

**MÓDULO: GESTIÓN DE RESIDUOS**  
**TEMA: TRATAMIENTO DEL AGUA CON MEMBRANAS**

**DOCUMENTACIÓN ELABORADA POR:**  
**NIEVES CIFUENTES**

## ÍNDICE

### **1. INTRODUCCIÓN**

### **2. RANGO DE FILTRACIÓN**

### **3. MICROFILTRACIÓN Y ULTRAFILTRACIÓN**

### **4. NANOFILTRACIÓN**

### **5. ÓSMOSIS INVERSA**

#### **5.1. Membranas**

#### **5.2. Definiciones y Fórmulas**

#### **5.3. Diseño**

#### **5.4. Pretarataamiento**

#### **5.5. Proceso**

#### **5.6. Limpieza**

#### **5.7. Bombas de Alta Presión**

### **6. ELECTRODESIONIZACIÓN**

### **7. BIBLIOGRAFÍA**

## 1. INTRODUCCIÓN

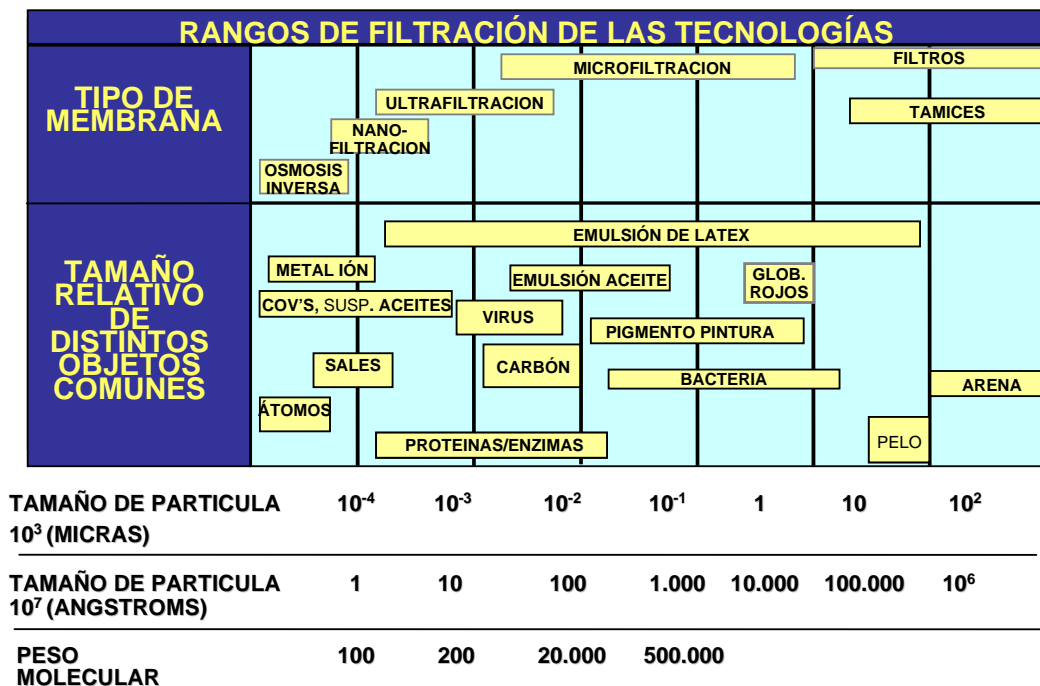
Desde su introducción a finales de los años 50, las membranas han ido aumentando su campo de aplicación dentro del tratamiento de aguas. La evolución en el desarrollo de las membranas ha mejorado su rendimiento y efectividad y ha contribuido a la reducción de los costes operacionales, haciendo de las membranas una de las tecnologías más avanzadas hoy en día en la industria del tratamiento de agua.

Las tecnologías de membranas utilizadas actualmente para el tratamiento del agua y en las que profundizaremos son la Microfiltración (MF), la Ultrafiltración (UF), la Nanofiltración (NF) y la Ósmosis inversa (OI).

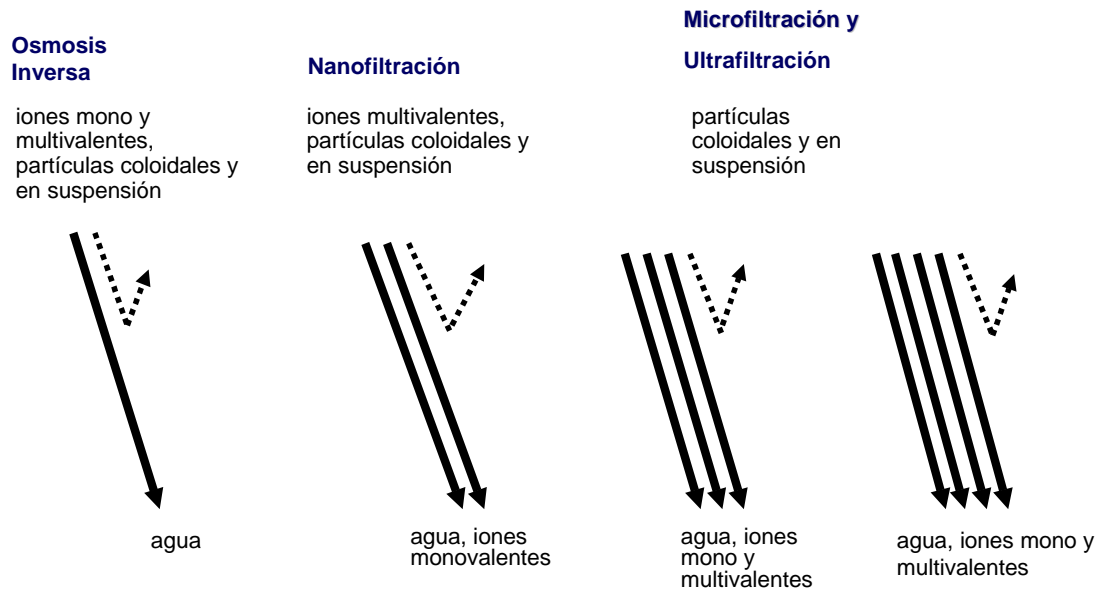
También trataremos otra tecnología, la Electrodesionización (EDI), que si bien no es una tecnología de membranas estrictamente, las utiliza para conseguir la desmineralización del agua y es una alternativa muy interesante frente a la desmineralización mediante intercambiadores iónicos convencionales.

## 2. RANGO DE FILTRACIÓN

Las distintas tecnologías de membrana se diferencian fundamentalmente en el rango de filtración. En la figura siguiente se muestran los rangos de filtración de las distintas tecnologías y se comparan con compuestos habituales:



Las tecnologías de filtración se diferencian, por tanto, por el nivel de retención y por los compuestos que dejan pasar y aparecen en la corriente producto, tal y como puede verse en la siguiente figura:



El elemento básico de estas tecnologías son las membranas, que se caracterizan por el tamaño de poro, material, forma y presión de trabajo. En la tabla siguiente se muestran los tipos de membranas utilizadas en las diferentes tecnologías:

	MF	UF	NF	RO
<b>Tamaño Poro <math>\mu\text{m}</math></b>	5 – 0,1	0,1 – 0,01	0,01–0,001	0,001-0,0001
<b>Material Membrana</b>	PVDF PP , PSO Cerámica	PVDF PP , PSO Cerámica	A.C. Polímeros Laminares	A.C. Polímeros Laminares
<b>Forma Membrana</b>	Tubular F. Hueca	Tubular F. Hueca Arrollado Espiral Disco	Tubular F. Hueca Arrollado Espiral Disco	Tubular F. Hueca Arrollado Espiral Disco
<b>Presión Trabajo</b>	< 2 Bar	1 – 10 Bar	5 – 35 Bar	8 – 100 Bar

### 3. MICROFILTRACIÓN Y ULTRAFILTRACIÓN

La Microfiltración (MF) y la Ultrafiltración (UF) son tecnologías que se diferencian únicamente en el nivel de retención de partículas, siendo las membranas, los equipos utilizados y su funcionamiento muy similares.

