

**Núcleo de Ing. Biomédica  
Fac. de Medicina e Ingeniería  
Universidad de la República**

# **Introducción al sistema de Tratamiento de Agua para hemodiálisis**

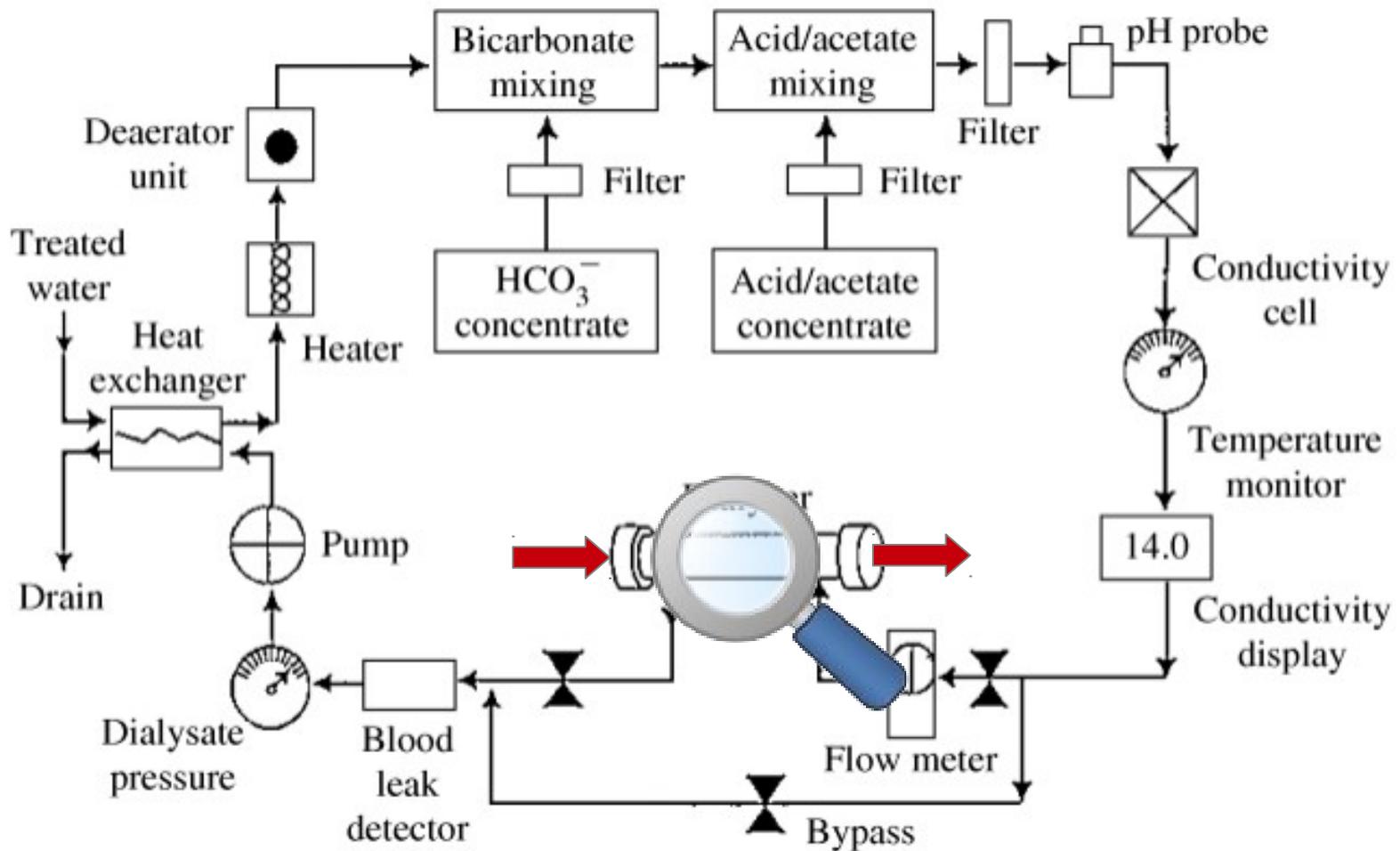
**Nov-2018**

**Ing. Jorge Lobo**

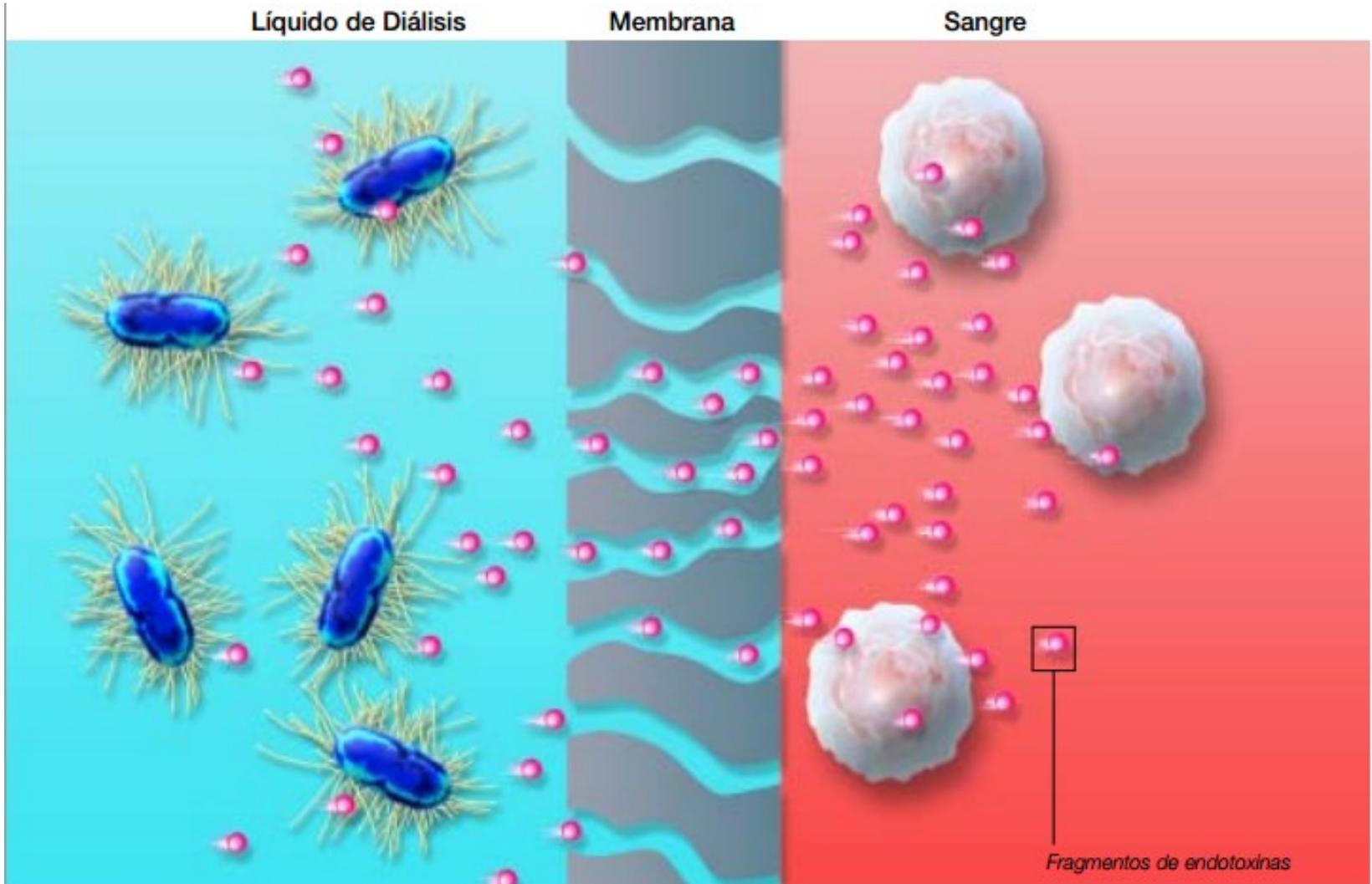
# Baño de hemodiálisis

- Es una solución electrolítica preparada por el monitor de hemodiálisis a **partir de agua purificada** y electrolitos disueltos.
- Entra en contacto con la sangre a través de la membrana semipermeable del dializador.
- Es la vía de intercambio de solutos con la sangre en forma bidireccional.

# Preparación LD



# Baño de hemodiálisis

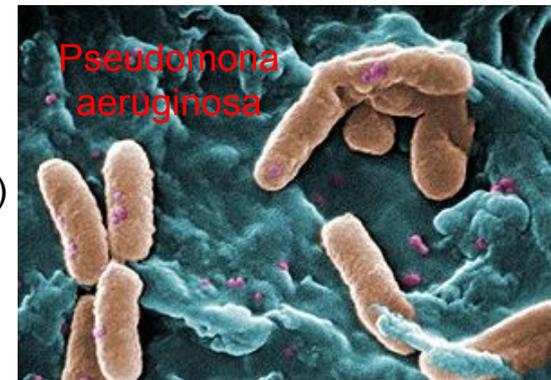


*Fig. 2: Fragmentos de endotoxinas bacterianas entran en el torrente sanguíneo del paciente y activan los leucocitos, de ese modo llevan a complicaciones agudas y crónicas en los pacientes en hemodiálisis.*

# Tabla de elementos contaminantes comunes en el agua

Contaminante	Presencia	Efectos	Agua potable (UY)	Agua para diálisis (AAMI RD62:2001)	Método de eliminación
<b>cloruros</b>	Eliminación de la contaminación bacteriana	Hémolisis Anemia hemolítica	250 mg/l	<b>0,1 mg/l</b>	Filtro de carbon
<b>Cloraminas (NH<sub>2</sub>Cl )</b>	Eliminación de contaminación bacteriana	Hémolisis Anemia hemolítica	--	<b>0,1 mg/l</b>	Filtro de carbon
<b>Pesticidas Mat. Orgánica Hidrocarburos</b>	Desechos industriales	Fiebre Hipertensión. Daños a la membrana de OI	10 µg/l	<b>0</b>	Filtro de carbon
<b>Pirógenos</b>	Muerte de bacterias	Fiebre Hipertensión	--	<b>0</b>	Filtro de carbon
<b>Endotoxinas</b>	Muerte de bacterias	Fiebre Hipertensión	--	<b>0</b>	Filtro de carbón
<b>Materia Inorgánica</b>	Poca filtrac. Plantas de agua	<b>Taponar tubos, dañar la OI</b>	10 mg/l (silice)	--	Filtro sedimentación
<b>Calcio</b>	Paso del agua por terrenos calcareos, pozos	Síndrome del agua dura (náuseas, vómitos, cefaleas)	500 mg/l (dureza total)	<b>2mg/l</b>	Ablandador
<b>Magnesio</b>				<b>4mg/l</b>	

Contaminante	Presencia	Efectos	Agua potable (UY)	Agua para análisis (AAMI RD62:2001)	Método de eliminación
<b>Fluoruros</b>	Erosión de Depósitos Naturales, fábricas	Osteomalacia	1,5 mg/l	<b>0,2 mg/l</b>	OI, desionizadores
<b>Sodio</b>	Aguas saladas,	Hipertensión, sed	200 mg/l	<b>70 mg/l</b>	OI, desionizadores
<b>Aluminio</b>	Floculante en la potabilización	Osteomalacia	0,2 mg/l	<b>0,01 mg/l</b>	OI, desionizadores
<b>Cobre</b>	Sulfato de cobre para matar algas, cañerías de cobre	Aneia hemolítica, leucocitas, etc	1 mg/l	<b>0,1 mg/l</b>	OI, desionizadores
<b>Plomo</b>	Viejas tuberías, Desechos industriales	Parálisis del sistema nervioso	0,3 mg/l	<b>5 µg/l</b>	OI, desionizadores



AAMI: Asociación for de Advancement of Medical Instrumentation ([www.aami.org](http://www.aami.org))

# Planta de tratamiento de agua

- Se hace necesario acondicionar el agua a ser utilizada.
- Existen diversas soluciones, dependiendo de la composición del agua de entrada.
- El siguiente ejemplo, es un modelo estándar que contiene algunas de las componentes más importantes.

