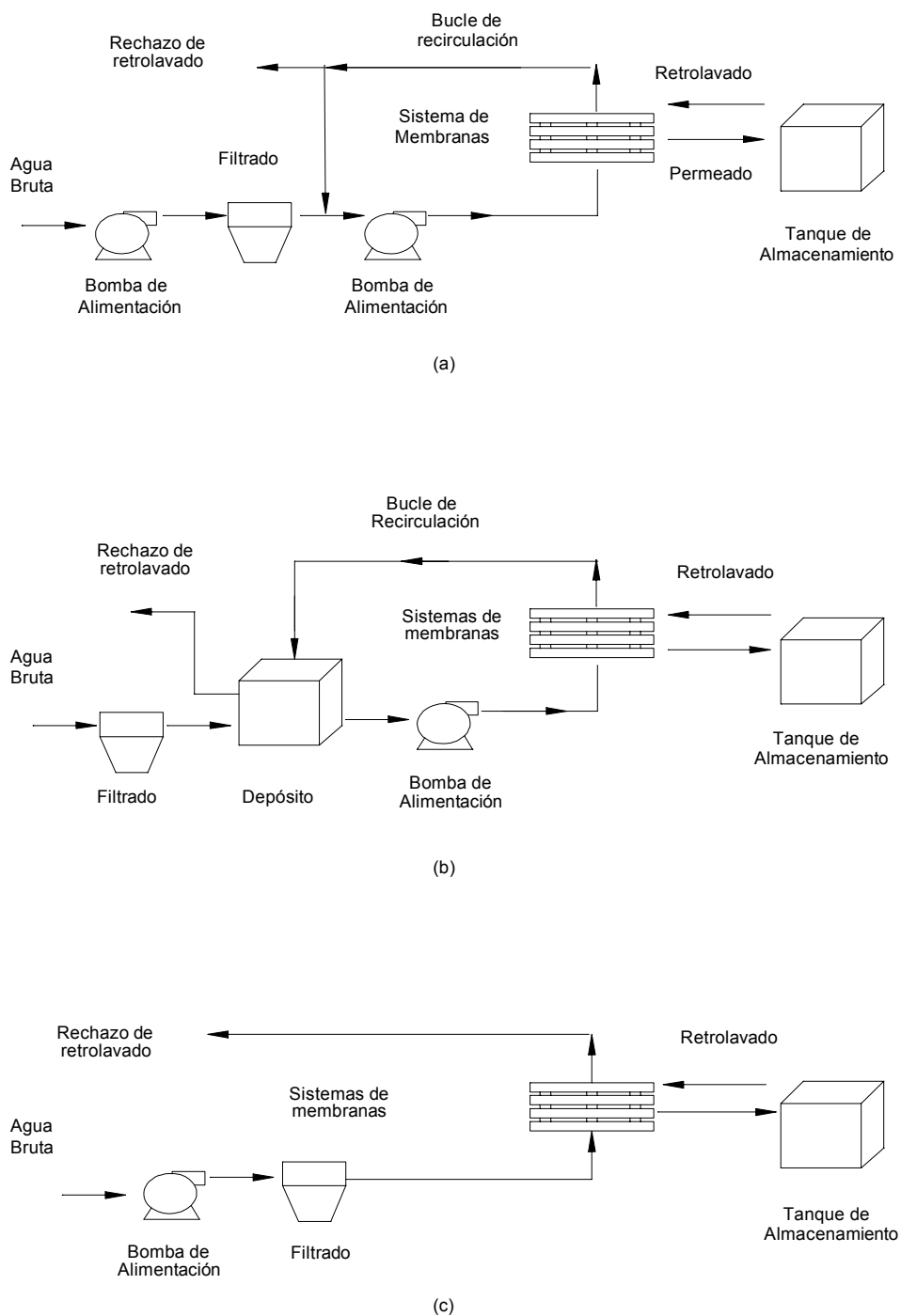
5.1.2. Membranas Tubulares

Las membranas tubulares utilizadas en microfiltración suelen tener diámetros mayores, en el rango de 1 a 2,5 cm. Habitualmente las membranas se colocan en el interior de los tubos, pudiendo presentar varios canales de flujo. El agua de alimentación fluye a presión a través del tubo y el permeado se recoge en la capa exterior del módulo.

Existe otro tipo de sistema de membranas, conocido como cortinas, en el cual se emplean tubos flexibles de poliéster tejido, dispuestos verticalmente. En este sistema, el rechazo de contaminantes tiene lugar en la capa de torta que se forma cerca de la entrada del ciclo de filtración, lo que permite la retención de partículas que son de un orden de magnitud menor que los poros de la pared del tubo. De acuerdo con las características del agua de alimentación, especialmente con respecto al contenido de sólidos y partículas presentes, se puede aplicar otro material como caolín o caliza antes de introducir el agua de alimentación, actuando como una precapa de la membrana o prerrevestimiento.