En las fotografías siguientes puede verse módulos estándar de MF/UF en configuración de tubos de presión, que es la más habitual:



Un sistema de MF/UF incluye los siguientes elementos:

- Módulos funcionales. La disposición más habitual de la MF/UF consiste en módulos o tubos de presión en cuyo interior se alojan las membranas. Los tubos pueden disponerse tanto horizontal como verticalmente (cuando la limpieza se realiza con aire). Otra configuración posible es cuando las membranas se encuentran sumergidas en el fluido a filtrar, si bien en la actualidad sólo resulta interesante económicamente para grandes caudales de tratamiento.
- Equipo de bombeo.
- Sistema de contralavado, que puede ser de aire, agua o mixto.
- Sistema de almacenamiento y dosificación de reactivos para la limpieza química de las membranas
- Sistema de almacenamiento y dosificación de coagulante y/o floculante, que en determinadas situaciones pueden utilizarse para optimizar la separación de sólidos.

Dentro de este tipo de sistemas, existen diferentes variantes según la dirección y el flujo de filtración, así pueden diferenciarse:

Según la dirección de filtración, los sistemas pueden ser:

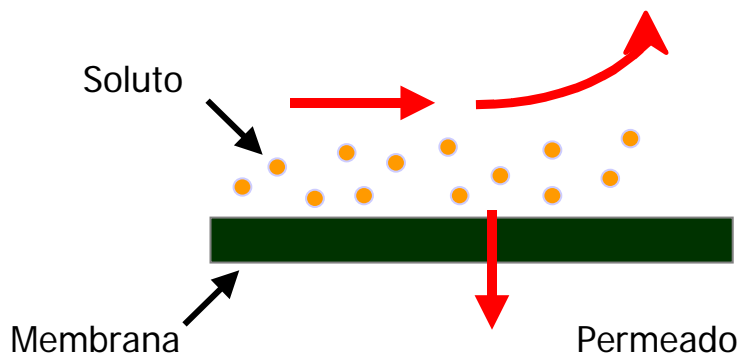
- De fuera a dentro
- De dentro a fuera

En función del flujo, se distingue entre:

- Filtración directa: La dirección del flujo es perpendicular al medio filtrante y las partículas son retenidas en la superficie de éste.



- Filtración tangencial: La dirección del flujo es paralela a la superficie del filtro. Así, el flujo tangencial arrastra las partículas de la superficie de la membrana minimizándose el ensuciamiento de la misma. En este tipo de filtración hay un caudal de rechazo, que puede ser de hasta un 10% del caudal total, lo que se traduce en un consumo energético importante, si bien tiene la ventaja de mantener en suspensión los sólidos que van quedando en el concentrado y los que se desprenden de la pared filtrante después de cada lavado en contracorriente. Este modo de operación es el más adecuado para el tratamiento de aguas residuales industriales.



En toda instalación de MF/UF se busca el máximo rendimiento global de producción de permeado. No obstante los parámetros de funcionamiento que pueden proporcionar un caudal máximo de permeado también pueden afectar negativamente a la continuidad del proceso. Por ejemplo, un exceso de presión transmembrana aumenta puntualmente la producción de permeado pero favorece el ensuciamiento de las membranas. Por este motivo es necesario estudiar en cada caso la combinación de variables con un resultado más efectivo en el tiempo.

Con el fin de eliminar las partículas que van quedando retenidas en la superficie del filtro y evitar la colmatación del mismo es necesario realizar lavados periódicos:

- Retrolavados con agua o con agua/aire: consiste en el lavado de las membranas a contracorriente. Se llevan a cabo de manera automática y son muy frecuentes.
- Lavados químicos: después de un número de horas de funcionamiento de la filtración, variable según las condiciones de trabajo, las membranas llegan a un grado de colmatación elevado y el caudal de permeado disminuye a valores inferiores a la producción mínima aceptable. El retrolavado ya no es suficiente para mantener el sistema en valores de caudal medio. Cuando esto ocurre, la filtración es detenida y se procede a efectuar un lavado intenso de las membranas, que consiste en vaciar el circuito y cargarlo nuevamente con solución de reactivo en recirculación (aproximadamente 1 h). El tipo de reactivo a utilizar varía en función de las aguas, si bien los más usados son: ácidos fuertes o débiles, álcalis fuertes, oxidantes fuertes y desengrasantes. Existen productos comercializados cuya mezcla de componentes está estudiada para conseguir la mayor efectividad según el tipo de ensuciamiento que se presenta en la membrana. No obstante el tratamiento de aguas residuales industriales lleva consigo una variabilidad tan grande en su composición que a menudo ello comporta la realización de un estudio de lavado químico a partir de la mezcla de diferentes reactivos con el fin de conseguir la mayor eficacia.

#### 4. NANOFILTRACIÓN

Funcionalmente, la Nanofiltración es muy similar a la ósmosis inversa. La única diferencia entre estas dos tecnologías es el rango de separación: la Nanofiltración es capaz de separar iones multivalentes pero no monovalentes, mientras que la ósmosis inversa retiene ambos.

Las aplicaciones para los sistemas de NF son:

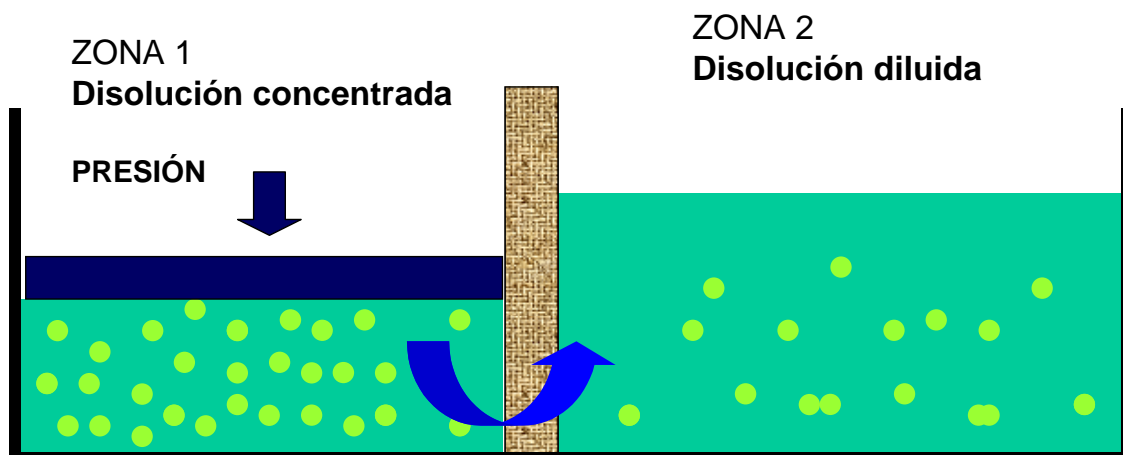
- Ablandamiento
- Separación específica de metales pesados para la reutilización del agua.
- Reducción de contenidos de sales de la ligera agua salobre

La configuración y funcionamiento de la Nanofiltración es igual a la ósmosis inversa, por lo que es válido todo lo indicado en el capítulo siguiente a este respecto.

## 5. ÓSMOSIS INVERSA

La ósmosis inversa es una modificación de un proceso natural conocido como ósmosis, que consiste en que cuando dos disoluciones de una sustancia con distinta concentración se ponen en contacto tiene lugar el fenómeno de difusión: las concentraciones de las disoluciones tienen a igualarse. La fuerza que hace que las moléculas pasen de un lado a otro de la membrana se denomina presión osmótica.