# Clasificación del agua

- **Agua de aporte o bruta:**
  - Agua a tratar que puede provenir de una red, pozo o camiones cisterna.
- **Agua pre-tratada:**
  - Es el agua que ha sido sometida a todos los procesos previos a la Ósmosis Inversa (OI)
- **Agua pura o purificada\***
  - El recuento bacteriano del agua purificada debe ser inferior de 100 UFC/ml, y el de endotoxinas menor de 0,25 UE/ml. Debe tener una conductividad máxima de 4,3  $\mu\text{S}/\text{cm}$  a 20 °C. No necesariamente debe ser estériles y exentos de pirógenos.
  - Para dialisis  $5 < \text{pH} < 7$
  - **Mercosur:** Bacterias  $< 100$  UFC/ml y Conductividad: Igual o menor que 10  $\mu\text{S}/\text{cm}$  (MERCOSUR/GMC/RES. N° 28/00)

# Clasificación del agua (2)

## • Agua ultrapura\*

- Un contenido bacteriano de menos de 10 UFC/100 ml, una conductividad máxima es 1,1  $\mu\text{S}\cdot\text{cm}$ ; el carbón orgánico total máximo es 0,5 mg/l; nitratos máximo 0,2 ppm, y menos de 0,03 UE/ml

## • Agua ésteril:

- Es el agua libre de organismos vivos y esporas. Se define que contiene de  $1 \times 10^{-6}$  UFC/ml y  $< 0,03$  UE/ml

## • Agua de rechazo o “concentrado”:

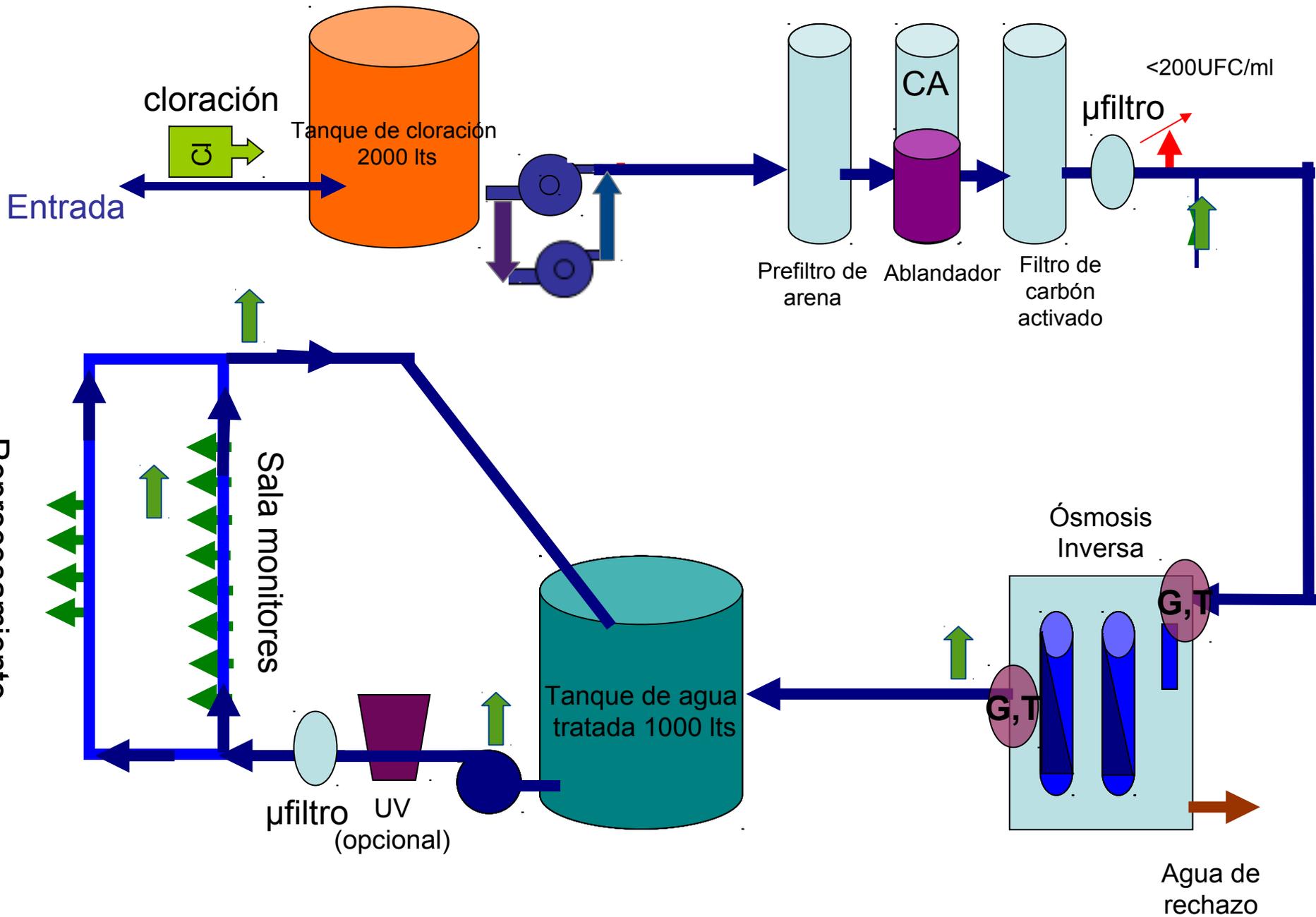
- Es el agua que no ha pasado a través de las membranas de ósmosis y que lleva la totalidad de las sales y contaminantes.

\* European Best Practices

Recomiendo leer la guía de tratamiento de Agua para diálisis:

[http://www.fnr.gub.uy/guia\\_agua\\_dialisis](http://www.fnr.gub.uy/guia_agua_dialisis)

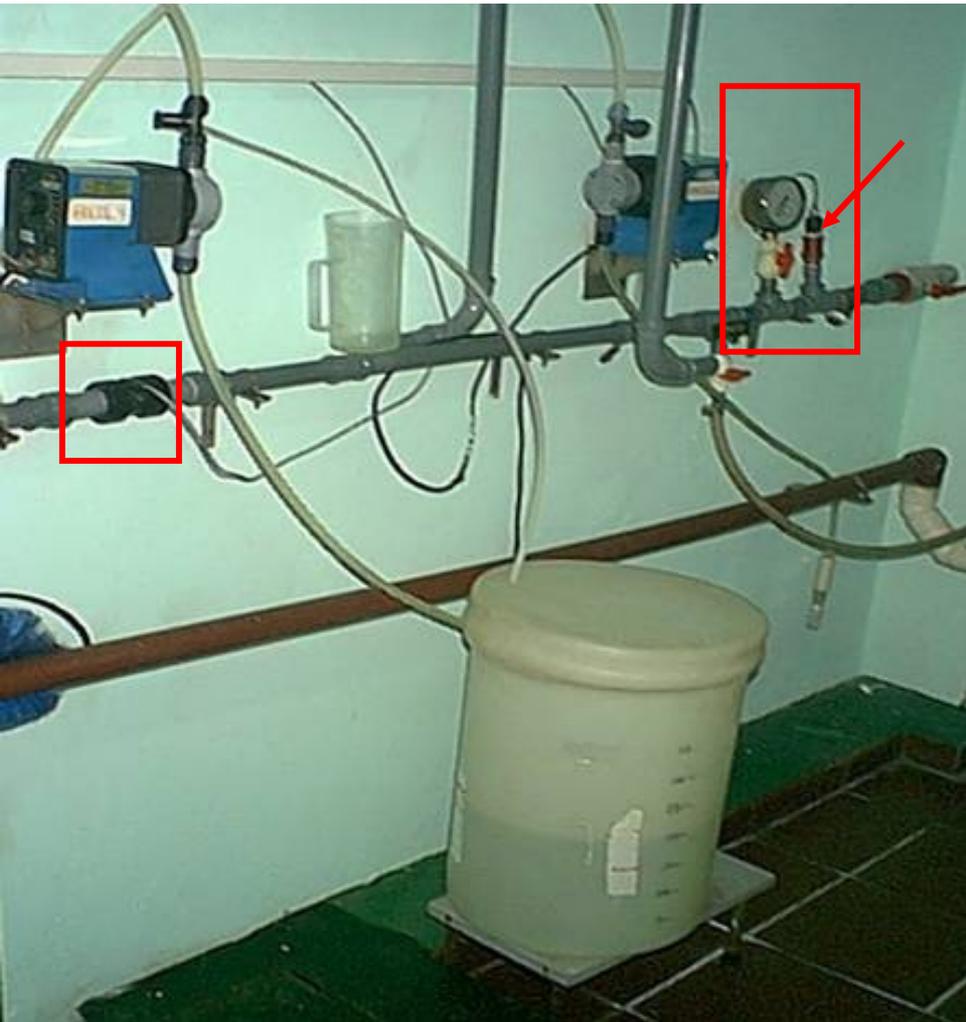
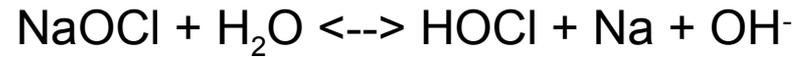
Reprocesamiento



# Cloración

- Se utiliza la cloración del agua a la entrada como desinfectante
- Bacterias coliformes, pseudomonas

A la salida del tanque la concentración de cloro debe ser 1-2ppm(1-2mg/lit)



# Dosificación de cloro

1 ppm de Cl en agua equivale a 1 gr de Cl en 1m<sup>3</sup> de agua

1 litro de solución comercial de hipoclorito de sodio contiene entre 50 y 100 gr de cloro según el fabricante

En caso de necesitar diluir la solución comercial en agua:

$$\text{Dilución} = \frac{\text{litros de solución comercial}}{\text{litros de agua} + \text{litros de solución comercial}}$$

Para determinar el caudal que debe entregar una bomba dosificadora para clorar un determinado caudal de agua:

$q$  = caudal de la bomba dosificadora **lts/hr**

$ppm$  = cantidad de cloro activo a inyectar en el agua, en **ppm**

$Q$  = caudal de agua a clorar en **m<sup>3</sup>/hr**

$C$  = concentración de cloro activo en la solución a agregar en **gr/lts**

$d$  = dilución (si no se diluye en agua  $d=1$ )

$$q = \frac{ppm \times Q}{C \times d}$$

# Dosificación de cloro ejemplo

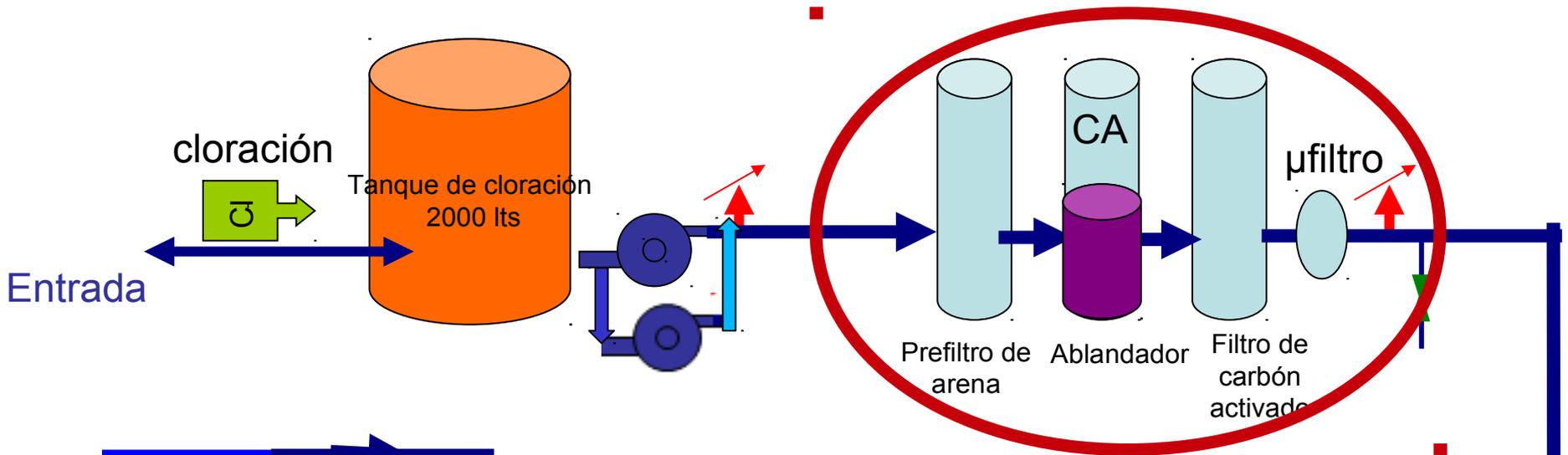
Con una bomba cuyo caudal nominal es de 6 lts/hr, se deben dosificar 1,5 ppm de cloro en el agua extraída por una bomba de pozo cuyo caudal es 25.000 lts/hr, a partir de una solución de hipoclorito de 100gr de cloro activo por litro.

$$q = \frac{1,5 \text{ ppm} \times 25 \text{ m}^3/\text{h}}{100 \text{ gr} \times 1} = 0,37 \text{ lts/hr}$$

Por razones operativas es conveniente que la bomba trabaje a un caudal mayor, entonces se diluye la solución comercial con agua. Sea 1 lt de esa solución de hipoclorito en 10 litros de agua.