5.2. CONFIGURACIÓN DEL PROCESO

En microfiltración, existen tres configuraciones de proceso habituales, los cuales se presentan en la **Figura 12**. La primera, consiste en el bombeo de la corriente de alimentación con un flujo tangencial a la membrana, seguido por una etapa de recirculación del concentrado, que luego se mezcla con una parte de agua de alimentación adicional. La segunda configuración también trabaja con flujo cruzado, sin embargo, el agua recirculada vuelve a un depósito abierto y se mezcla con agua de alimentación adicional. La tercera alternativa consiste en una etapa de filtración directa, durante la cual no se aplica ningún flujo cruzado. El agua prefiltrada pasa a través de la membrana entre retrolavados, por lo cual se puede verificar un valor de recuperación de agua tendiente al 100%. En el modo de filtración directa hay un mayor ahorro de energía ya que no se efectúa recirculación de concentrado y, por otro lado, hay un ahorro de inversión, ya que no se requieren bombas o tuberías asociadas.



a) flujo cruzado; b) flujo cruzado con depósito; c) alimentación directa

Figura 12. Varios modos de operación de microfiltración

5.3. PRETRATAMIENTO

5.3.1. Prefiltración

En general, el pretratamiento se limita a la aplicación de prefiltros para la eliminación de partículas grandes que puedan ocasionar algún perjuicio en las fibras del módulo. Los prefiltros (microfiltros) consisten en cartuchos descartables de polipropileno, algodón u otros materiales con una abertura de poro comprendida en el rango de 1 a 10 micrones, siendo el más empleado el de 5 μm . En algunos casos concretos, puede ser necesaria la aplicación de coagulantes para mejorar la retención de virus y materia orgánica disuelta, aunque siempre en menor medida que para el caso de los procesos convencionales de clarificación del agua.

5.3.2. Ajuste de pH

El ajuste de pH puede ser necesario en algunos tipos de módulos, como por ejemplo los que contienen membranas de polímeros derivados de materiales celulósicos. Estas membranas usualmente tienen un rango de pH operativo recomendado de 5 a 8, y por lo tanto, puede ser necesario mantener el pH del agua de alimentación en ese rango para proteger el material en que está construida la membrana.

5.3.3. Aplicación de Flotación por Aire Disuelto (DAF)

El proceso de flotación por aire disuelto (en inglés dissolved air flotation) se ha reconocido desde hace mucho tiempo como un método efectivo de pretratamiento de la filtración en medio granular, para la separación de sólidos suspendidos de aguas tratadas. La tecnología DAF se aplicó principalmente en sistemas de tratamiento de agua de bebida en Sudáfrica y Escandinavia en la década de 1960, aunque en la actualidad, se ha extendido su uso al resto del mundo por sus ventajas en cuanto a la eficiencia y competitividad económica con respecto a los sistemas convencionales de clarificación.

Si bien el proceso de flotación por aire disuelto se trata extensamente en el Capítulo correspondiente, puede decirse en forma sintética que el proceso DAF consiste en la separación de sólidos suspendidos y de partículas hidrofóbicas por mecanismos relacionados con el acercamiento de las partículas a las burbujas de aire. La flotación de las partículas sólidas tiene lugar principalmente por la fuerza de empuje que aportan las burbujas de aire asociadas a las partículas suspendidas, las cuales se remueven por medio de mecanismos barredores superficiales ubicados en la parte superior de la columna de agua. Por lo tanto, la utilización de este proceso como pretratamiento a la microfiltración puede proveer un agua de alimentación de calidad excelente por dos razones principales. La primera es que el proceso DAF permite remover en forma significativa turbiedad y especies particuladas, en la mayoría de los casos produciendo un efluente con turbiedad menor a los 0,5 NTU (Braghetta, 1997), y en segundo lugar porque permite la eliminación de constituyentes hidrofóbicos, a través de una combinación de neutralización de cargas y flotación.

En el artículo presentado por Braghetta y otros, se describe un trabajo de investigación cuyo objetivo fue demostrar el aumento de la eficiencia de un sistema de microfiltración dotado con pretratamiento por medio de un sistema DAF, a través del seguimiento de

diversos criterios de eficiencia, tales como: mantenimiento de las condiciones de flujo elevado a través de la membrana, demostración de la extensión del período de operación de membranas entre limpiezas químicas y demostración de eficiencias elevadas de retrolavado de las membranas para todas las condiciones de flujo. Para mayores detalles de este estudio, se recomienda consultar la referencia citada.

5.4. POSTRATAMIENTO

Se ha observado una buena eficiencia para la retención de bacterias, quistes y protozoarios, y parece brindar buenos resultados en la eliminación de virus, sin embargo, se requiere complementar la microfiltración con un proceso de desinfección, pudiéndose emplear cloro, dióxido de cloro u ozono. También se puede utilizar radiación ultravioleta, cuya ventaja frente a otros métodos es la ausencia de residuos en el mantenimiento del sistema de distribución; no obstante, es necesario añadir cloro o cloraminas para mantener un efecto de desinfección residual en el sistema.

6. ELECTRODIÁLISIS (ED)

La electrodiálisis es un proceso de separación de especies iónicas y de materiales sin carga presentes en una solución acuosa, por medio del pasaje a través de membranas cargadas eléctricamente, mediante la aplicación de una diferencia de potencial.