La ósmosis inversa utiliza un tipo especial de membranas llamadas semipermeables, que tienen la propiedad de dejar pasar el agua pero no de las sales. Si se ponen en contacto dos soluciones con diferente concentración a través de una membrana semipermeable y se aplica una presión suficiente a la solución concentrada es posible invertir el proceso de ósmosis, de manera que el agua pase de la solución más concentrada a la más diluida. Este proceso, conocido como ósmosis inversa, requiere de la aplicación de una presión suficiente para contrarrestar la presión osmótica e invertir el proceso de ósmosis que se daría de forma natural. En la siguiente figura se esquematiza el proceso:



Un sistema de OI está formado por los siguientes elementos:

- Filtros de cartuchos previos para proteger las membranas.
- Módulos funcionales. La disposición de la OI consiste en módulos o tubos de presión en cuyo interior se alojan las membranas.
- Equipo de bombeo, con o sin sistema de recuperación de energía.
- Tanque de desplazamiento de salmuera.



- Sistema de lavado químico de membranas (puede ser común a la MF/UF).
- Sistema de almacenamiento y dosificación de bisulfito sódico para la eliminación del cloro.
- Sistema de almacenamiento y dosificación de antincrustante para prevenir las incrustaciones en la superficie de las membranas.

En las fotografías siguientes puede verse sistemas de OI:

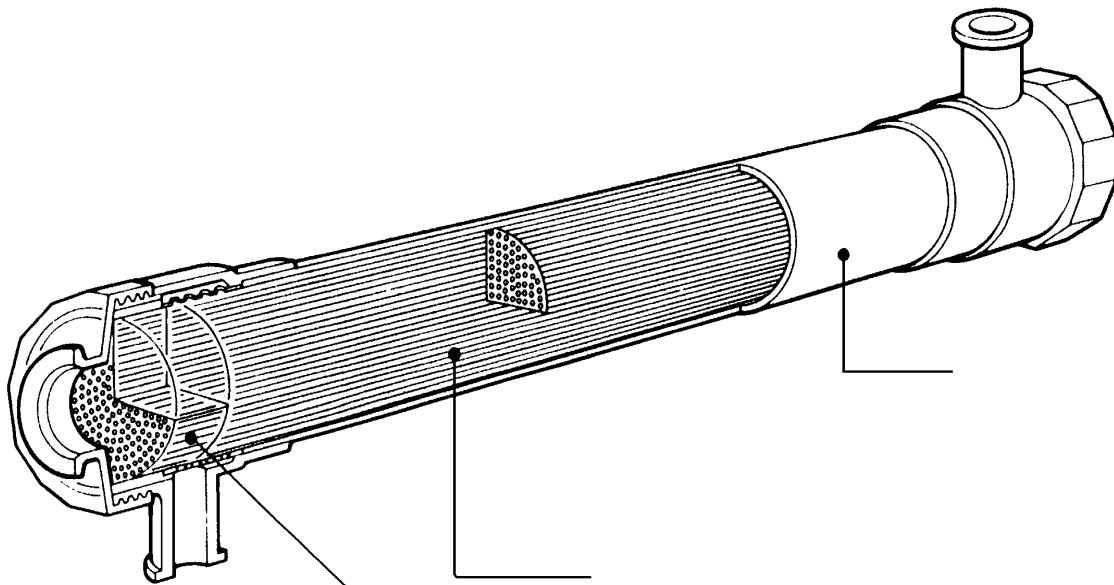


## 5.1. Membranas

El elemento fundamental en la ósmosis inversa son las membranas, que se disponen en módulos en el interior de unos tubos de presión. Existen diversas configuraciones de módulos, siendo las más utilizadas actualmente en el tratamiento de agua las de fibra hueca y las de arrollamiento en espiral.

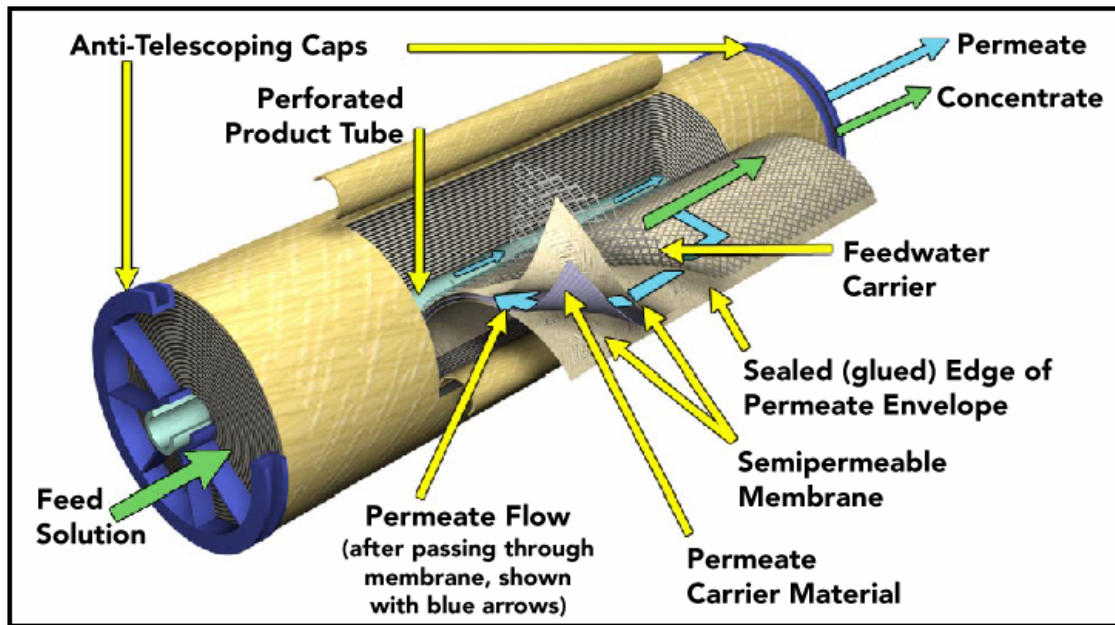
### 5.1.1. Tipos de módulos

Se llaman así por que se fabrican con cientos de miles de membranas de fibra hueca dobladas en forma de U y colocadas paralelamente a un tubo central. Las membranas se fijan en ambos extremos mediante resina epoxi para dar estabilidad al haz. En la figura siguiente se representa un módulo de este tipo:

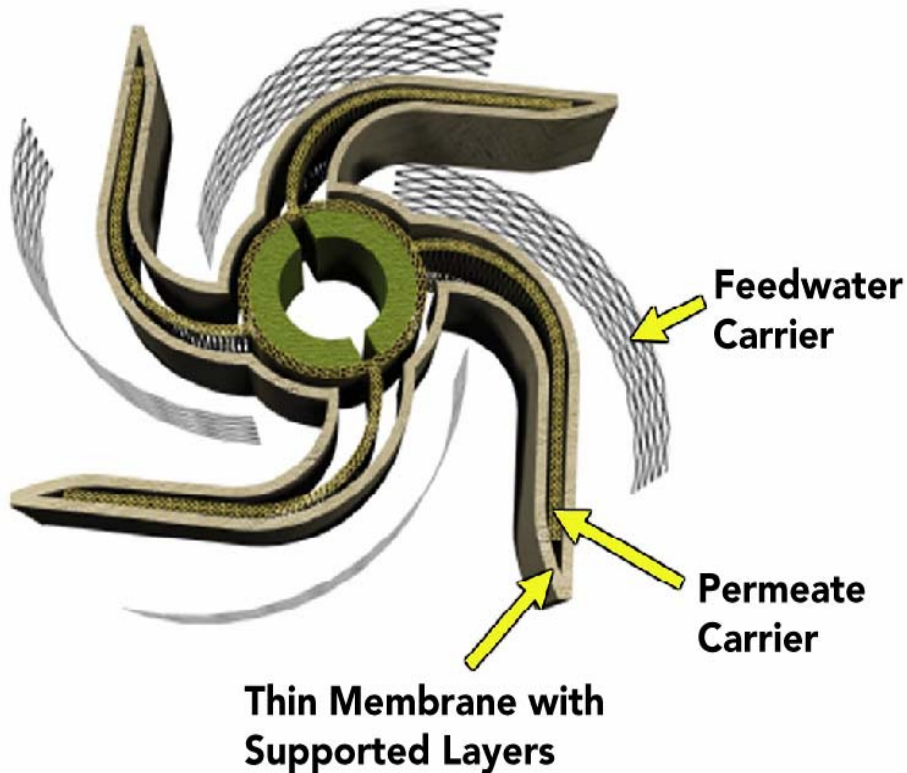


La solución de aporte se introduce a presión en el tubo central, repartiéndose homogéneamente a través de todo el haz de fibras. Cuando la solución entra en contacto con la superficie exterior de la fibra, donde se encuentra la capa activa, una parte de la misma atraviesa la fibra, moviéndose por su interior hueco hasta un extremo abierto.