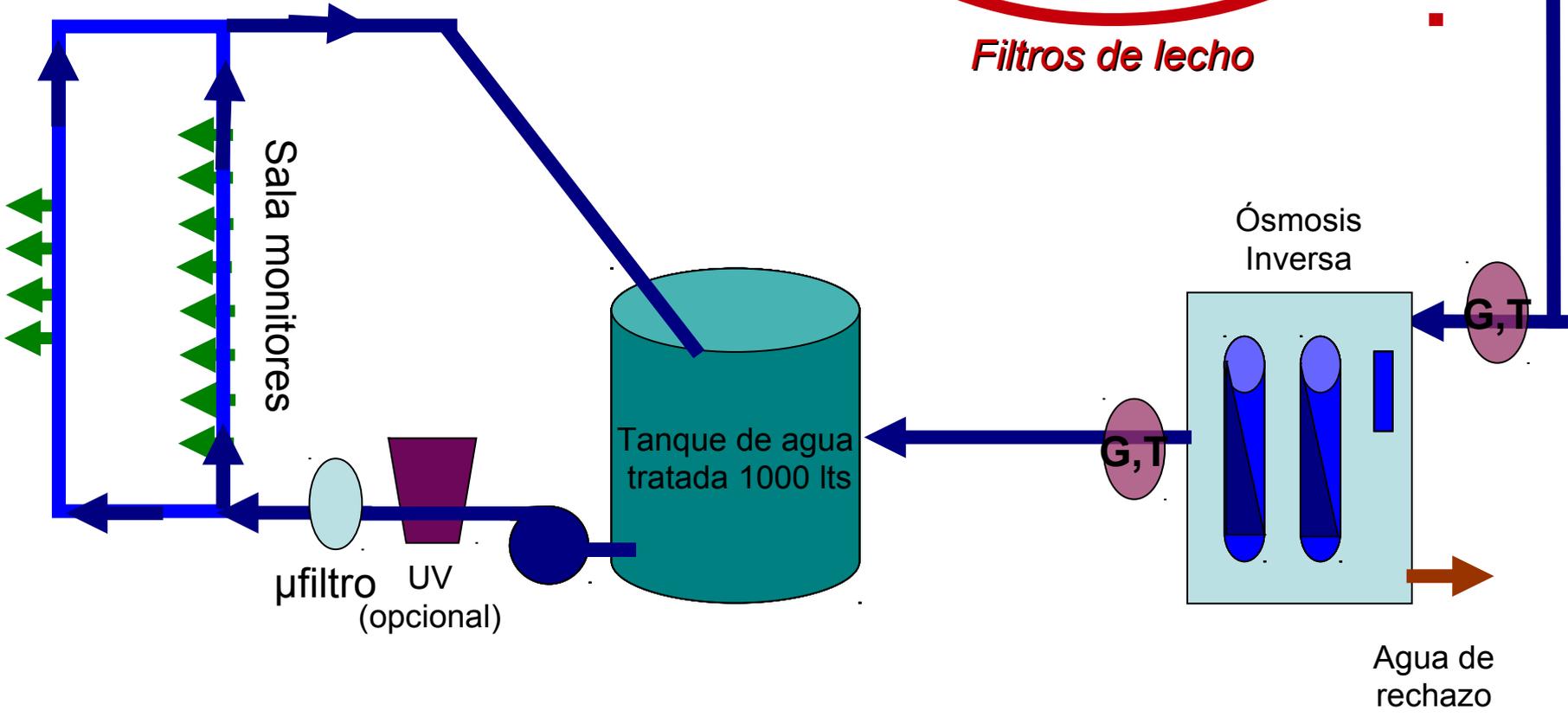
$$d = \frac{1}{10+1} = 0,091$$

$$q = \frac{1,5 \text{ ppm} \times 25 \text{ m}^3/\text{h}}{100 \text{ gr} \times 0,091} = 4,12 \text{ lts/hr}$$



**Filtros de lecho**

**Reprocesamiento**



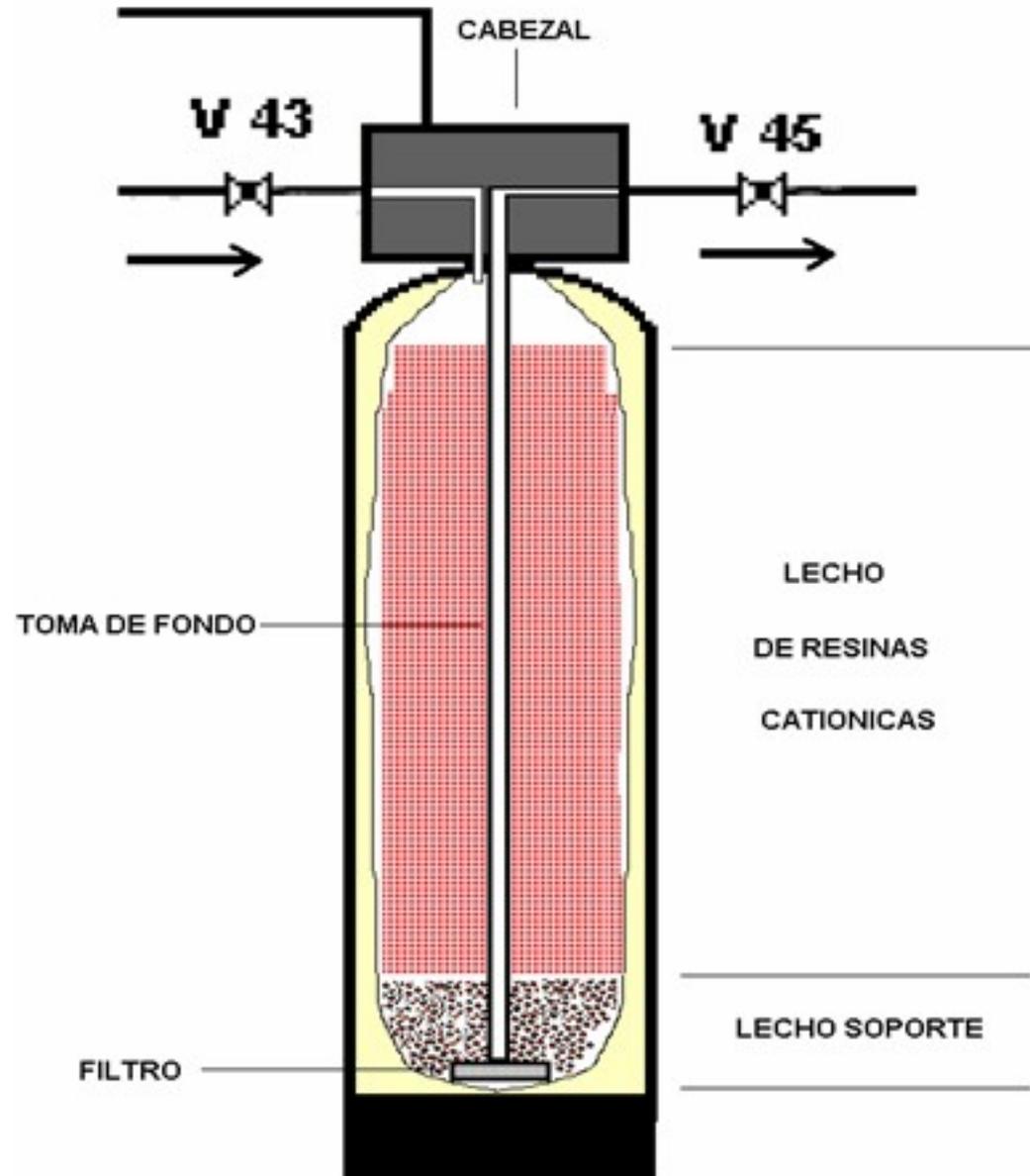
# Prefiltración, filtros de sedimentación

- Eliminar elementos en suspensión, la turbidez, que pueden ocasionar atascamiento en las membranas de ósmosis o recubrimiento de partículas de carbón activo y resinas del descalsificador.
- filtran entre 20 y 10  $\mu\text{m}$
- Para elementos de menores de 10  $\mu\text{m}$  a 1  $\mu\text{m}$  se utilizan microfiltros, *de cartucho*
- Los ciclos pueden durar entre 12 y 24 horas (autonomía) dependiendo del diseño del filtro, y los retrolavados duran entre 15 y 60 minutos a mayor caudal (20 a 25% mas)
- Controles:
  - Microbiológico
  - Contralavado
  - Medir la caída de presión

# Prefiltración, filtros multimedia



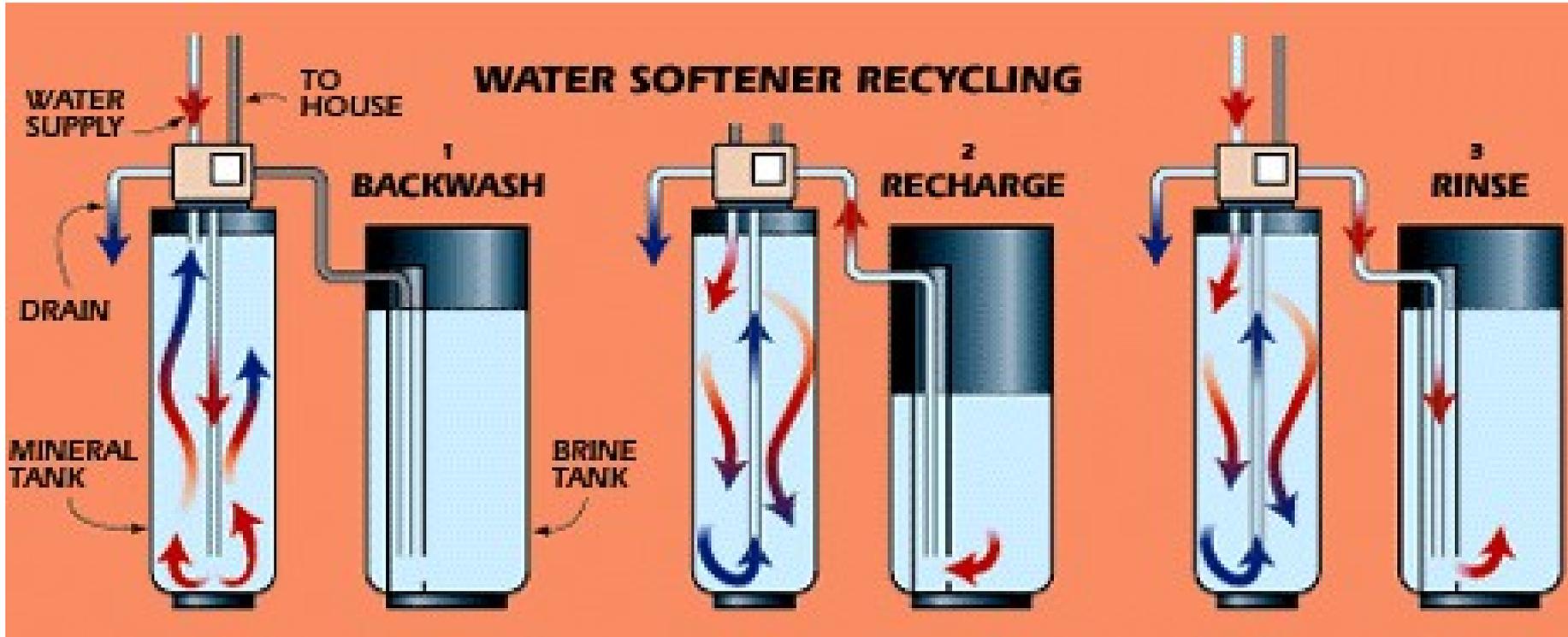
# Ablandador



# Ablandador

- Eliminar el  $\text{Ca}^+$  y el  $\text{Mg}^+$  (dureza del agua) mediante el intercambio iónico en un lecho de resinas.
- Se intercambian iones de  $\text{Ca}^+$  y  $\text{Mg}^+$  por iones de  $\text{Na}^+$  que se encuentran ligados a la resina.
- Llega un momento en que la resina se “satura”.
- Entonces se debe recargar el sistema con iones de  $\text{Na}^+$  y descargar los iones de  $\text{Ca}^+$  y  $\text{Mg}^+$  atrapados.
- Durante la regeneración la resina adquieren cationes de  $\text{Na}^+$ .

# Ablandador



1. La fase de retrolavado quita la suciedad del tanque
2. Recargar el depósito mineral con sodio de la solución de la salmuera desplaza el calcio y el magnesio, que entonces entra el drenaje.
3. La fase final enjuaga el depósito mineral con agua fresca y carga de salmuera el depósito que está listo para el próximo ciclo.

Fuente: [www.excelwater.com](http://www.excelwater.com)

# Ablandador

- Por lo general estos filtros se montan en un sistema doble consistente en dos ablandadores.
- La regeneración lleva un tiempo para que la resina esté en contacto con la salmuera. Por lo que mientras uno funciona el otro regenera, no deberían regenerar a la vez
- Además se debe realizar un contralavado para que la resina se “esponje”
- Dependiendo de la dureza del agua puede ser necesarios más filtros.

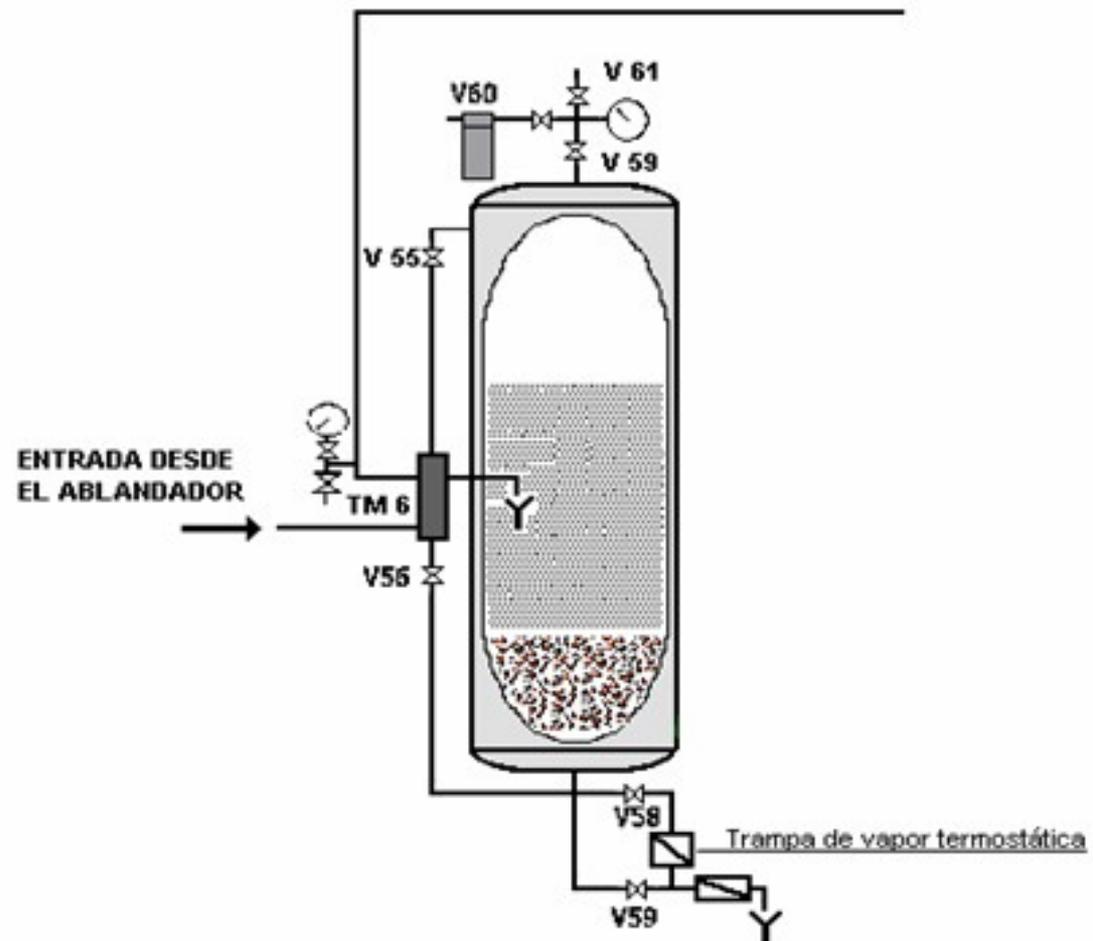
# Filtro de carbón activado

- Elimina el cloro y las cloraminas además puede eliminar sustancias orgánicas disueltas en el agua.
- El carbón se transforma en "activado" cuando es calentado a altas temperaturas (800 a 1000 °C) en la ausencia de oxígeno. El resultado es la creación de millones de poros microscópicos en la superficie del carbón.
- Estos poros microscópicos atraen, capturan y rompen moléculas de contaminantes presentes.