Originalmente, esta tecnología tuvo su mayor campo de aplicación en la desalinización de aguas salobres y, en algunas zonas del mundo, para la producción de agua potable. Sin embargo, en la actualidad el desarrollo del proceso de intercambio iónico de membrana, ha desplazado en algunas aplicaciones a la ED clásica, generado gran interés en las industrias de la alimentación, medicamentos y procesos químicos, así como en biotecnología y en el tratamiento de aguas residuales. Las ventajas que ofrece el intercambio iónico de membranas son selectividad, menor resistencia eléctrica y mejoramiento de las propiedades térmicas, químicas y mecánicas del sistema. La ED clásica se desarrolló durante los años cincuenta, sin embargo, durante las dos décadas y media pasadas se ha dado impulso al desarrollo del proceso de polaridad inversa que se conoce como electrodiálisis inversa (EDI), y que ha desplazado virtualmente a la ED clásica de la mayoría de las aplicaciones de aguas salinas, afirmándose en el mercado de tecnologías de membranas.

6.1. PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO

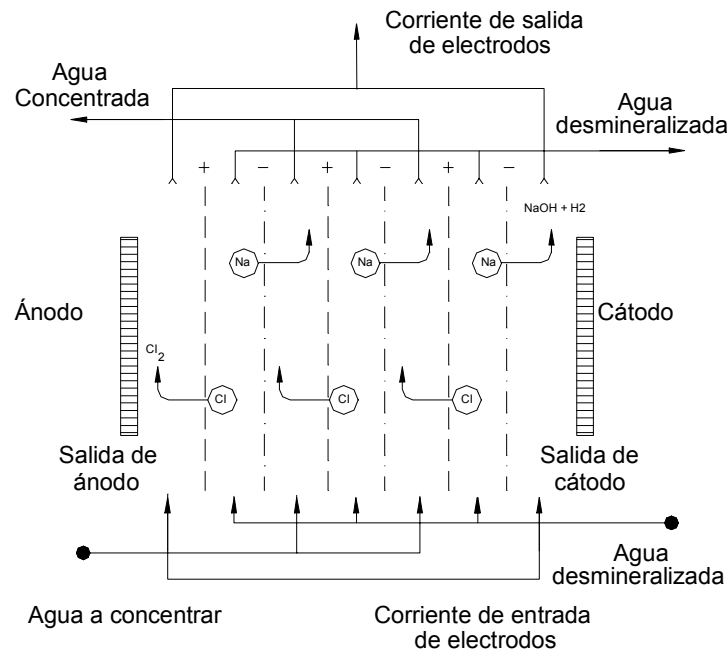
Existe una diferencia importante entre los procesos de intercambio iónico por membranas o por resinas de intercambio en cuanto a los fenómenos involucrados. En el primer caso tiene lugar un fenómeno de permeado de iones, mientras que en el segundo, se da un fenómeno de cambio de iones adsorbidos. Esta es la causa por la cual una membrana de ED o EDI con intercambio iónico no requiere regeneración, sino que puede utilizarse durante un período prolongado y en forma continua.

Una membrana de intercambio catiónico está cargada negativamente y es permeable para cationes como el sodio (Na^+) y calcio (Ca^{2+}), mientras que es impermeable para aniones tales como el cloruro (Cl^-) o el sulfato (SO_4^{2-}). Si se considera una membrana de intercambio aniónico, se observa que están cargadas positivamente y se comportan de modo opuesto al planteado anteriormente. Esta selectividad de las membranas de intercambio iónico es la base del éxito de los procesos de ED/EDI.

Proceso estándar de ED

En este proceso se coloca entre dos electrodos y en forma alternativa un conjunto de membranas selectivas catiónicas y aniónicas, según puede observarse en la **Figura 13**. De este modo se orienta la migración de aniones y cationes a través de las membranas correspondientes mientras que el agua fluye entre las membranas permeables dispuestas en un acumulador o batería. La migración iónica a través de las membranas ocurre por una fuerza electromotriz suministrada en la forma de corriente continua, la cual permite que los iones sean retirados de la solución o bien concentrados por medio de las membranas selectivas en los pasos de agua alternativos.

Con el fin de evitar la precipitación de sales solubles en el acumulador, como por ejemplo CaCO_3 y CaSO_4 , se requiere agregar a la corriente de rechazo una cantidad de ácido y/o secuestrante. Para mantener el rendimiento del sistema, la batería debe limpiarse periódicamente, utilizándose soluciones especiales de ácidos o bases diluidas. Para ello se requiere la salida de servicio de la unidad y su desmontaje a intervalos regulares a fin de eliminar incrustaciones y otros materiales que ensucian la superficie.



Fuente: Degremont, 1979

Figura 13. Proceso de electrodiálisis

Proceso de Electrodiálisis Inversa (EDI)

Este proceso se basa en los mismos principios que la ED, aunque trabaja invirtiendo la polaridad de los electrodos, en general de 2 a 4 veces por hora. Paralelamente, se intercambian las salidas del acumulador de membrana, del agua potable de salida y del agua residual por medio de válvulas comandadas. Esta forma de operación del sistema permite que los iones se transfieran en direcciones opuestas a través de las membranas, lo cual ayuda a la disgregación de depósitos incrustados sobre la superficie de la membrana y al lavado y eliminación de barro y partículas presentes en las celdas. Una ventaja derivada de esta forma de operación es la extensión de la vida útil de la membrana y la reducción de los costos de mantenimiento y reemplazo.