Esta configuración se llama así porque está formada por membranas planas enrolladas en espiral alrededor de un tubo central. En la figura siguiente se representa la estructura de una membrana de este tipo:

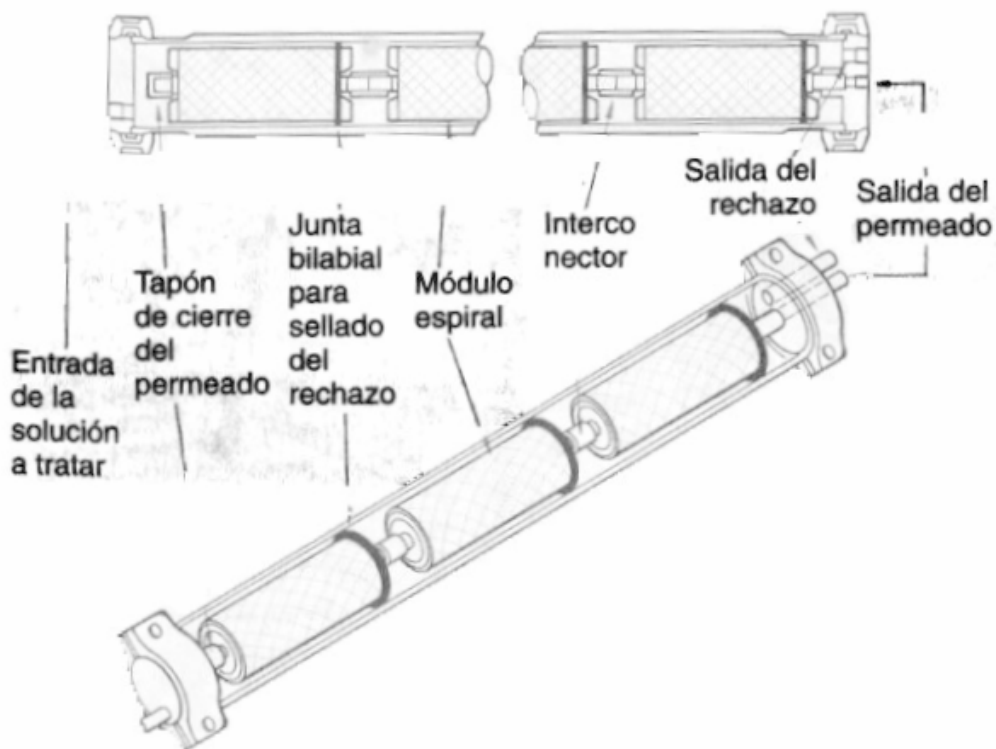


Cada módulo consta de unas láminas rectangulares de membrana semipermeable dobladas por la mitad, de forma que la capa activa quede en su exterior. Entre las dos mitades se coloca un tejido provisto de diminutos canales para recoger el permeado que atraviesa la membrana y conducirlo hasta el tubo central de recogida. Encima de la capa activa se coloca una malla provista de canales de distribución para repartir homogéneamente la solución de aporte sobre toda la superficie de la membrana. En la figura siguiente se representa la estructura de la membrana.



Para conseguir la estanqueidad entre la solución de aporte y el permeado se colocan en los laterales de la misma cordones de cola. El paquete así formada se enrolla alrededor del tubo central, dando lugar a un cilindro al que se le colocan dos dispositivos prácticos en los extremos para evitar su deformación, tras lo que se recubre el conjunto con una resina epoxi con fibra de vidrio para darle la rigidez y resistencia mecánicas necesarias.

Los módulos se interconexionan en serie dentro de un tubo destinado a soportar la presión de trabajo, como se muestra en la figura siguiente:



En el interior de cada tubo de presión pueden instalarse hasta 7 u 8 módulos, alcanzándose longitudes totales superiores a los 7 metros. En la siguiente fotografía puede verse un tubo de presión:



En la actualidad los módulos espirales son los más utilizados, debido a que pueden estar normalizados y pueden ser sustituidos por otras marcas. Los módulos de fibra hueca, por el contrario, no son intercambiables, por lo que se está ligado durante toda la vida útil de la planta al fabricante de los mismos y a sus precios.

### 5.1.2. Materia de las membranas

Respecto al material de las membranas, los más utilizados son el acetato de celulosa y la poliamida. En la tabla siguiente se resumen las ventajas e inconvenientes de cada una de ellas:

	VENTAJAS	INCONVENIENTES
Acetato de celulosa	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Alta permeabilidad</li> <li>- Alto porcentaje de rechazo de sales</li> <li>- Tolerancia la cloro libre</li> <li>- Bajo costo</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Alta sensibilidad a la hidrólisis</li> <li>- Posibilidad de degradación</li> <li>- Alto riesgo de disolución de la membrana</li> <li>- Aumento de paso de sales con el tiempo</li> <li>- Elevadas presiones de trabajo</li> </ul>
Poliamida	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Alto porcentaje de rechazo de sales</li> <li>- Ausencia de hidrólisis</li> <li>- No biodegradabilidad</li> <li>- Alta estabilidad química</li> <li>- Constancia de paso de sales a lo largo del tiempo</li> <li>- Presiones de trabajo reducidas</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Sensibilidad frente a los oxidantes (Cl)</li> <li>- Fácil ensuciamiento y aparición de desarrollos biológicos</li> <li>- Alto costo</li> </ul>

### 5.2. Definiciones y fórmulas

- Permeado o producto: es la solución que se obtiene al otro lado de la membrana.
- Rechazo o salmuera: es la solución concentrada que no puede atravesar la membrana.
- Coeficiente de permeabilidad: es el volumen de agua que atraviesa la membrana por unidad de superficie, tiempo y presión a una T<sup>a</sup> y salinidad determinadas (m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup> h bar).
- Flujo: es la cantidad de agua producida por unidad de área de membrana. Suele expresarse en GDF (galones USA por pie cuadrado y día). En la siguiente tabla se indican los flujos típicos para diferentes tipos de agua:

TIPO DE AGUA	FLUJO (GDF)
Agua superficial dulce (río, lagos, embalses, etc.)	8 -12
Agua de pozo (baja turbidez)	14 -18
Permeado de OI	20 -30
Agua de mar	7 -10

- Porcentaje de recuperación o factor de conversión: cociente expresado en % entre el caudal de permeado y el caudal de aportación que llega a las membranas.

$$\% \text{ recuperación} = \frac{\text{Caudal permeado}}{\text{Caudal aportación}} * 100$$

Si una planta trabajase con un porcentaje de recuperación del 75% quería decir que de cada 100 m<sup>3</sup>/h de solución aporte que llega a las membranas, se obtendrían 75 m<sup>3</sup>/h de permeado y 25 m<sup>3</sup>/h de rechazo.

Para desalación de agua de mar el porcentaje de recuperación suele estar entre el 40% y 45% mientras que para agua dulce puede llegarse hasta el 75% u 80%.