# Filtro de carbón activado

- **Deben ser puestos siempre antes y lo más cerca de la OI.**
- El carbón activado no se regenera por lo que se debe contralavar, ayuda al esponjamiento del carbón.
- Debe ser cambiado una vez al año, puesto que cuando se satura comienza a liberar las sustancias atrapadas.
- Posterior al carbón deben ponerse microfiltros!!
- Se esterilizan por calor

**El limite maximo para el Cl total previo al Osmosis es de 0.1mg/L**



### **FILTRO DE CARBON ACTIVADO**

Tipo: Esterilizable por vapor

Cantidad: 1

Marca: IDENOR

Modelo: AQUAPHIL FC 500 EV

Materia: Acero Inoxidable AISI 304

# Metabisulfito de Sodio

Se utiliza en la eliminación de Cl<sup>-</sup>

Es un excelente reductor

Sustituye al filtro de carbón activado

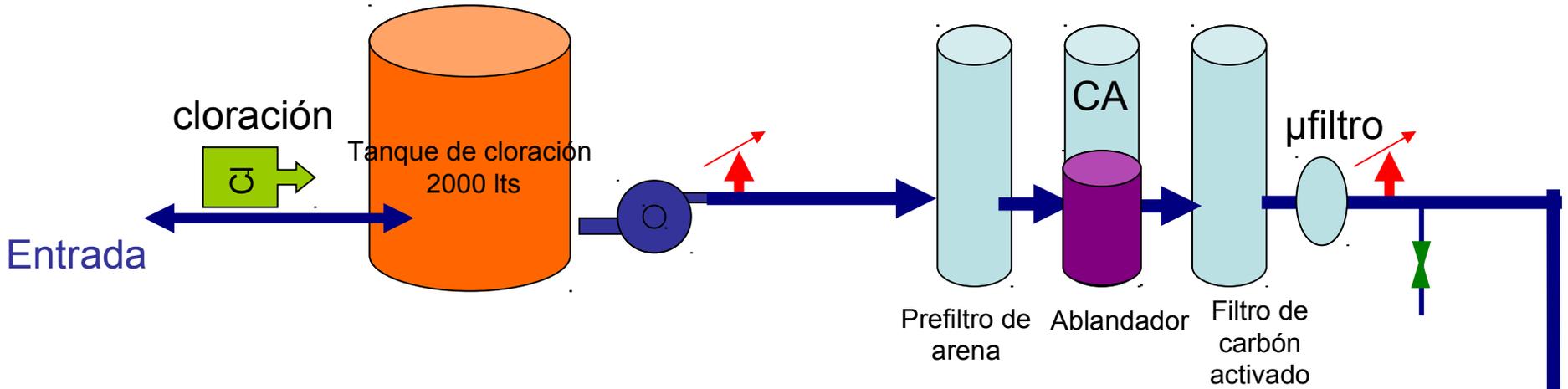
Los resultados de las reacciones químicas son retenidas por microfiltros



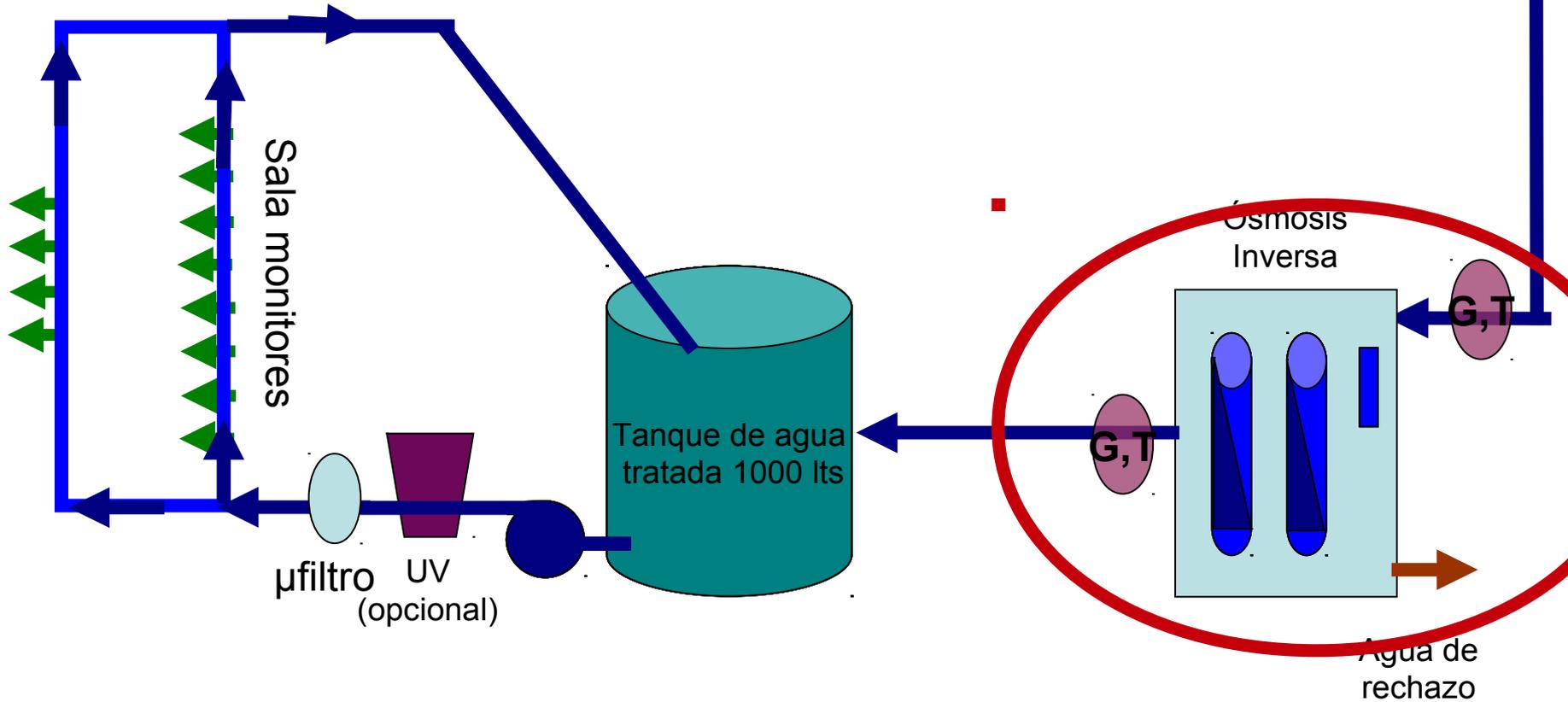
El anti incrustante es un poliacrilato fosfatado de alto peso molecular que captura por afinidad química iones como: calcio, magnesio, hierro, aluminio, sílice, cloraminas, evitando la precipitación y consecuente incrustación de las membranas de ósmosis inversa.

Mas sensor de Cl<sup>-</sup> online, sensor de PH y conductímetro, para asegurarnos que el Cl se neutralice.

**El limite maximo para el Cl total previo al Osmosis es de 0.1mg/L**

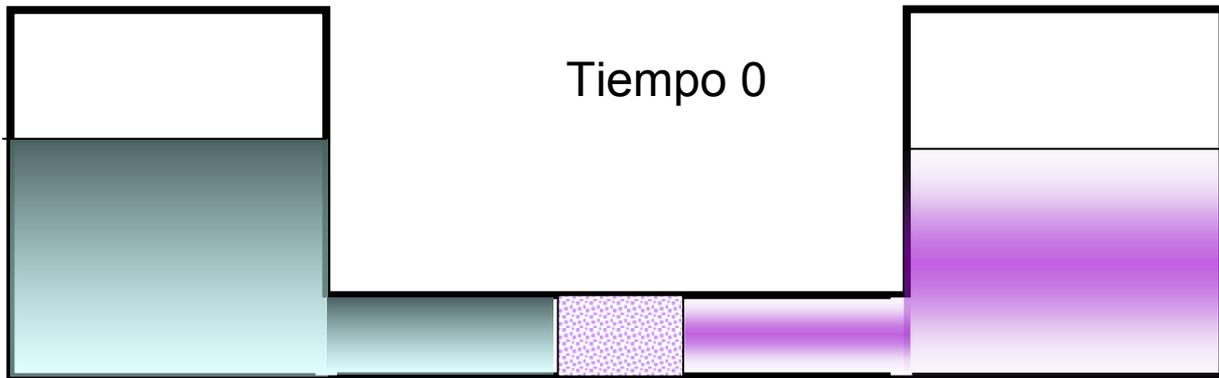


Reprocesamiento

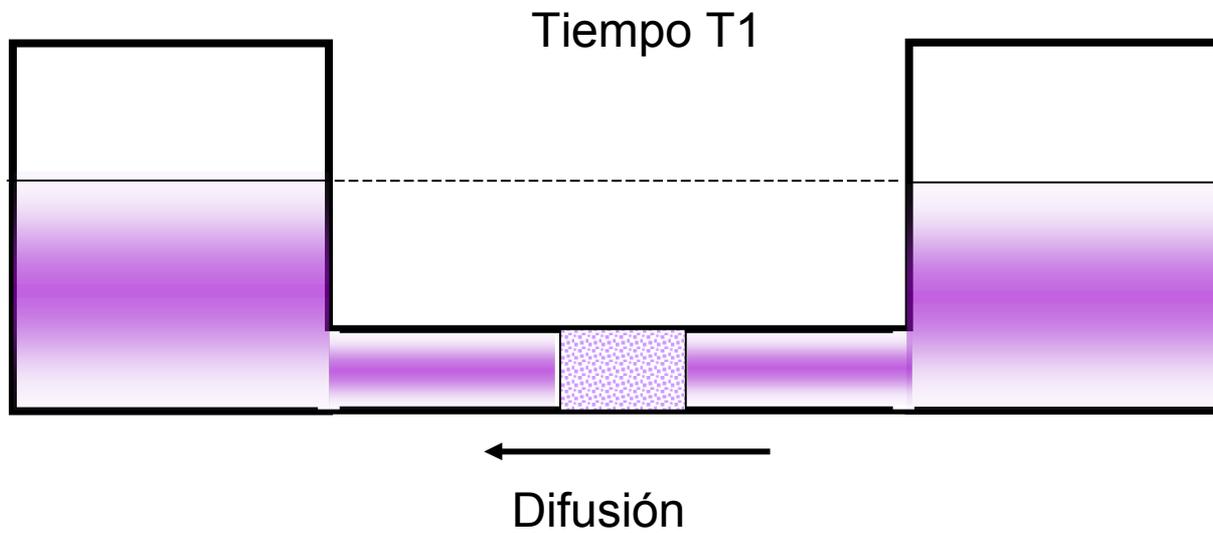


# Ósmosis Inversa

- Caso membrana permeable:

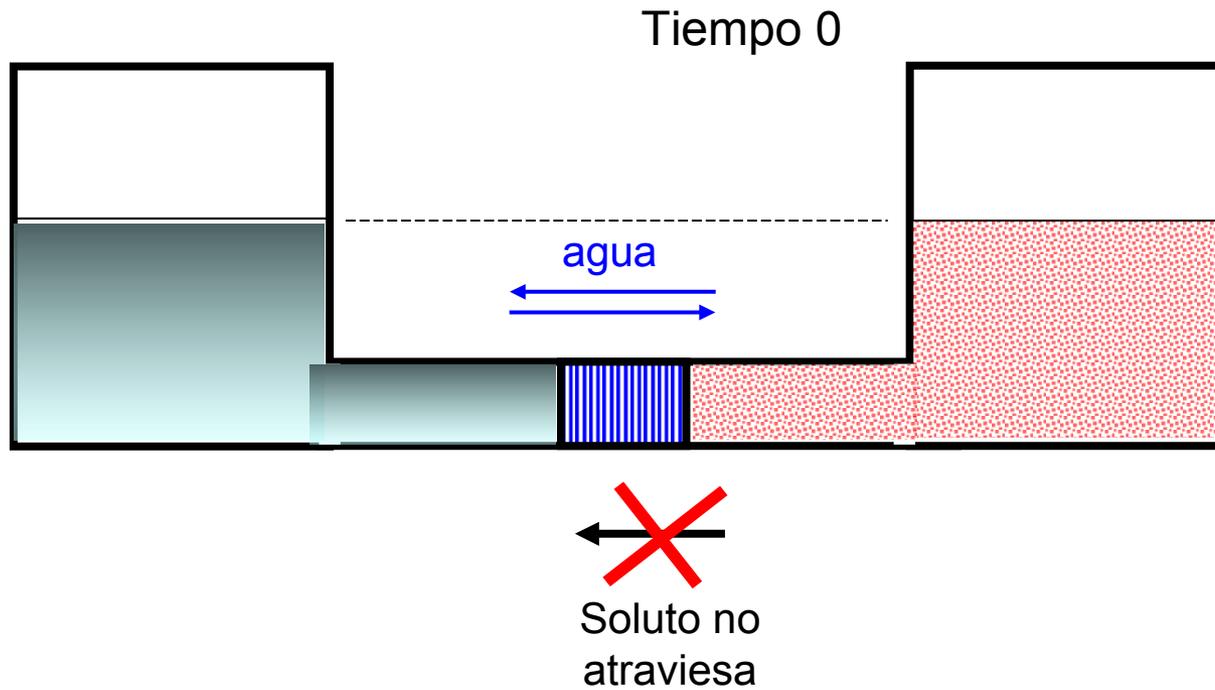


# Ósmosis Inversa

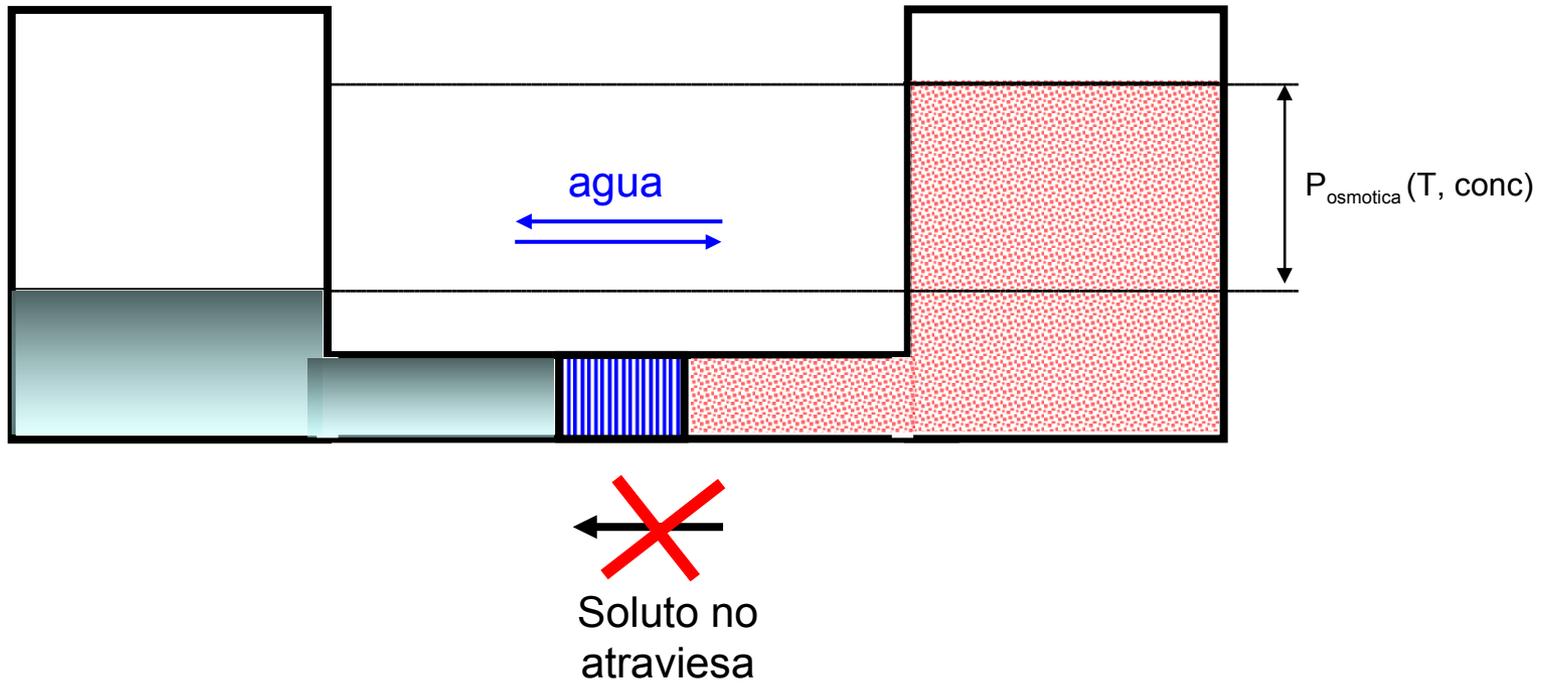


# Ósmosis

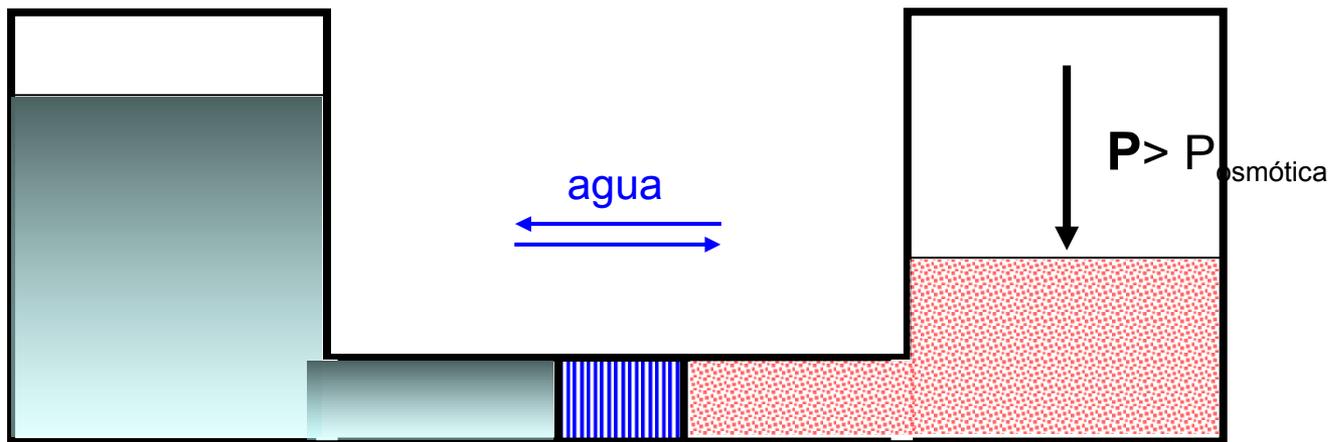
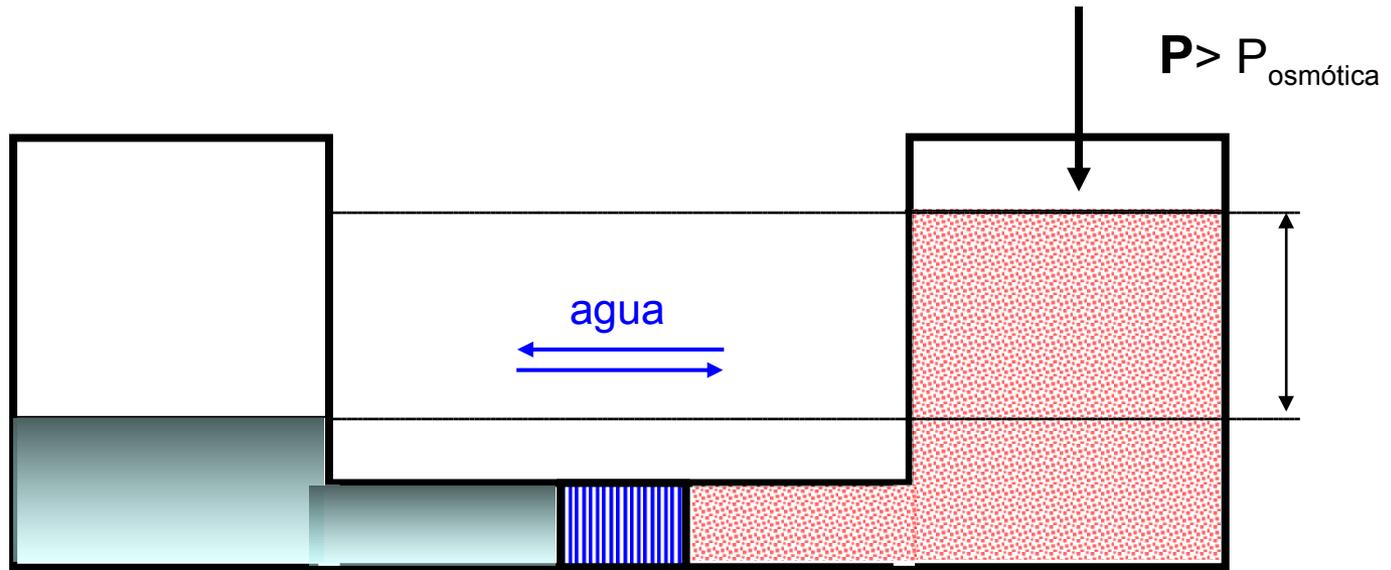
- Caso membrana semipermeable:



# Ósmosis



# Ósmosis Inversa

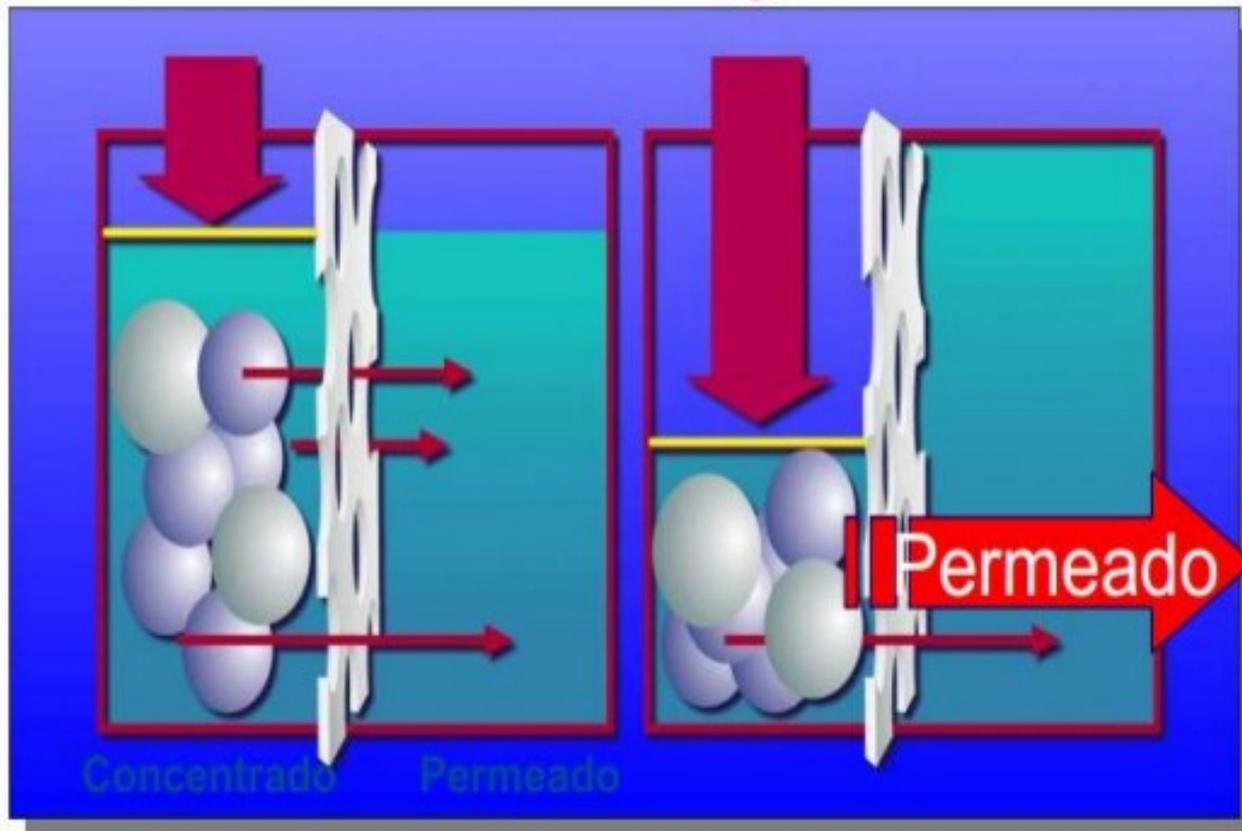


# Presion osmotica

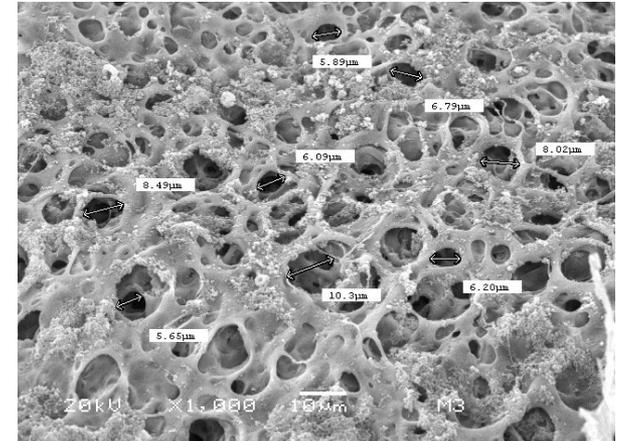
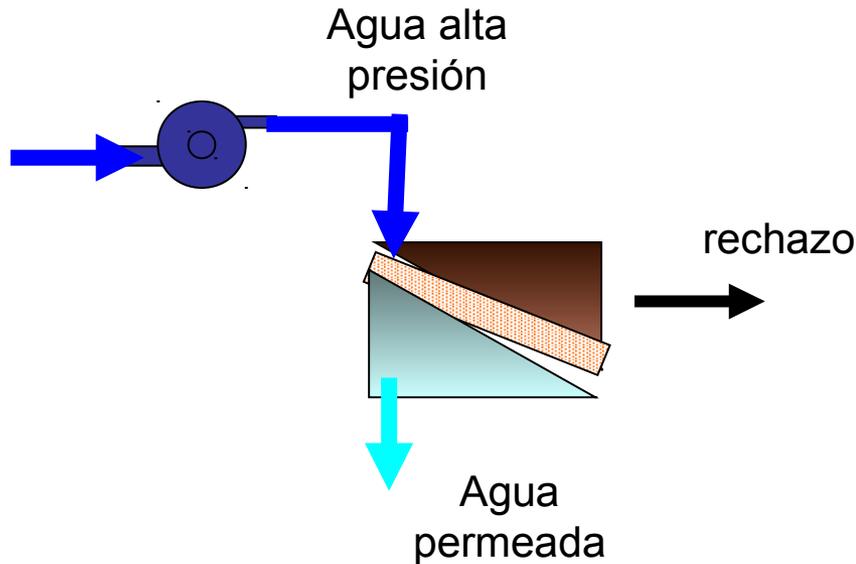
**Presión Osmótica ( $\pi$ ):** Es el exceso de presión que debe aplicarse a una solución para impedir el paso del solvente hacia ella, cuando los líquidos están separados por una membrana semipermeable.