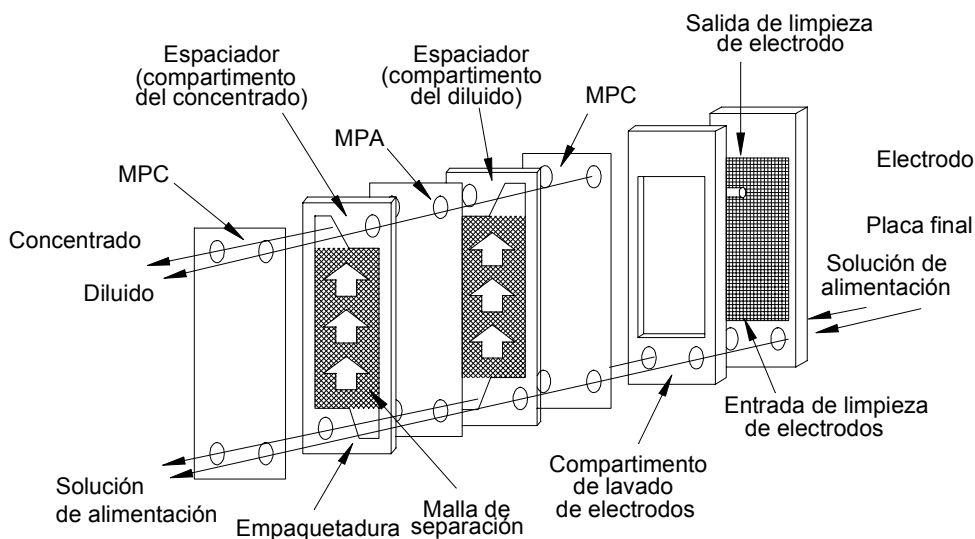
Generalmente, la operación automática del proceso EDI elimina la necesidad de dosificar ácido y/o secuestrantes, minimizándose la formación de incrustación en las celdas y electrodos debido al permanente cambio en las condiciones de pH del medio de trabajo. Esta capacidad de la EDI para controlar en forma más efectiva la incrustación convierte al proceso en una alternativa interesante para aplicaciones que requieren una recuperación de agua elevada.

6.2. CONFIGURACIÓN DE MEMBRANAS UTILIZADAS

Aunque en la bibliografía se han descrito una gran variedad de módulos de ED/EDI, el filtro prensa y la batería de celda son las más utilizadas.

6.2.1. Componentes de un Módulo

En la **Figura 14** se pueden observar los componentes que conforman el módulo de una batería ED/EDI.



Fuente: AWWA (1998)

Figura 14. Componentes de una batería de electrodiálisis: membrana permeable aniónica (MPA); membrana permeable catiónica (MPC)

El proceso de electrodiálisis tiene lugar en módulos conformados por membranas ubicadas en forma vertical, y espaciadores de flujo, cuya función principal es separar a las membranas entre sí. Cada módulo consta de pares de celdas, comprendiendo una membrana catiónica, un espaciador de flujo diluido, una membrana aniónica, un espaciador de flujo concentrado y dos electrodos, al mismo tiempo que contiene otros elementos adicionales como compartimientos de electrodo, la tubería y accesorios de ensamble para formar la batería.

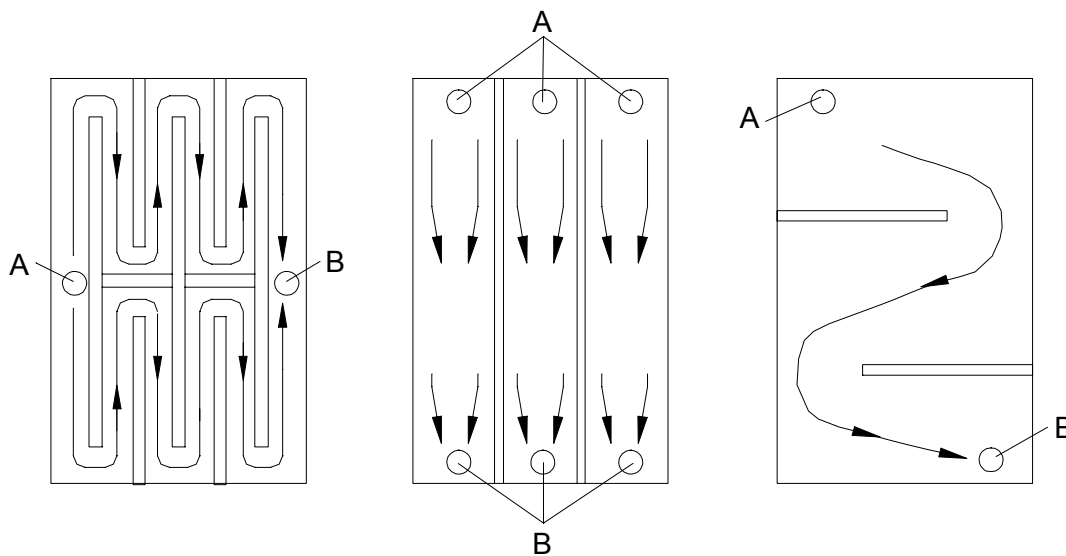
6.2.2. Membranas

En general, las membranas de electrodiálisis son hojas planas, constituidas por un material plástico y un tejido que le confiere resistencia al módulo. Presentan sitios de transferencia de iones, que varían en su ubicación para permitir el pasaje selectivo de aniones o cationes, según el tipo de membrana de que se trate. Normalmente se producen dos tipos de membranas, las homogéneas y las heterogéneas. En las membranas homogéneas se distribuyen uniformemente los lugares de carga, mientras que en las heterogéneas los lugares se distribuyen dentro de la membrana en puntos discretos.