- Porcentaje de rechazo de sales: cociente expresado en % entre la concentración de la solución de aporte menos la del permeado y la concentración de la solución de aporte.

$$\% \text{ rechazo} = \frac{\text{Caudal aportación} - \text{Caudal permeado}}{\text{Caudal aportación}} * 100$$

- Factor de conversión: número de veces que se concentran las sales en el rechazo.

$$\text{Factor conversión} = \frac{\text{Caudal rechazo}}{\text{Caudal aportación}}$$

### 5.3. Diseño

Los pasos a seguir para el diseño de un sistema de OI son los siguientes:

1. Caracterizar el agua a tratar. Es la etapa más crítica del diseño y donde suelen producirse la mayoría de los errores, ya que es fundamental conocer en profundidad las características del agua a tratar. Los parámetros fundamentales son:
  - pH
  - Temperaturas mínimas y máximas
  - SDI
  - Conductividad
  - Concentración (mg/l) de: sólidos en suspensión, Ca, Mg, Na, K, NH<sub>4</sub>, Ba, Sr, H<sub>2</sub>S, CO<sub>3</sub>, HCO<sub>3</sub>, SO<sub>4</sub>, Cl, F, NO<sub>3</sub>, SiO<sub>2</sub> y Fe.
2. Seleccionar el tipo de membrana y el fabricante más adecuados al proyecto en función de las características del agua.
3. Obtener el flujo de la membrana para el agua a tratar (proporcionado por el fabricante o obtenido mediante programas de cálculo específicos).
4. Calcular el número de módulos necesarios en función del caudal a tratar, del flujo de la membrana seleccionada y de la superficie activa de cada módulo, según la siguiente expresión:

$$N^{\circ} \text{ módulos} = \frac{\text{Caudal a tratar}}{\text{Flujo} * \text{Superficie activa módulo}}$$

5. Calcular el número de tubos de presión necesarios (generalmente suelen llevar de 6 a 8 módulos).

#### 5.4. Pretratamiento

El correcto funcionamiento de la ósmosis inversa depende en gran medida del pretratamiento. En este sentido, el pretratamiento ideal es la MF/UF, si bien por razones económicas es habitual utilizar la filtración a presión. En éste caso es necesario disponer tras la filtración y antes de la OI unos filtros de cartucho de un tamaño de paso de 5 µm para proteger las membranas.

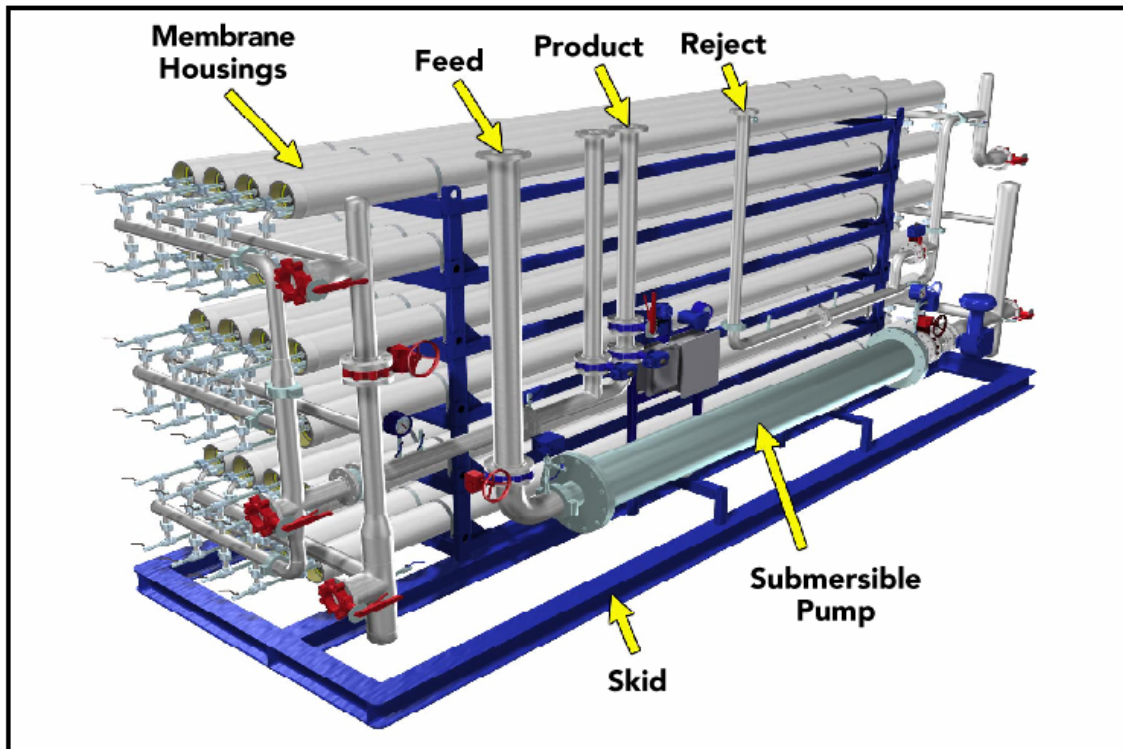
Uno de los parámetros importantes para definir la eficacia del pretratamiento es el SDI (índice de atascamiento). Este índice se calcula a partir de la velocidad de atascamiento que sufre una membrana Millipore de 0,45 micras de selectividad al ser atravesada por una solución a una presión de 2,07 bar. La medida del SDI es el mejor método para evaluar la concentración de coloides. El SDI a la entrada a la OI debería ser igual o inferior a 3.

Como vimos anteriormente, las membranas son susceptibles de ser oxidadas y dañadas por oxidantes como el cloro. Dado que es habitual el empleo de este tipo de reactivos en el pretratamiento para inhibir el crecimiento de microorganismos, es necesario eliminarlos totalmente del agua previamente a la entrada de ésta en la OI. Para ello se suele dosificar bisulfito sódico.

Con el fin de prevenir la precipitación de sales en la superficie de las membranas es habitual dosificar a la entrada en la ósmosis inversa reactivos antincrustantes. Generalmente se trata de formulaciones comerciales, si bien en plantas que requieren gran consumo suele utilizarse ácido sulfúrico.

### 5.5. Proceso

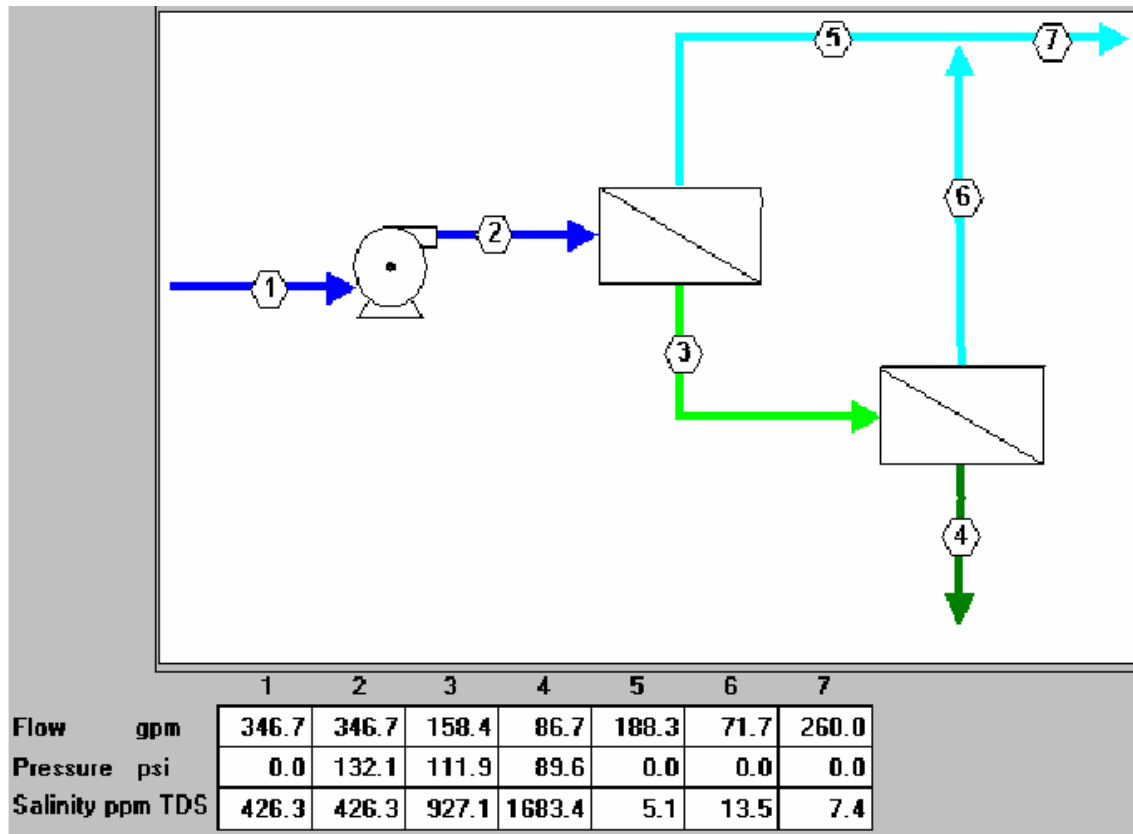
En la figura siguiente se representa una unidad de OI:



Los tubos de presión que trabajan en paralelo a la misma presión y alimentados desde la misma línea se denominan etapas.