Es proporcional a la actividad del soluto y por tanto a la concentración de sal. Una aproximación para la presión osmótica es que 100 ppm de sólidos totales disueltos (TDS) generan 1 psi de presión osmótica.

Presión



# Ósmosis Inversa



## Membranas:

- **acetato de celulosa**: poro de entre 0.2 micrones a 0.8, rango de trabajo ph entre 4 y 8
- **Poliamida**: permitiendo separación de 1 a 10 Å, rango de trabajo entre ph de 3 a 11, como desventaja si tenemos cloro en más de 0.1 ppm destruye la membrana

# Ósmosis Inversa

- Las membranas retienen entre el 90 – 99% de iones
- Y entre el 95 y 100% de las materias orgánicas
- El grado de retención vendrá dado por los caudales de producción y rechazo. Siendo el caudal de producción o “permeado” el agua que cruza la membrana.
- Normalmente la producción en una sola etapa de ósmosis está en el 50% el otro 50% se tira por el desagüe.
- Esencialmente la ósmosis rechaza iones, la eficiencia se mide en términos iónicos.
- Eficacia=  $(C_e - C_s) / C_e * 100$ 
  - $C_e$  = Conductividad del agua a la entrada
  - $C_s$  = Conductividad del agua a la salida.
  - Ej. OSE ~200 - 300  $\mu$ S/cm a la salida de la ósmosis: 2- 5  $\mu$ S/cm
- Es un parámetro a vigilar...se deben hacer exámenes químicos, bacteriológicos y endotoxinas.
- La temperatura es una variable importante, a mayor temperatura puede aumentar su producción pero empeorar su calidad.

# Ósmosis Inversa

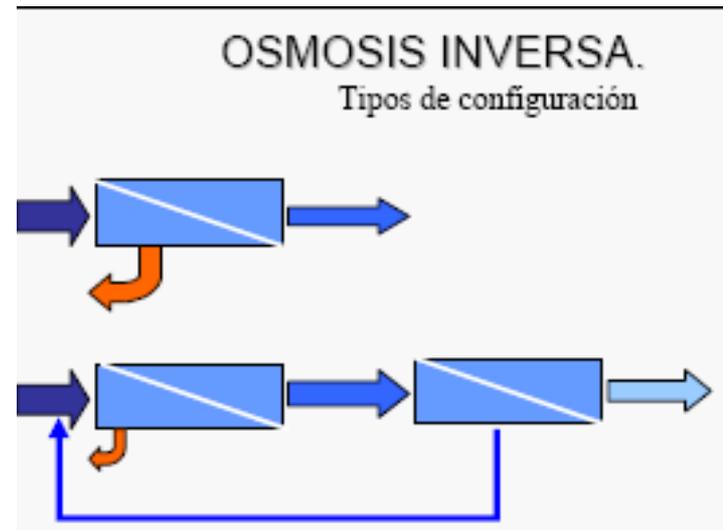
**Incrustaciones:** es el resultado de precipitación de sales saturadas sobre la superficie de la membrana.

Trae como consecuencia 3 problemas:

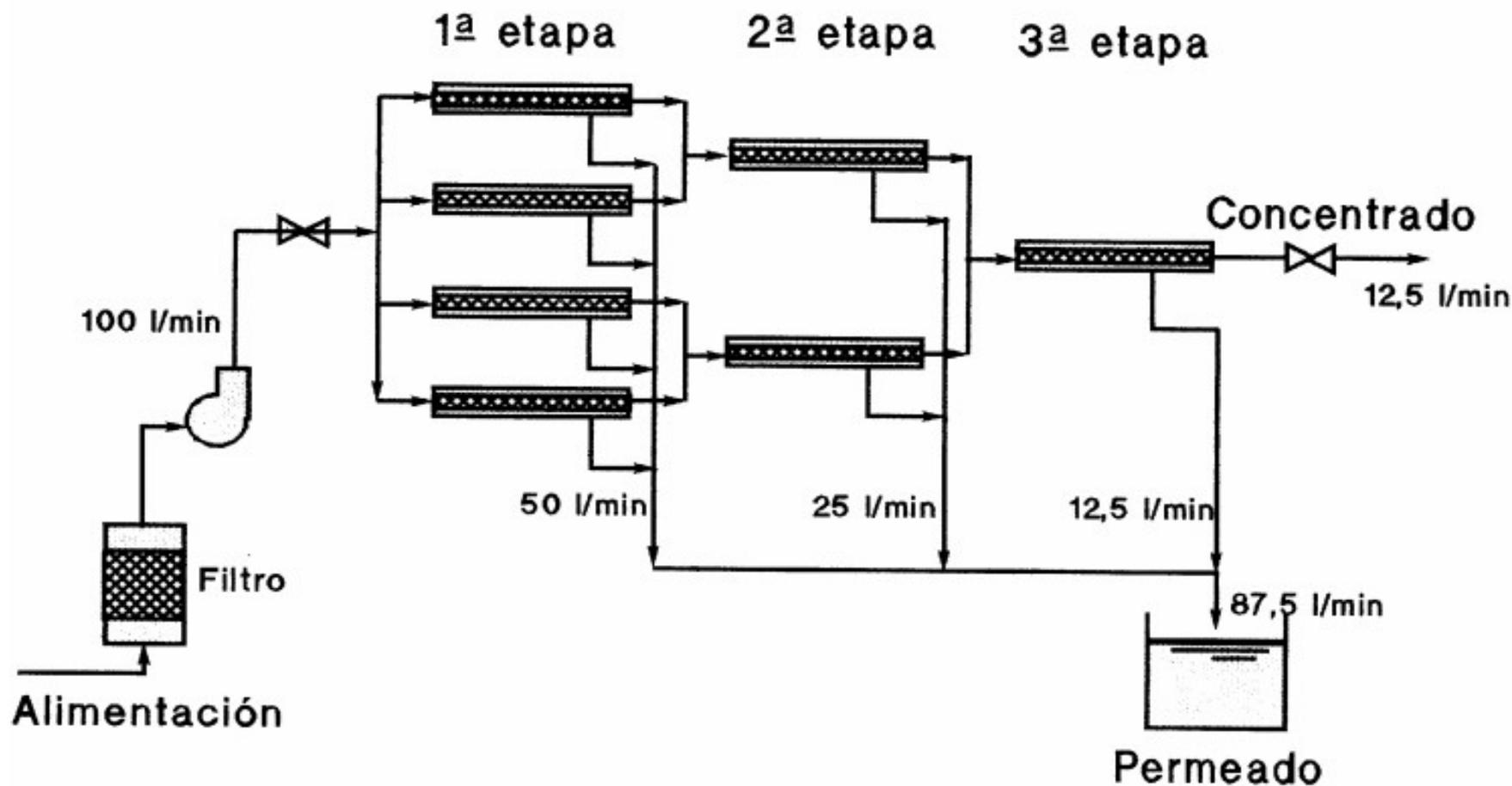
- Presión de operación mas alta de lo normal
  - Diferencia de presiones mayor
  - Menor rechazo de sales a lo esperado, menor eficiencia.
- La vida de la membrana depende fundamentalmente de la etapa de prefiltrado.

En dos etapas consigo bajar al 20% el rechazo, disminuyendo la cantidad de agua consumida.

Si una falla la otra puede seguir funcionando



# 87,5% de recuperacion, mejoro eficiencia con multi-etapa



# Parámetros del Proceso

**Presión de Operación:** al aumentar la presión disminuye la permeabilidad

**Temperatura de Operación:** al aumentar la temperatura se favorece la separación

**Velocidad de Flujo de Alimentación:** mejora la permeabilidad se favorece la separación

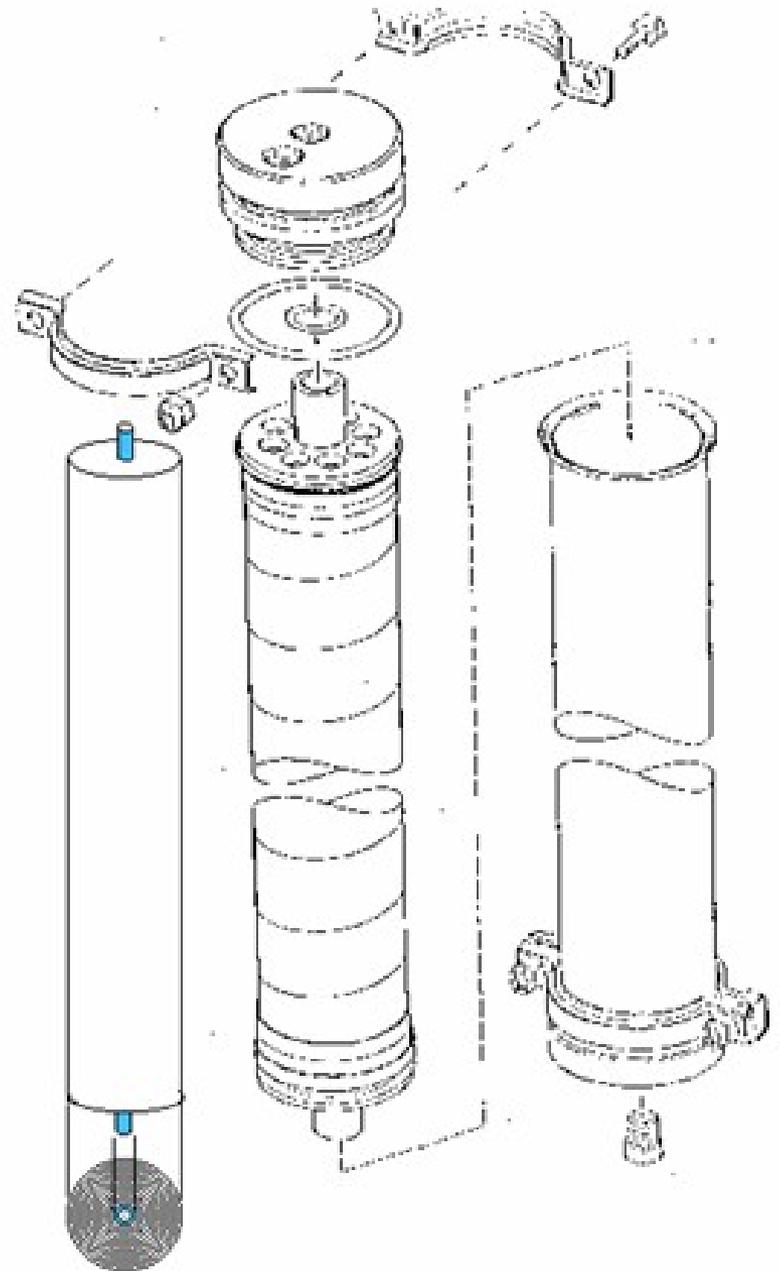
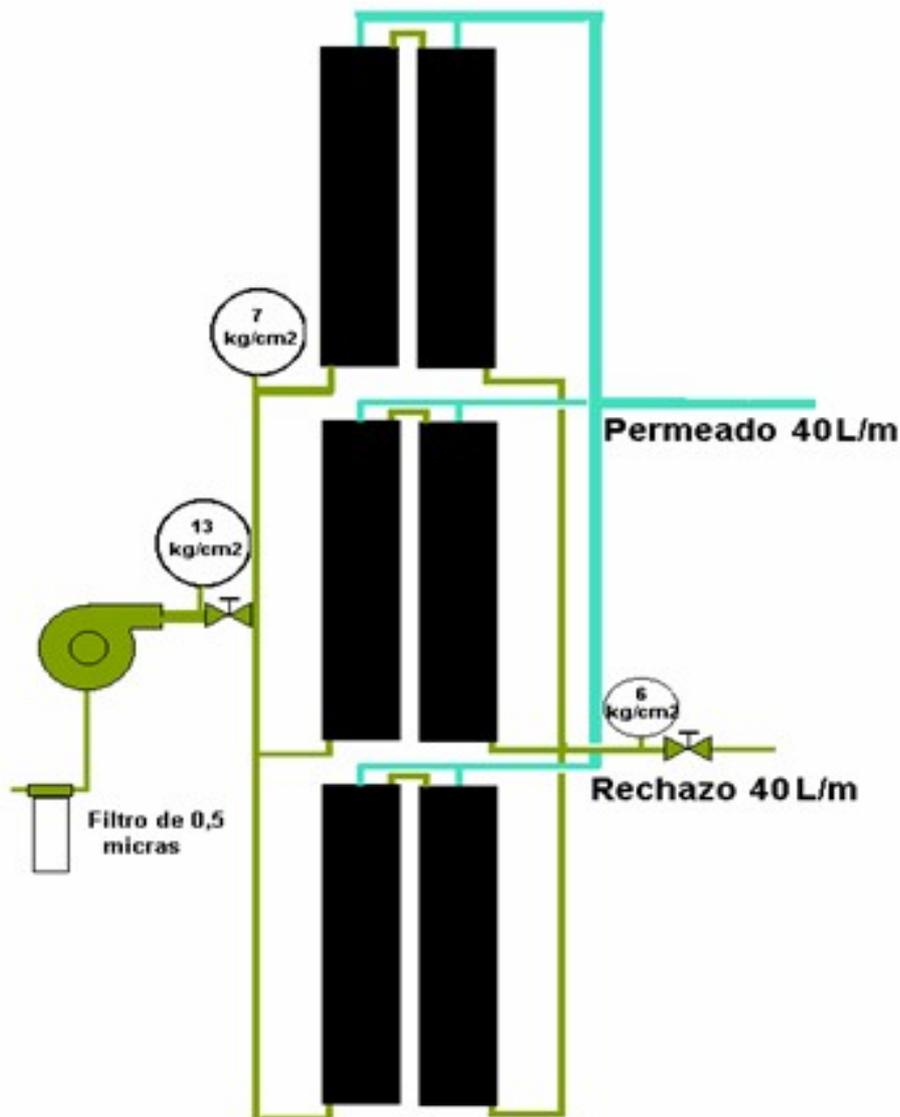
**Concentración de la solución:** aumenta la presión osmótica y la viscosidad