Dependiendo de la aplicación requerida, podrá seleccionarse el espesor de membrana óptimo, utilizándose las más gruesas en casos en que se necesita mayor dureza, resistencia a la erosión y mayor vida útil. Como contrapartida, las membranas más delgadas presentan menor resistencia eléctrica y por lo tanto, las necesidades energéticas también son menores. En general, el espesor típico de una membrana puede estar comprendido entre los 0,15 y 0,56 mm.

6.2.3. Espaciadores

Los separadores o espaciadores son elementos que permiten el flujo de agua dentro de la celda. De acuerdo con la ubicación de los espaciadores existen tres configuraciones básicas posibles: camino tortuoso, flujo paralelo ramificado o camino sesgado (Figura 15).



a) camino tortuoso; b) flujo paralelo ramificado; c) camino sesgado

Fuente: AWWA (1998)

Figura 15. Tipos de separadores

6.2.4. Electrodos

En cada etapa eléctrica se requiere un par de electrodos y en cada uno de ellos tiene lugar una reacción química. En el ánodo (electrodo positivo) se producen iones hidrógeno y oxígeno y/o cloro gaseoso, mientras que en el cátodo (electrodo negativo) se forman el hidrógeno gaseoso y los iones oxidrilos. Como que en el cátodo el pH es alcalino, puede producirse la precipitación de calcio o magnesio, por lo cual suele agregarse una solución ácida a la corriente del cátodo para evitar dicha deposición. Los materiales que se emplean con mayor frecuencia para la construcción de los electrodos son niobio o titanio con un revestimiento de platino, o bien de grafito. Como se explicó anteriormente, en el proceso de EDI, la polaridad eléctrica se invierte varias veces por hora, con lo cual se modifican las condiciones de pH del medio y, en consecuencia, se reduce la formación de incrustaciones sobre los electrodos en forma significativa.

6.3. PRETRATAMIENTO

Dentro de las técnicas de pretratamiento aplicadas a esta tecnología suele ser muy común la separación de sólidos en suspensión, por filtros de arena y de cartucho, dependiendo del tamaño y forma de las partículas. Las partículas coloidales y gelatinosas son más problemáticas que las granulares, ya que se adhieren más a los separadores de malla en el interior de los compartimientos de solución. En general, es una buena práctica eliminar de la corriente de alimentación la mayor cantidad de materia particulada antes de su ingreso al tratamiento de electrodiálisis o electrodiálisis inversa.

La materia orgánica, en cambio debe eliminarse por medio de la utilización de filtros de carbón activado. El ablandamiento por intercambio iónico puede ser una buena alternativa para minimizar la precipitación de sales poco solubles en el proceso estándar de ED, lo cual puede lograrse por medio de la adición de ácido o de agentes inhibidores de la precipitación.

Cuando el agua a tratar contiene sulfuro de hidrógeno, éste puede eliminarse de diversas formas, por ejemplo aeración, oxidación y filtración. El crecimiento biológico puede prevenirse con una etapa de cloración. Sin embargo, luego será necesario eliminar el exceso de cloro residual para proteger a las membranas del proceso de oxidación. El hierro y el manganeso se pueden eliminar por filtros de arena verde, aeración u otros métodos convencionales de tratamiento de agua. Por otra parte, puede ser deseable eliminar trazas de metales pesados por tratamiento con H_2S o Na_2S y filtración.

6.4. POSTRATAMIENTO

Si se compara el agua producida en un sistema de ED/EDI con respecto a la obtenida en un sistema de ósmosis inversa, se podrá ver que la primera resulta menos agresiva, lo cual se debe al hecho de que no se añade ácido en la ED/EDI para el control de incrustaciones. Un punto importante a tener en cuenta es que los materiales no ionizables deberán tratarse con un pre o postratamiento de la alimentación. Por ejemplo sílice, partículas, bacterias, virus, patógenos y materia orgánica, deben ser removidos antes o después de su pasaje por el sistema de tratamiento puesto que el proceso de ED/EDI no es capaz de retener este tipo de especies.

7. REACTORES DE ADSORCIÓN CON MEMBRANAS

Solamente los procesos de membrana de alta presión, como la nanofiltración y la ósmosis inversa, son capaces de eliminar en forma notable y eficiente algunos compuestos orgánicos naturales, como por ejemplo las sustancias húmicas, originadas en la descomposición de vegetación, compuestos precursores de sabor y olor, y también compuestos orgánicos sintéticos como los trihalometanos y pesticidas. Sin embargo sería posible pensar en un sistema donde estos compuestos quedaran adsorbidos sobre una fase particulada como por ejemplo el carbón activado en polvo (CAP). De este modo se hallaría una alternativa que podría combinar una etapa de microfiltración y ultrafiltración con el empleo de carbón activado en polvo, consiguiéndose de este modo procesos de menor presión y costo de operación.