Es habitual que las plantas de OI de agua dulce tengan dos etapas con el fin de aumentar el porcentaje de recuperación del sistema. La segunda etapa consiste en hacer pasar el rechazo de lo primera etapa a través de otros módulos de membranas produciéndose agua producto y minimizándose el caudal de rechazo, como se representa en la figura siguiente:





Los sistemas de OI pueden ser de uno varios pasos, cuando el agua atraviesa varias membranas de ósmosis inversas consecutivamente. Así, para aguas muy cargadas de sales puede ser necesario disponer, por ejemplo, dos pasos de OI, de manera que el agua producto del primer paso sea conducida a través de otros módulos de OI con el fin de retener mayor cantidad de sales y aumentar la calidad del producto.

Para no confundir los conceptos de etapa y paso es muy útil contar cuántas veces ha atravesado una membrana de ósmosis el agua producto, siendo éste el número de pasos del sistema.

### 5.6. Limpieza

Cuando el rendimiento de la planta de ósmosis inversa desciende por debajo de unos determinados límites es necesario limpiar para restaurar sus condiciones de funcionamiento.

Las fuentes potenciales de ensuciamiento son:

- Precipitaciones: de sales minerales u óxidos metálicos (Fe, Mn, Al).
- Depósitos: cuando quedan atrapadas en el interior de los módulos partículas de gran tamaño, coloides o desarrollos biológicos.
- Ensuciamientos extraños: azufre coloidal (oxidación del H<sub>2</sub>S del agua por cloro o aire), compuestos orgánicos y aceites y grasas.

Pueden distinguirse dos tipos de limpieza:

- Limpieza con permeado a presión (flushing): consiste en hacer llegar a las membranas siguiendo el mismo camino de la solución a tratar permeado. Se suele hacer en las paradas para desplazar la solución concentrada del interior de los módulos y tuberías y evitar la corrosión y la precipitación de sales. En plantas de agua de mar es habitual instalar un depósito elevado (depósito de compensación) lleno de agua desalada de manera que en caso de parada el agua desalada desplace la salmuera aún si hay un fallo de alimentación eléctrica.
- Limpieza química: consiste en recircular a través de los módulos una serie de productos químicos capaces de disolver las precipitaciones o eliminar los depósitos existentes en las membranas. El producto químico a utilizar depende de la naturaleza de las sustancias atascantes, siendo los más utilizados: ácido clorhídrico, ácido cítrico, detergente no iónico, etc.

El sistema de limpieza está formado por:

- Tanque de limpieza
- Filtro de cartucho
- Bomba dosificadora
- Tuberías y válvulas



Dado que la limpieza química es una operación que no es habitual (una vez cada 4 o 6 meses) es frecuente que las conexiones de limpieza sean temporales.

### 5.7. Bombas de alta presión

Las bombas de alta presión son el corazón de la planta de ósmosis inversa, ya que impulsan la solución a tratar hacia las membranas a la presión requerida por éstas. Es en el bombeo donde se consume la mayoría de la energía del proceso, por lo que la elección de la bomba a instalar tiene una gran importancia. A la hora de seleccionar las bombas hay que tener en cuenta distintos parámetros como su rendimiento, la inversión necesaria, el mantenimiento requerido, la disponibilidad, los niveles de ruido y vibraciones, etc. Las bombas utilizadas en los sistemas de OI son de desplazamiento positivo o centrífugas, tanto de segmentos como de cámara partida. En la tabla siguiente se indican las ventajas e inconvenientes de cada uno de estos tipos:

TIPO DE BOMBA	VENTAJAS	INCONVENIENTES
Desplazamiento positivo	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Alto rendimiento hidráulico (&gt;90%)</li> <li>• Bajo consumo de energía</li> <li>• Se adaptan al ensuciamiento de las membranas reduciendo la presión sin necesidad de ningún sistema de control</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Suministran un caudal y una presión pulsados.</li> <li>• Mantenimiento frecuente y costoso (cambio empaquetaduras y émbolos)</li> <li>• Riesgo de que lleguen a las membranas partículas de las empaquetaduras.</li> <li>• Vibraciones y ruido</li> </ul>
Segmentos (centrífugas)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Económicas</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Bajo rendimiento hidráulico (&lt;80%)</li> <li>• Para mantenimiento es necesario desmontar tuberías y toda la bomba.</li> <li>• Riesgo corrosión entre los segmentos.</li> </ul>
Cámara partida (centrífugas)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Buen rendimiento hidráulico</li> <li>• Muy robustas</li> <li>• Fácilmente desmontables</li> <li>• Fáciles de mantener</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Inversión elevada</li> <li>• Repuestos caros</li> </ul>

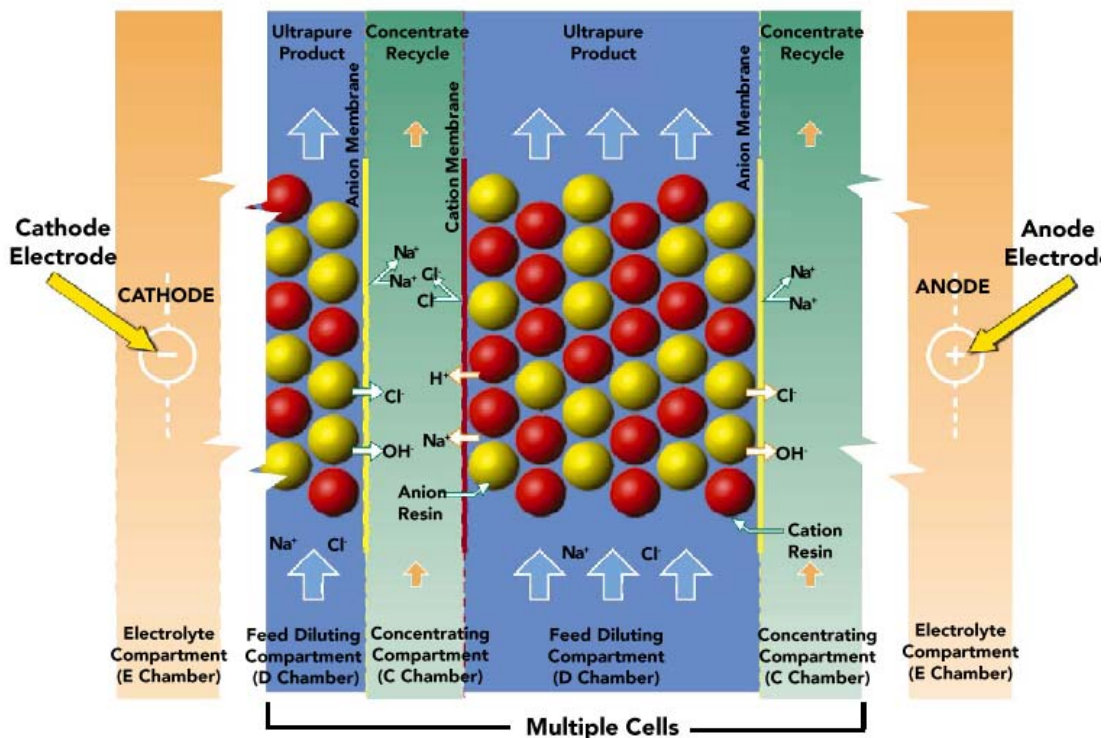
Dado que gran parte de los costes de funcionamiento de la ósmosis inversa corresponden a la energía eléctrica consumida en el bombeo a alta presión, para ahorrar costes se puede incorporar sistemas que permitan recuperar la energía que, en forma de presión, posee el rechazo a la salida de los módulos. Los más habituales son las turbinas Pelton y los intercambiadores de presión. Estos sistemas empiezan a resultar interesantes económicamente para presiones de trabajo por encima de 20 bar.