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

# Tabla de rechazos de elementos Inorgánicos

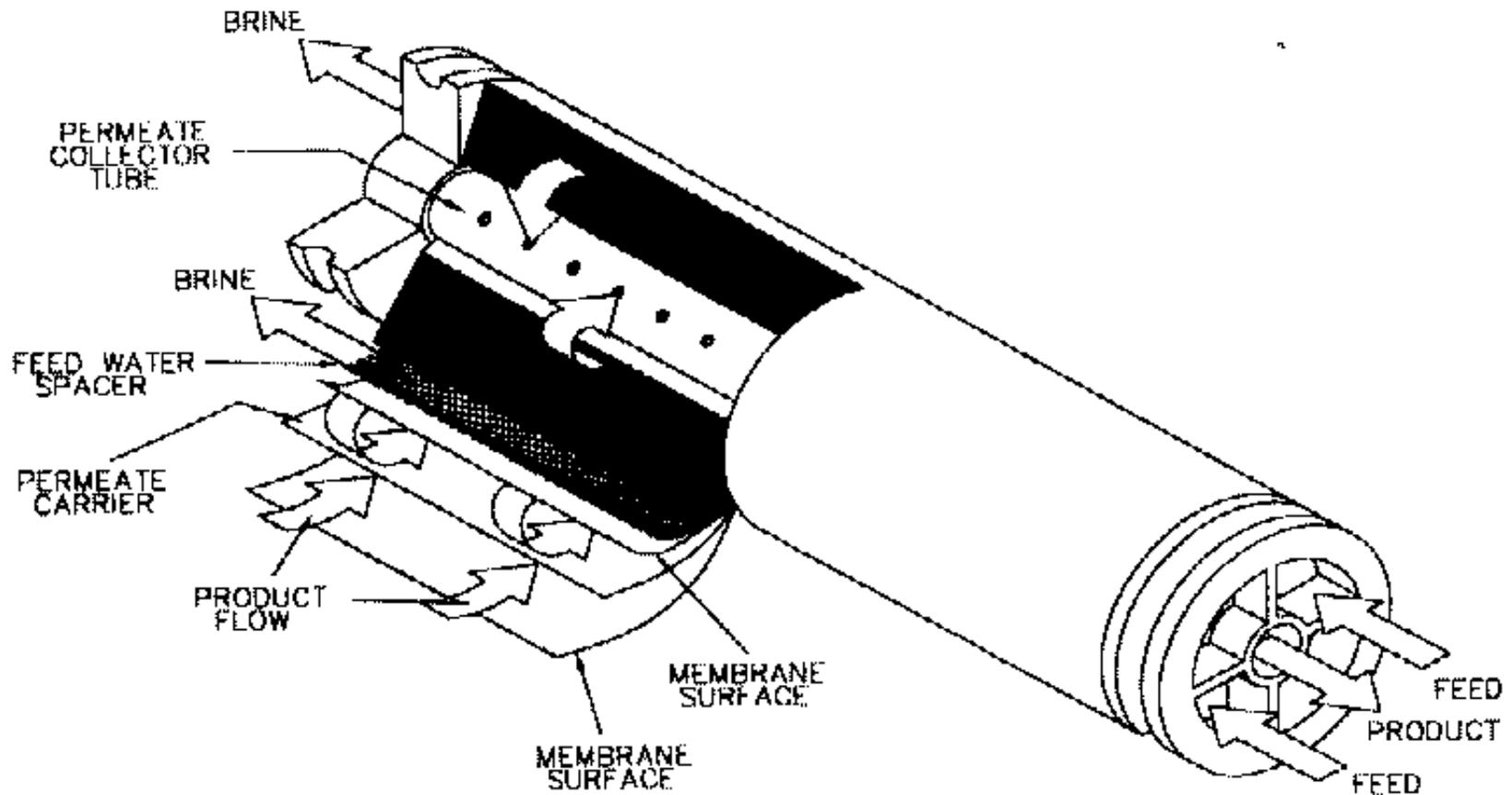
<b>ION</b>	<b>Simbolo</b>	<b>% Rechazo</b>	<b>ANION</b>	<b>Simbolo</b>	<b>% Rechazo</b>
Sodio	Na+	94-96	Cloruro	Cl-	94-95
Calcio	Ca++	96-98	Bicarbonato	HCO3	95-96
Magnesio	Mg++	96-98	Sulfato	SO4-	99+
Potasio	K+	94-96	Nitrato	NO3-	93-96
Hierro	Fe++	98-99	Fluoruro	F-	94-96
Manganeso	Mn++	98-99	Silicato	SiO2-	95-97
Aluminio	Al+++	99+	Fosfato	PO4-	99+
** dependiendo del ph					
Amonio	NH4+	88-95	Bromuro	Br-	94-96

Rangos de operación con agua a 25° C

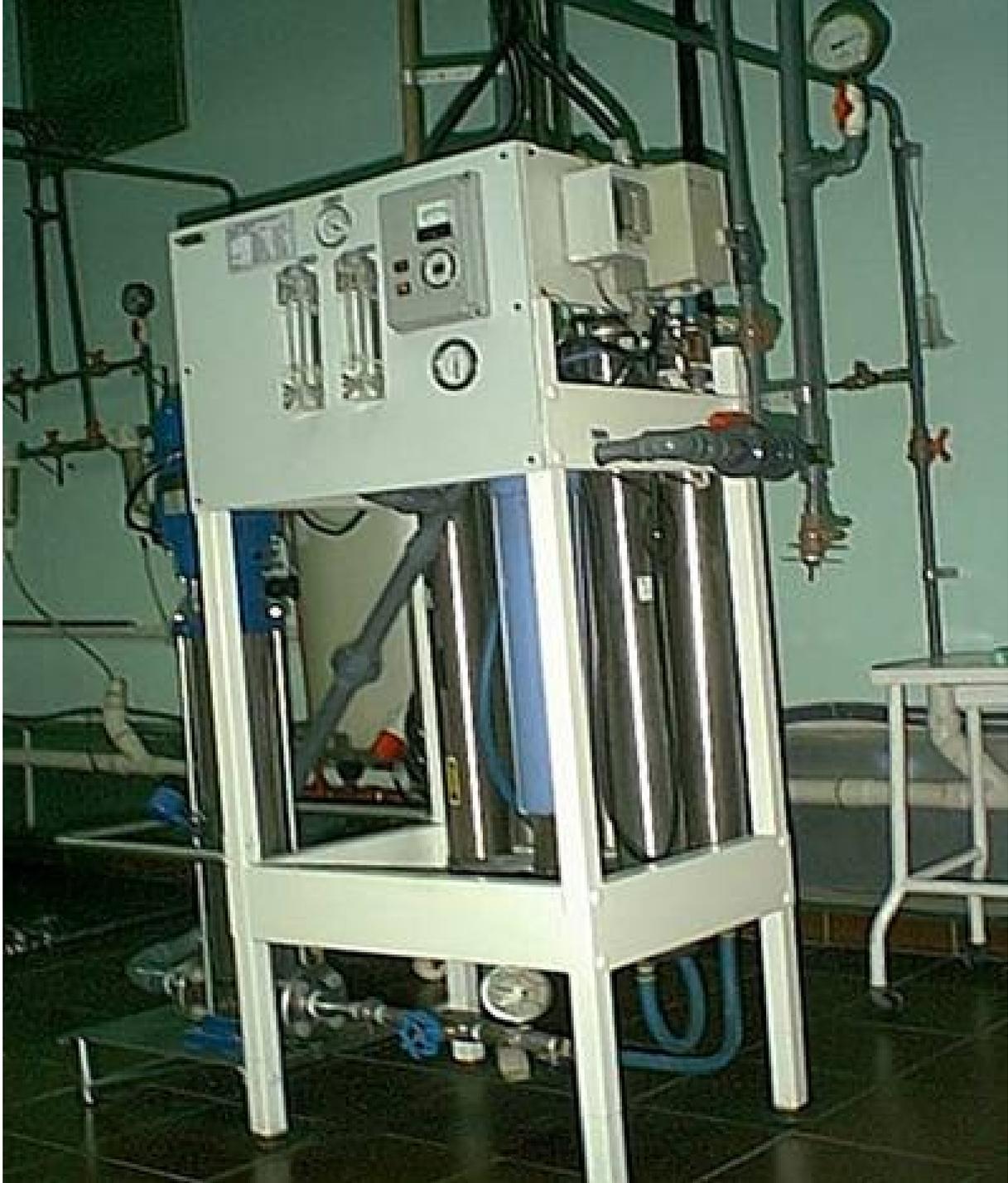


# Membrana tubular utilizada en los dispositivos de OI

Figure 5.3. Spiral Wound Reverse Osmosis Envelope Connected to a Permeate Collector (Source: Applegate 1984)





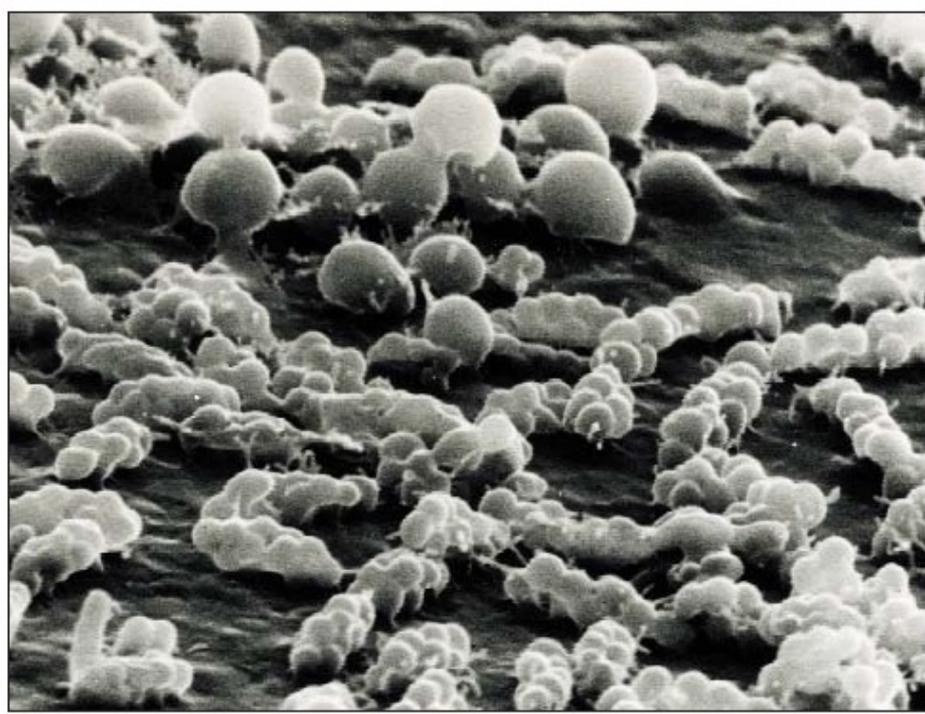


# Tanque almacenamiento

- Interior oscuro
- Fondo Cónico
- Tapa superior hermética
- Toma de aire con venteo, filtro de aire .2 micrometros