Los sistemas de microfiltración y ultrafiltración tradicionales son inefficientes en la remoción de carbono orgánico disuelto y de precursores de trihalometanos (THM_s). Sin embargo, se han podido remover una gran cantidad de compuestos orgánicos en sistemas de UF y MF aplicados después de que se incorporaran adsorbentes en polvo a la recirculación del sistema de membranas. Las partículas de adsorbente agregadas mejoran significativamente la remoción de compuestos orgánicos, ayudando además en los problemas de ensuciamiento de las membranas.

Por otra parte, la dosis de CAP puede ajustarse con bastante rapidez para adaptarla a los objetivos variables del tratamiento, especialmente para el caso de microcontaminantes que cambian su concentración según las estaciones, como pueden ser determinados pesticidas. Diversos trabajos de investigación (Clark, 1998), han demostrado que la adición de CAP puede incrementar la eficiencia del proceso de membranas, minimizando la incrustación y prolongando los ciclos de filtración. La referencia citada describe un estudio realizado sobre el agua de un lago a la cual se le adicionaron 250 mg/L de CAP durante una UF discontinua, lográndose disminuir la incrustación irreversible de las membranas, así como la resistencia hidráulica de la torta formada sobre la superficie de las mismas. Otro trabajo, hace referencia al agregado de 25 mg/L de CAP a un sistema piloto de UF que trataba agua subterránea durante períodos de tiempo prolongados, lo cual resultó en una acumulación estable de 200 mg/L de CAP dentro del sistema. Si bien la adición de CAP no aumentó la producción media de agua en el sistema, el CAP si proporcionó una duración del período de filtración considerablemente prolongada antes del lavado a contracorriente (unas 22 horas sin CAP y 39 horas con CAP).

También se ha propuesto el uso de UF en combinación con carbón activado granular (CAG), sin embargo, no se han obtenido resultados satisfactorios. Por ejemplo, si las columnas de carbón precedieran a la membrana y el agua cruda fuera aplicada directamente al CAG, éste se vería incrustado por la mayoría de las fuentes de agua superficiales y subterráneas. La experiencia desarrollada en plantas a escala real indica que la eliminación de microcontaminantes mediante lechos de CAG depende considerablemente de la porción del ciclo en el que se trabaja. Por ejemplo, los picos estacionales de atrazina pueden eliminarse eficazmente por CAG en las primeras etapas del ciclo de adsorción, pero no se eliminan con la misma eficacia hacia el final del ciclo, cuando el lecho se encuentra próximo al agotamiento. Por otra parte, si las columnas estuviesen dispuestas después de la membrana, la capacidad desinfectante del proceso de membrana podría verse comprometida debido al crecimiento biológico sobre el carbón.

7.1. EFECTO DEL TAMAÑO DE LAS PARTÍCULAS

Cuando se utiliza el CAP en sistemas de fibra hueca con flujo de adentro hacia fuera, hay que tomar en cuenta dos consideraciones importantes para la selección del tamaño de las partículas a emplear: la obstrucción física de las fibras del módulo y el rendimiento de adsorción. Las partículas de CAP no deben ser tan grandes como para obstruir físicamente las fibras huecas. Una pauta práctica para seleccionar el tamaño de partículas del CAP es que el diámetro de las partículas sea inferior a una quinta parte del diámetro interior de la fibra. Por ejemplo, para membranas de UF de fibra hueca de 0,93 mm de diámetro interior filtrando agua relativamente limpia, se ha comprobado que cuando más del 5% de las partículas tienen diámetros superiores a los 200 μm , las fibras individuales en el módulo empiezan a obstruirse (Clark, 1998).

7.2. DESARROLLOS E INVESTIGACIONES FUTURAS

Uno de los temas más conflictivos de este proceso se refiere al tratamiento de los residuos generados. Desde el punto de vista ambiental y económico, la mejor solución en el proceso CAP/UF sería que el carbón pudiera ser regenerado. Sin embargo, aún se debe avanzar en investigaciones orientadas a la regeneración de los adsorbentes utilizados en los sistemas de adsorción con membranas. En la actualidad, el carbón activado en polvo utilizado en los procesos CAP-UF, no pueden regenerarse en forma adecuada, especialmente si se tiene material coloidal en el rechazo de la membrana.

Otro aspecto importante de la regeneración es la configuración del proceso. Por ejemplo, una regeneración exitosa sería más probable si se minimizara la cantidad de sólidos naturales que ingresan al reactor, lo cual sugiere que la regeneración podría ser más eficiente con fuentes de agua freáticas o superficiales con algún tipo de presedimentación u eliminación de partículas (Clark, 1998). Se han realizado algunos ensayos utilizando arcillas modificadas o resinas de intercambio iónico en polvo para la remoción de compuestos específicos, aunque esta área aún se encuentra en una etapa de desarrollo.