## 6. ELECTRODESIONIZACIÓN

La Electrodesionización es la evolución del proceso de intercambio iónico convencional. Mediante la EDI puede producirse de manera continua agua desmineralizada con un rendimiento mínimo del 90%. Al igual que en el intercambio iónico convencional, los cationes y aniones del agua tratada son cambiados por grupos  $H^+$  y  $OH^-$  por resinas de intercambio iónico, produciéndose la desmineralización del agua. La diferencia fundamental es que en la EDI las resinas se están regenerando en continuo mediante energía eléctrica, mientras que en la convencional es necesario interrumpir el proceso de desmineralización para llevar a cabo la regeneración utilizando productos químicos.

En la EDI la regeneración en continuo es posible al existir membranas selectivas de iones y un campo eléctrico permanente.

Para comprender el proceso es necesario entender la estructura de los módulos de EDI. Cada módulo de EDI consiste en múltiples compartimentos de resinas de intercambio iónico limitados por membranas, con canales de recogida intermedios entre dos electrodos, tal u como puede verse en la figura siguiente:

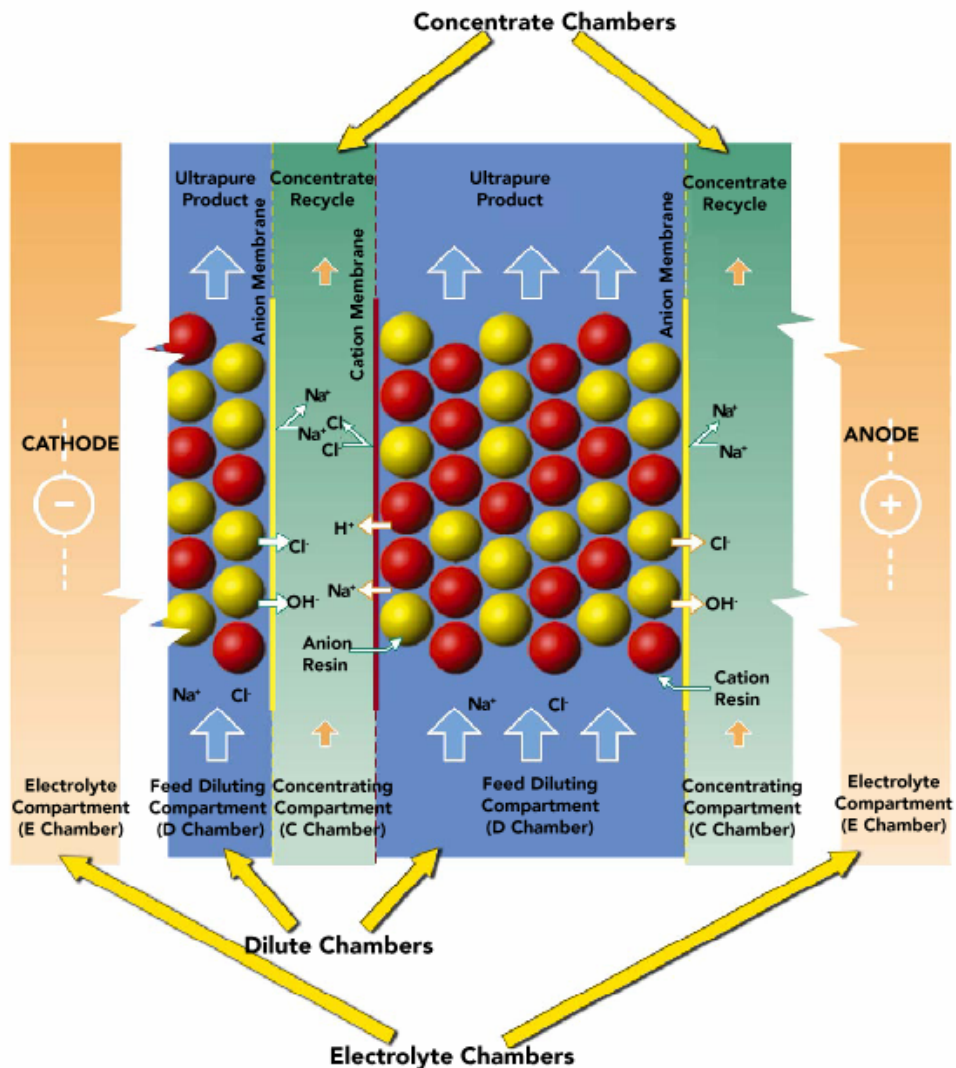


Los electrodos se localizan en los extremos del módulo y generan un campo eléctrico a través del agua que pasa por las celdas. El cátodo, cargado positivamente, atrae a los aniones y el ánodo, de carga negativa, a los cationes.

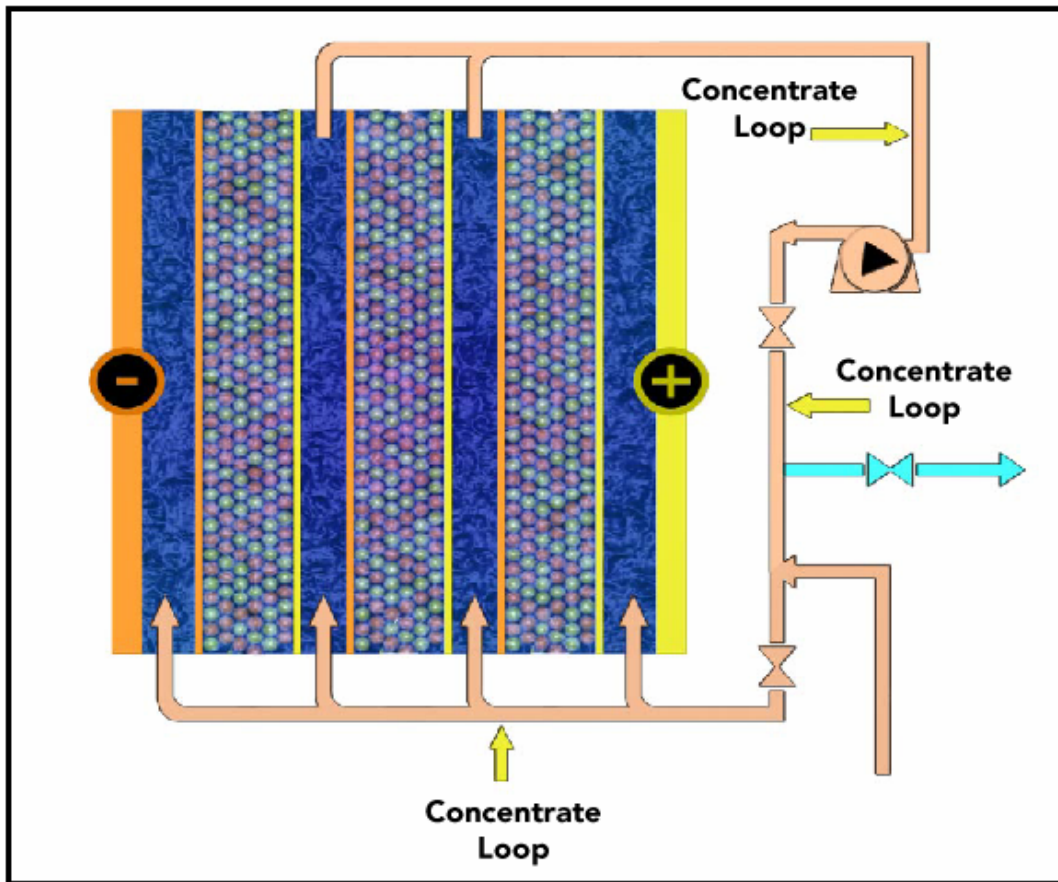
Las membranas que separan los compartimentos son de dos tipos: membranas aniónicas y membranas catiónicas. Las membranas catiónicas sólo permiten el paso de los cationes o iones

positivos mientras que las aniónicas sólo dejan pasar aniones, no dejando pasar ninguna de las dos el agua.