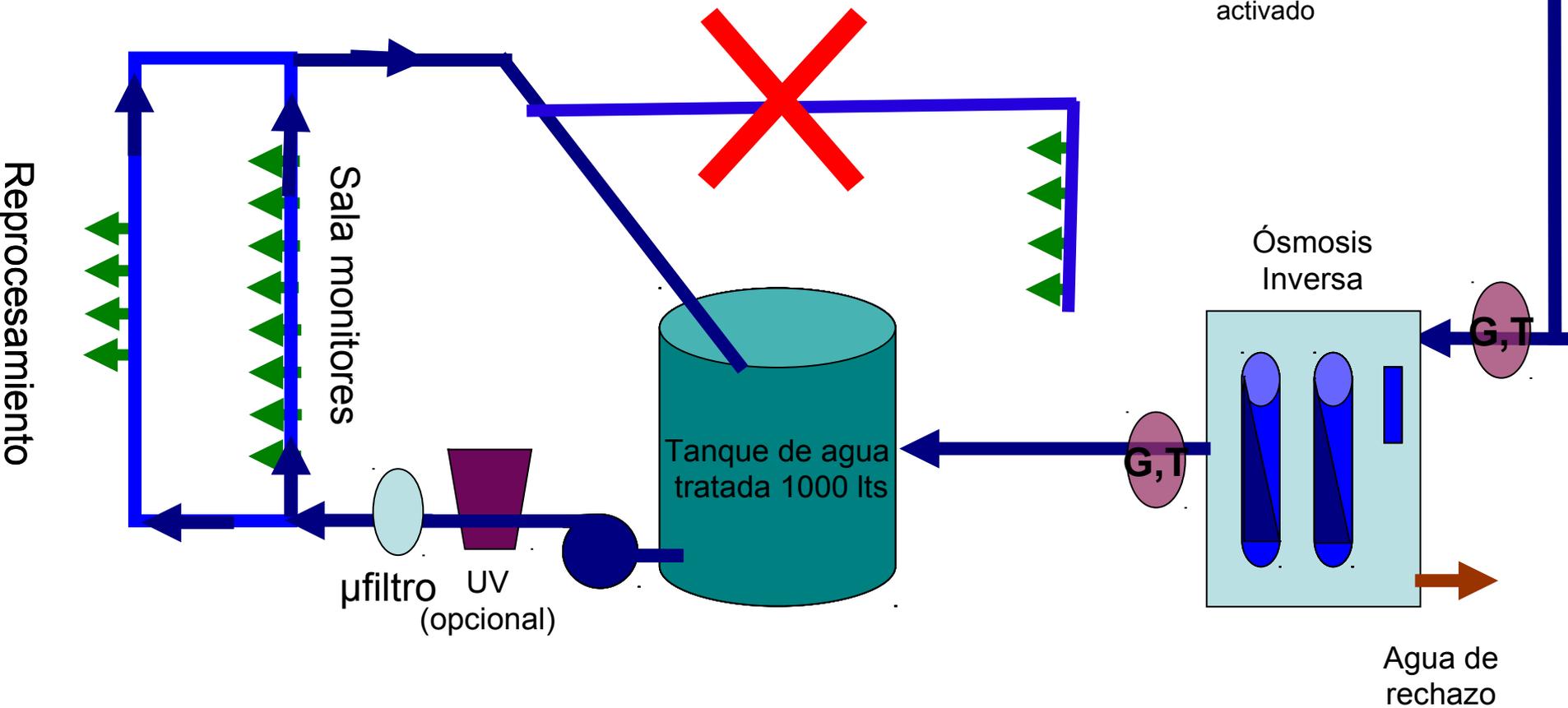
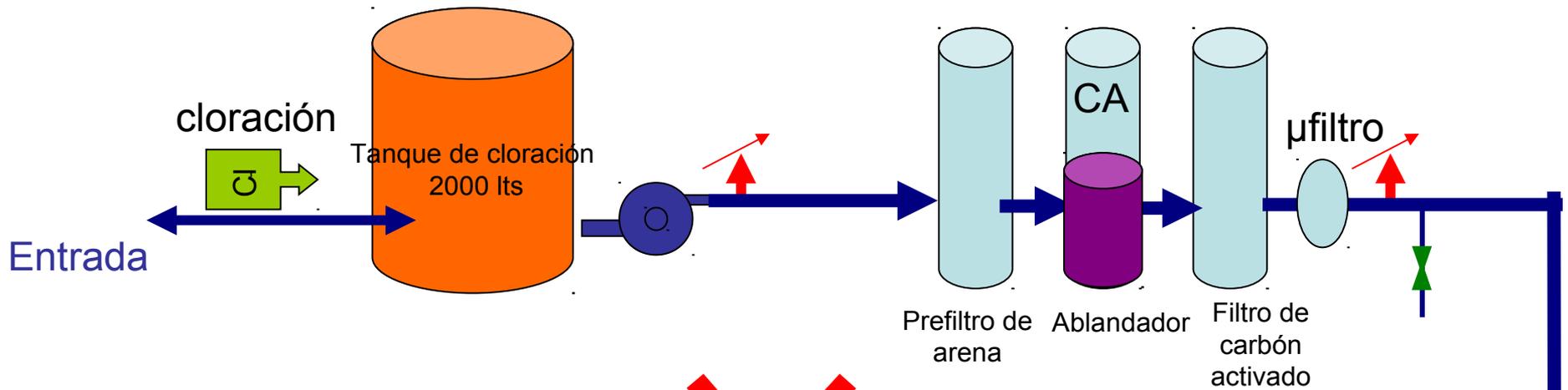
# Almacenamiento





**Figure 1.** Biofilm on the surface of a water distribution system used in a dialysis unit. (Photographs courtesy of Luc Marchal and Jean Printz. Published with permission from Gambro Lundia AB, Lund, Sweden).

- **Biofilm:** colonias de bacterias asentadas sobre las superficies de los circuitos que se reproducen y generan en lugares de estancamiento.
- Fluido turbulento, min 1m/s para evitar la creación de biofilm
- Evitar sacos estancos
- Acero inoxidable mejor, o materiales plásticos cuidado con las uniones, derivaciones
- Formolización, ozonización del sistema de los anillos de distribución.



# Desinfección

- Desinfección:
  - Hipoclorito de Sodio (cuidado la Osmosis!) durante 30 minutos, luego enjuage, 0ppm
  - Calor, en sistemas de Acero inoxidable. Agua entre 60 y 80 C durante 30 minutos.
  - Acido peracetico (acido Acetico + peroxido de hidrogeno) minimo 200 ppm durante unas 2hs. El personal debe tener proteccion.
  - Formolizar, formaldehido 4ppm 20 a 24 hs (fines de semana).
  - Desincrustante

Ultravioleta (254nm, 30mWseg/cm<sup>2</sup>):

Elimina bacterias, por destrucción lo que puede provocar una presencia masiva de endotoxinas (pirógenos). Se debe contar con microfiltros para eliminarlas



## CONTENEDOR DE LUZ ULTRAVIOLETA

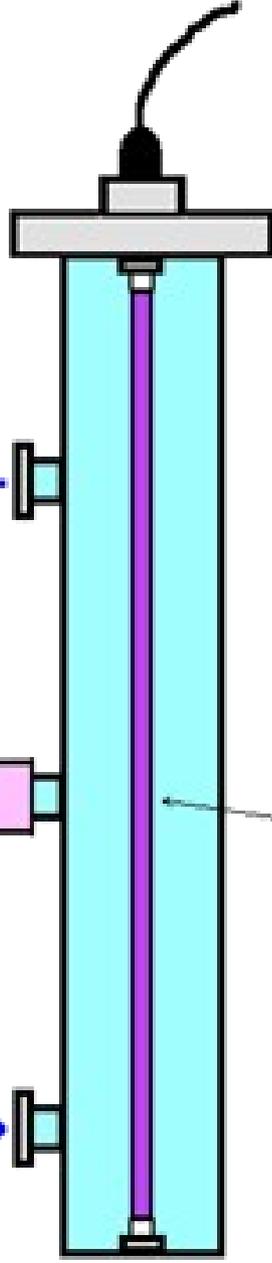
Entrada de agua



Visor indicador de funcionamiento  
de luz ultravioleta



Salida de agua



Tubo de luz ultravioleta

# Controles

- Diarios: presiones, conductividades, caudales, etc.
- Semanales: regeneración, contralavados, los depósito de sal, esterilizaciones
- Controles Biológicos y fisicoquímicos del agua.
- Mensuales: controles químicos
- Anual: control de altura del lecho

## Guía FNR

Elemento	Control diario	Control mensual	Observaciones
<b>MANÓMETROS</b>	Verificar su correcto funcionamiento en todo el sistema.		Acciones automáticas, como auto limpiezas, implican variaciones en las presiones habituales.
<b>ENTRADA DE AGUA BRUTA</b>	Presión.	Medir cloro, cloraminas y dureza.	Aumentar los controles si cambian las condiciones de la misma, ej: sequía o inundaciones.
<b>PREFILTROS</b>	Aspecto macroscópico, diferencia de presión entre entrada/salida.	Si son filtros auto lavables comprobar funcionamiento del ciclo de lavado.	Verificar el correcto funcionamiento de la prefiltración. Los cambios serán acordes a las pautas del fabricante o instalador.
<b>ABLANDADOR</b>	Medida de dureza a la salida, chequear volumen restante para la regeneración. Estado del depósito de sal. Registrar.	Comprobar consumos de sal, fases de la regeneración, funcionamiento de los elementos de control: caudalímetros, relojes.	Anomalías en los descalcificadores producen disminución de los caudales de rechazo y producción de la ósmosis. Tener en cuenta la vida útil de la resina recomendada por el fabricante.
<b>FILTRO DE CARBÓN</b>	Medir cloro y cloraminas a la salida a máximo consumo, una vez al día post carbón. Registrarlo.	Comprobar funcionamiento del ciclo de lavado - esponjamiento. Estado de los elementos de control automático. Filtro posterior.	Sustituir el carbón al menos una vez año. Si existen dos filtros de carbón en serie o paralelo debe existir la posibilidad de realizar las mediciones de forma independiente.

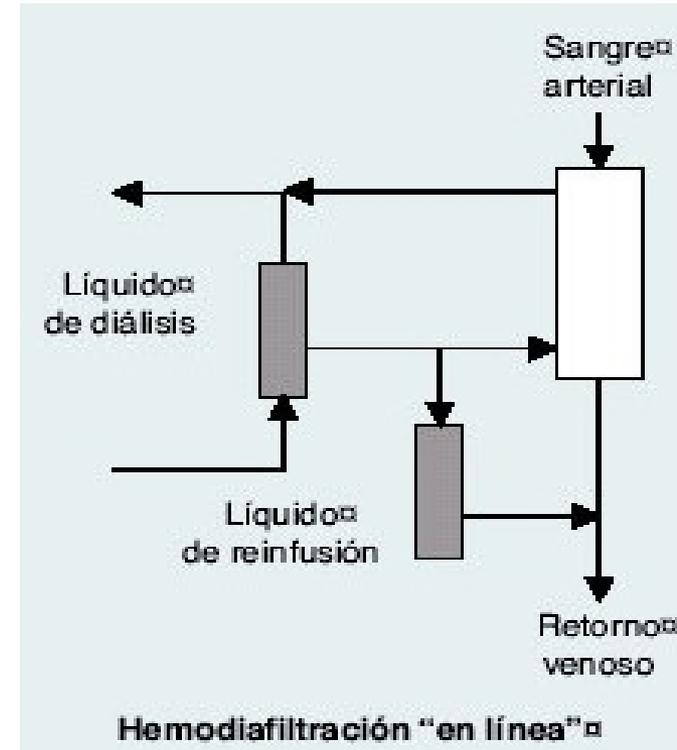
Elemento	Control diario	Control mensual	Observaciones
<b>ÓSMOSIS</b>	Conductividad de salida, presiones y permeado. Registrarlo.	Comprobar funcionamiento de lavados automáticos de las membranas, elementos de control y protección.	Desinfecciones y desin-crustraciones de la membrana acorde a especificaciones del fabricante. Respetar caudales y presiones indicadas, en caso de variación realizar análisis químico, bacteriológico y endotoxinas.
<b>ULTRA-FILTROS</b>	Conductividad o resistencia, pH.	Verificar funcionamiento sistemas de alarma y medida.	Variación de conductividad implica mal funcionamiento, ajustar alarma a 0,5us-1.
<b>LÁMPARA U.V.</b>	Control de funcionamiento.		Reemplazar lámpara y cuarzo de acuerdo a las especificaciones del fabricante.
<b>RED DE DISTRIBUCIÓN (incluida tomas de los monitores)</b>	Verificar presión a la entrada y salida del circuito de distribución.		Fijar calendario de desinfecciones en función de las características de la red y resultado de estudios microbiológicos. Considerar las mangueras hacia los equipos.
<b>DEPÓSITOS</b>	De agua de aporte o pretratada controlar niveles de cloro – cloraminas, regularmente.	Comprobar funcionamiento de bombas de impulsión, niveles y alarmas.	Si es agua tratada, desinfectarlos junto con la red de distribución. Cambiar filtro de venteo según especificaciones.

## Controles del proceso de obtención de agua para hemodiálisis

	Muestra	Frecuencia
<b>Parámetros fisicoquímicos</b>		
Conductividad	Agua tratada	En línea
Dureza	Post ablandador	Previo a la regeneración
Cloro total y libre	A la salida del filtro de arena o multimedio	Una vez por turno
Ozono	Agua en punto de uso	Mínimo una vez al día (según la aplicación)
<b>Parámetros del sistema</b>		
Flujo agua de aporte y producida	-	Una vez al día
Presión	-	Una vez al día
Porcentaje de rechazo y producción	-	Una vez al día

# Hemodialisis en linea (HDF on-line)

- Difusión, ultrafiltración y **convección**
- Convección: paso de solutos que pasan a través de la membrana semipermeable arrastrados por el paso de agua.
- Difusión: util para solutos de pequeño tamaño y gran movilidad
- Convección: moléculas medianas y grandes.



# Planta Ultra pura