8. TECNOLOGÍAS INNOVADORAS EN EL TRATAMIENTO POR MEMBRANAS

8.1. PROCESOS DE CONTACTO EN LA FASE DE MEMBRANA (PCFM) (MEMBRANE PHASE CONTACT PROCESS - MPCPS)

Mientras que en los procesos tradicionales de separación por membrana, la fuerza impulsora es la presión o la diferencia de potencial eléctrico, en los procesos de desarrollo reciente la fuerza impulsora que transporta a través de la membrana es la diferencia de potencial químico. En este proceso, la membrana actúa como un punto de contacto, proveyendo una gran superficie interfacial estable entre la solución acuosa y el medio aceptor, que puede ser un líquido de extracción no acuoso o una fase gaseosa. Una separación por PCFM puede ser muy selectiva porque está determinada por parámetros fisicoquímicos de los componentes más que por la geometría de las partículas, tal como sucede en las separaciones por presión. Por otra parte, no se verifica un flujo de agua a través de la membrana, ya que únicamente los contaminantes necesitan pasar a través de ella. La ventaja de estos procesos es que ofrecen costos más bajos, y menores requerimientos de energía para remover contaminantes específicos.

8.2. SISTEMAS COMBINADOS DE REACTORES Y PROCESOS DE MEMBRANA

Bioreactores de membrana (Membrane Bioreactors - MBRs)

Los bioreactores de membrana están compuestos, en general, por un reactor biológico combinado con sistemas de ultrafiltración o de microfiltración, que permiten separar recintos y concentrados de biomasa. Estos reactores híbridos se han utilizado en situaciones que requieren la obtención de un efluente de muy alta calidad, o donde la biomasa se compone de microorganismos con velocidad de crecimiento baja. Las ventajas principales del proceso son que es compacto, produce efluentes de muy alta calidad, retiene microorganismos no floculentos y reduce el volumen de barros. En el tratamiento de agua para bebida, este tipo de reactor se ha utilizado principalmente para desnitrificación y adsorción de plaguicidas. Las limitaciones de estos sistemas tienen que ver con el costo de las membranas y el consumo de energía para el bombeo a través de las mismas.

8.3. SISTEMAS INTEGRADOS DE MEMBRANAS

Varios estudios han demostrado la factibilidad de aplicar la nanofiltración para remover precursores de subproductos de desinfección con un nivel de eficiencia razonable, tanto en aguas subterráneas como superficiales. La aplicación de procesos de pretratamiento avanzado puede resultar necesaria a fin de controlar la pérdida de productividad durante la nanofiltración para aguas superficiales. Por ejemplo puede aplicarse el tratamiento convencional incluyendo: coagulación, floculación y filtración a través de un medio granular, o bien microfiltración o ultrafiltración. Las membranas empleadas dentro de un sistema de tratamiento de agua de multiprocesos suelen conocerse como sistemas de membranas integradas.

La aplicación de nanofiltración y ósmosis inversa en el tratamiento de aguas superficiales, normalmente requiere de un pretratamiento importante, para lo cual se comparó para distintos tipos de pretratamientos, las velocidades de ensuciamiento en los elementos del sistema. Las tecnologías de tratamiento convencionales tales como el control de pH y la precipitación de compuestos inorgánicos, así como la utilización de carbón activado granular, no resultaron exitosas en el control de ensuciamiento de las membranas. Sin embargo, cuando se utilizó como etapa de pretratamiento un sistema de microfiltración, las velocidades de ensuciamiento resultaron menores (Chellam y otros, 1997). En esta última referencia se presenta una comparación de las velocidades de ensuciamiento en tres sistemas integrados de membranas seguidos de microfiltración, ultrafiltración y pretratamiento convencional, observándose que en las condiciones experimentales del estudio, el ensuciamiento en la etapa de nanofiltración se vio afectado en mayor medida por los materiales coloidales que específicamente por la materia orgánica presente. Comparando el tratamiento convencional con los pretratamientos por microfiltración y ultrafiltración, se observan para la nanofiltración mayores intervalos de limpieza y menores velocidades de ensuciamiento. Este hecho sugiere que los sistemas de membranas duales pueden proveer un método efectivo para reducir el ensuciamiento durante el tratamiento de aguas superficiales.

8.4. CONSIDERACIONES SOBRE LA CALIDAD DEL AGUA

Se ha observado que es esencial reducir los costos relacionados con el pretratamiento de aguas superficiales enviados a sistemas de ósmosis inversa, nanofiltración y electrodiálisis, ya que el potencial de ensuciamiento es tan elevado que impide el uso de membranas compuestas de menor costo. El ensuciamiento biológico (bioensuciamiento) de las membranas de ósmosis inversa y nanofiltración puede ser difícil de controlar, ya que los principales biocidas utilizados, muchas veces no son compatibles con la composición de la membrana o bien no están aprobados como aditivos para aguas de bebida. Por esta razón, resulta muy importante el desarrollo de tales aditivos.

Aunque la cuantificación de la remoción de microorganismos por microfiltración y ultrafiltración está bien definida, el mecanismo por el cual ocurre necesita más trabajo de investigación y desarrollo, especialmente para el caso de virus, en donde la interacción fisicoquímica de los organismos en una matriz de agua natural con los materiales de la membrana no está bien entendida.