Las membranas se disponen separando los distintos compartimentos. Hay tres tipos de compartimentos: diluido (D), concentrado (C) y electrolito (E), como puede verse en la figura siguiente:



El agua a tratar es alimentada al compartimento diluido, que contiene resinas catiónicas y aniónicas comprimidas entre una membrana catiónica y otra aniónica. Las resinas captan los iones que van moviéndose entre ellas hacia el electrodo de carga contraria. Cuando un ión atraviesa la membrana llega a un compartimento de concentrado, desde donde son extraídos. La mayor parte de éste caudal es reciclado junto con el agua de alimentación con el fin de minimizar el consumo eléctrico, tal y como puede verse en la figura siguiente:



Un módulo de EDI está formado por múltiples celdas, cada una de las cuales consta de un compartimento de diluido (D), otro de concentrado (C) y una membrana catiónica y otra aniónica.

Los últimos compartimentos, que son los más cercanos a los electrodos, son los de electrolito (E). Este compartimento recibe los iones que atraviesan las membranas de los compartimentos adyacentes, formándose en la cámara cercana al cátodo H<sub>2</sub> y en la del ánodo Cl<sub>2</sub>. Para evitar el ataque a las membranas por el cloro formado la corriente de las cámaras de electrolito son extraídas del sistema.

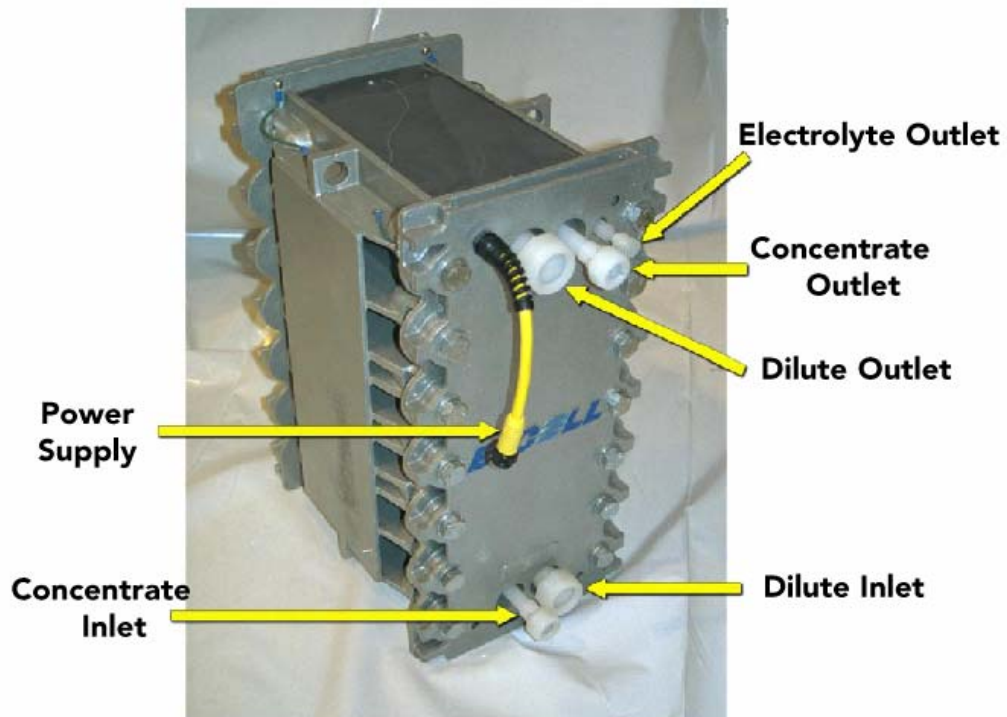
La regeneración de las resinas se produce de manera continua ya que el campo eléctrico hace que el agua se hidrolice y los iones resultantes sean adsorbidos por las resinas desplazando otros iones.

En comparación con el intercambio iónico convencional, la EDI tiene la ventaja de que no requiere productos químicos para la regeneración, por lo que no se producen corrientes contaminadas que sea necesario neutralizar. Además, es un proceso continuo en el que la calidad del agua producida se mantiene constante. El único punto débil de esta tecnología es que requiere un pretratamiento intensivo, generalmente una ósmosis inversa.

	EDI	INTERCAMBIO IÓNICO (LECHOS MIXTOS)
Necesidad de regeneración de resinas con químicos	NO	SI
Reactivos necesarios	Según el fabricante, solución concentrada de cloruro sódico, por lo que hay que instalar un pequeño tanque de dosificación. Limpiezas químicas anuales.	Ácido y sosa para regenerar
Efluentes del sistema	Purga salina que puede recircularse a cabeza de OI y una salmuera que hay que verter	Vertido de regeneración que precisa neutralización
Rendimiento	90%	98%
Calidad	Constante	Varía desde una calidad muy buena hasta que llega a los valores límite que disparan la regeneración
Operación	Continua	Cada cierto tiempo hay que regenerar.
Funcionamiento	Automático	Automático, si bien requiere controles visuales en la regeneración
Reposición	Es necesario reponer las pilas cada cierto tiempo (el periodo de garantía suele ser de 5 años)	Se reponen las resinas cada 4-5 años

El sistema de EDI consta de los siguientes elementos:

- Módulos de EDI en número suficiente para tratar el caudal necesario. La capacidad de tratamiento de cada módulo depende del fabricante. En la fotografía siguiente se muestra un módulo:



- Fuente de alimentación eléctrica
- Bombas
- Tuberías y válvulas
- Sistema de almacenamiento y dosificación de salmuera (según fabricantes)
- Sistema de limpieza química (puede ser común para la OI)

En la fotografía siguiente se muestra un sistema de este tipo capaz de tratar  $24 \text{ m}^3/\text{h}$  de agua ( $3 \text{ m}^3/\text{h}$  por módulo):





Al igual que con el resto de tecnologías, periódicamente (1 ó 2 veces al año) es necesario realizar la limpieza química de los módulos, para lo que se utiliza un tanque de limpieza que puede ser común a la OI.

## 7. BIBLIOGRAFÍA

- Ósmosis inversa. Fundamentos, tecnología y aplicaciones. N°18 Serie Electrotecnologías. Mc Graw Hill.
- [http://www.dow.com/products\\_services/industry/water.htm](http://www.dow.com/products_services/industry/water.htm)
- <http://www.membranes.com/>
- <http://www.gewater.com/library/tp/index.jsp>
- <http://www.toray.com/products/mizu/index.html>
- <http://www.desline.com/>
- [www.cadagua.es](http://www.cadagua.es)
- [www.ondeo.com](http://www.ondeo.com)
- [www.infilco.es](http://www.infilco.es)
- [www.ionics.com](http://www.ionics.com)
- [www.graver.es](http://www.graver.es)
- <http://www.deisa.es>
- [www.gruposeta.com](http://www.gruposeta.com)
- [www.veoliawater.com](http://www.veoliawater.com)
- [www.pall.com](http://www.pall.com)
- [www.fcca.es/emd](http://www.fcca.es/emd)