Hasta hace muy poco tiempo se pensaba que la nanofiltración y la ósmosis inversa ofrecían una barrera microbiana absoluta. Sin embargo, algunos estudios recientes demuestran que algunos organismos pueden pasar a través del sistema de membrana, posiblemente debido a imperfecciones de la membrana, juntas o sellos. Este fenómeno requiere de mayor investigación, así como del desarrollo de un método para el monitoreo de la integridad del sistema.

Se espera que en el futuro, la nanofiltración se utilice con mayor frecuencia en el tratamiento de aguas superficiales, especialmente en el caso de las membranas capaces de rechazar cantidades menores de iones inorgánicos que las membranas tradicionales. Este hecho permite aumentar la recuperación de agua, disminuir el volumen de productos químicos necesarios para lograr la estabilización del agua producida, y obtener mayor

flexibilidad en el proceso de disposición de los residuos por la menor generación de salmuera producida.

La ultrafiltración y la microfiltración se han utilizado principalmente para la remoción de partículas y microorganismos, aunque también pueden resultar aplicables como etapa de pretratamiento para la eliminación de sustancias precursoras de subproductos de desinfección. Resulta indispensable definir las estrategias de pretratamiento, documentar sus capacidades y desarrollar un modelo para la predicción de la eficiencia y comportamiento del sistema.

Estas tecnologías necesitan refinarse, al mismo tiempo que deben desarrollarse nuevas configuraciones que resulten más adecuadas para el tratamiento de efluentes. Tales desarrollos pueden incluir la utilización de materiales que resistan mejor el bioensuciamiento y que puedan limpiarse con mayor facilidad, configuraciones de módulos con mejores condiciones hidrodinámicas que minimicen la deposición de las partículas durante el flujo cruzado, aditivos que reduzcan el ensuciamiento o bien la aplicación de técnicas de retrolavado más efectivas. Este mismo criterio, referido a la disminución del ensuciamiento y a la eficiencia de la etapa de lavado, puede aplicarse para el caso de otras tecnologías de membrana como pueden ser la ósmosis inversa y la nanofiltración.

En nuestro país, la tecnología de membranas presenta un amplio campo de aplicabilidad en zonas donde la calidad de la fuente de agua alcanza niveles de salinidad inadmisibles o bien incluye concentraciones excesivas de contaminantes tales como arsénico, flúor y/o nitratos. En el capítulo referido al Proyecto Típico de Ósmosis Inversa se incluyen y aplican las consideraciones de diseño específicas requeridas para estos procesos.

9. BIBLIOGRAFÍA

- Capsule Report: Reverse Osmosis Process - USEPA, Office of Research and Development. EPA/625/R-96/009 (1996).
- Committee Report: Membrane Processes - AWWA Membrane Technology Research Committee - AWWA Journal, Vol. 90, pp. 91-105. (June, 1998).
- DAF pretreatment: its effect on MF performance - BRAGHETTA A., JACANGELO J., CHELLAM S., HOTALING M., UTNE B. - AWWA Journal, Vol. 89, pp. 90-101. (October, 1997).
- Effect of pretreatment on surface water nanofiltration - CHELLAM S., JACANGELO J., BONACQUISTI T., SCHAUER B. - AWWA Journal, Vol. 89, pp. 77-89. (October, 1997).
- Electrodialisis - SCHOEMAN J., THOMPSON M. - Tratamiento del agua por procesos de membrana. Principios, procesos y aplicaciones. - AWWA, LdE, WRC (1998).
- Manual of Small Public Water Supply Systems - USEPA, Office of Water. EPA/570/9-91/003 (1991).
- Manual Técnico del Agua - Degremont (1979).
- Membrane Processes - CONLON W. - Water Quality and Treatment: A Handbook of Community Water Supplies - AWWA, Fourth Edition (1990).
- Microfiltración - JACANGELO J., BUCKLEY C. - Tratamiento del agua por procesos de membrana. Principios, procesos y aplicaciones. - AWWA, LdE, WRC (1998).
- Nanofiltration: from prototype to full scale - VENTRESQUE C., TURNER G., BABLON G. - AWWA Journal, Vol. 89, pp. 65-76. (October, 1997).
- Reactores de membrana-carbono en polvo activado - CLARK M., BAUDIN I., ANSELME C. - Tratamiento del agua por procesos de membrana. Principios, procesos y aplicaciones. - AWWA, LdE, WRC (1998).
- Recycling and Reuse of Material found on Superfund Sites - USEPA, Office of Research and Development. EPA/625/R-94/004 (1994)
- Tipos de operaciones de membranas - APTEL P., BUCKLEY C. - Tratamiento del agua por procesos de membrana. Principios, procesos y aplicaciones. - AWWA, LdE, WRC (1998).
- Transporte de masa, caudal de permeado y ensuciamiento en procesos impulsados por presión - WIESNER M., APTEL P. - Tratamiento del agua por procesos de membrana. Principios, procesos y aplicaciones. - AWWA, LdE, WRC (1998).
- Ultrafiltración - ANSELME C., JACOBS E. - Tratamiento del agua por procesos de membrana. Principios, procesos y aplicaciones. - AWWA, LdE, WRC (1998).
- Water and Wastewater Treatment - Kurita Water Industries, Japan (1978).