



Universidad de Valladolid



**ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES**

UNIVERSIDAD DE VALLADOLID

ESCUELA DE INGENIERIAS INDUSTRIALES

GRADO EN INGENIERÍA QUÍMICA

**DISEÑO DE UNA PLANTA DE PRODUCCIÓN
DE AGUA PARA HEMODIALISIS**

Autor:

Bocos González, Luis Mariano

Tutores:

**Arroyo Gómez, Yolanda
Sanz Tejedor, M^a Asunción**

**Departamento:
Química Orgánica**

Valladolid, Septiembre 2015.



Resumen y Palabras clave

Las unidades de hemodiálisis utilizan para su funcionamiento una gran cantidad de agua con unas especificaciones muy estrictas al tener incidencia en la salud de los enfermos renales, este proyecto desarrolla una instalación que cumpla todas las especificaciones del servicio de Nefrología del Hospital Río Hortega (HURH) de Valladolid.

El presente trabajo define cómo debería ser y que elementos formarían parte de una planta de producción de agua con una calidad excelente, junto con una alta seguridad en la continuidad de la producción, para su posterior utilización en la preparación de líquido de diálisis. La planta formaría parte de un Servicio de Nefrología hospitalario por lo que se alimentará desde una red de suministro municipal. Para ello se debe cumplir con la normativa y las recomendaciones actuales del colectivo nefrológico español.

Para dimensionar los diferentes equipos constituyentes de la planta de producción de agua, se ha preferido, siempre que ha sido posible, recurrir a métodos prácticos basados en datos, recomendaciones o diagramas de los fabricantes. El motivo de este procedimiento está fundamentado en la creencia de que así se conseguirán mejores predicciones del comportamiento de un determinado parámetro, y por tanto una mayor optimización de los equipos, frente al uso de un modelo matemático general.

Palabras clave: Diálisis, ósmosis inversa, carbón activo, descalcificación, agua ultrapura, conductividad.



Abreviaturas

Para ayudar a la comprensión de este trabajo y facilitar su redacción se indican, a continuación, el significado de las abreviaturas más utilizadas en el documento.

- ETAP ► Estación de tratamiento de agua potable.
- COT ► Carbono orgánico total.
- CAG ► Carbón activado granular.
- HAA ► Ácidos haloacéticos.
- HD ► Hemodialisis.
- IO ► Intercambio iónico.
- LD ► Líquido de diálisis.
- MOI ► Membrana de ósmosis inversa.
- MON ► Materia orgánica natural.
- OI ► Ósmosis inversa.
- SDI ► Silt Density Index, índice de colmatación de membranas de ósmosis inversa por suspensiones coloidales.
- SPD ► Subproductos de la desinfección .
- THM ► Trihalometanos.
- TDS ► Sólidos totales disueltos.
- UE ► Unidades de endotoxinas, es la unidad en la que se miden las endotoxinas.
- UFC ► Unidades formadoras de colonias, es la unidad en la que se miden las poblaciones bacterianas.
- UV ► Ultravioleta.

ÍNDICE DE CONTENIDOS:

1	JUSTIFICACIÓN Y OBJETIVOS.....	15
1.1.	Justificación.....	17
1.2.	Objetivos.....	17
1.3.	Normativa de aplicación.....	18
2	DIÁLISIS.....	19
2.1.	Hemodiálisis.....	21
2.1.1	Monitor de hemodiálisis.....	22
2.1.2	El líquido de diálisis.....	25
2.1.3	Extracción de toxinas mediante la hemodiálisis.....	26
2.2.	Diálisis peritoneal.....	27
2.2.1	Extracción de toxinas mediante la diálisis peritoneal...28	
3	AGUA DE DIÁLISIS.....	29
3.1.	Calidad necesaria del agua producida.....	31
3.1.1.	Niveles microbiológicos.....	32
3.1.2.	Conductividad.....	32
3.1.3.	Valores límite para los contaminantes químicos.....	32
3.1.4.	Contaminantes problemáticos.....	34
4	TÉCNICAS DE TRATAMIENTO DEL AGUA.....	41
4.1.	Filtración.....	43
4.1.1.	Mecanismos de la filtración.....	43
4.1.1.1.	Mecanismos de transporte en la filtración.....	45
4.1.1.2.	Mecanismos de adherencia en la filtración.....	46
4.1.2.	Filtración en lecho fijo.....	49
4.1.3.	Filtración con cartuchos de polipropileno.....	51
4.2.	Desinfección.....	54
4.2.1.	Mediante derivados del cloro.....	54
4.2.2.	Mediante radiación ultravioleta.....	58
4.3.	Descalcificación.....	59
4.3.1.	Fundamento teórico del intercambio iónico.....	59
4.3.2.	Tipos de resinas de intercambio iónico.....	63

4.3.3. Selectividad de las resinas de intercambio iónico.....	63
4.3.4. Características de las resinas de intercambio iónico....	64
4.3.4.1. Capacidad de intercambio iónico.....	64
4.3.4.2. Capacidad específica teórica.....	65
4.3.4.3. Grado de entrecruzamiento y porosidad.....	65
4.3.4.4. Estabilidad.....	66
4.3.4.5. Vida útil de las resinas.....	66
4.3.5. Intercambio iónico en lecho fijo.....	67
4.3.5.1. Determinación de la capacidad de la resina.....	71
4.3.5.2. Fracción de lecho utilizado.....	72
4.3.5.3. Longitud de lecho no utilizado.....	73
4.4. Decloración en lecho de carbón activo granular.....	74
4.4.1. El carbón activo.....	74
4.4.1.1. Fabricación del carbón activo.....	74
4.4.1.2. Activación del carbón.....	75
4.4.1.3. Superficie del carbón activo.....	77
4.4.1.4. Regeneración del carbón activo.....	79
4.4.1.5. Tipos de carbones activos.....	79
4.4.1.5.1. Características del CAG.....	81
4.4.2. Lecho fijo de CAG.....	83
4.4.3. Mecanismo de la decloración.....	83
4.4.4. Isotermas de adsorción.....	85
4.5. Ósmosis inversa.....	86
4.5.1. Ósmosis y presión osmótica.....	86
4.5.2. Principio de la ósmosis inversa.....	87
4.5.3. Transferencia de materia en la ósmosis inversa.....	88
4.5.4. Características y parámetros de funcionamiento de la Oi...89	
4.5.4.1. Agua de aporte.....	89
4.5.4.2. Permeado.....	89
4.5.4.3. Rechazo.....	90
4.5.4.4. Paso de sales.....	91
4.5.4.5. Rechazo de sales.....	91
4.5.4.6. Factor de conversión.....	93

4.5.4.7.	Factor de concentración.....	95
4.5.4.8.	Coeficiente de permeabilidad del agua.....	95
4.5.4.9.	Presión osmótica.....	96
4.5.4.10.	Flujo específico.....	96
4.5.4.11.	Temperatura.....	98
4.5.4.12.	Polarización por concentración.....	98
4.5.4.13.	Valor de corte de la membrana.....	99
4.5.4.14.	Resistencia al cloro.....	99
4.5.5.	Tipos de membranas.....	99
4.5.5.1.	Según tipo constructivo.....	100
4.5.5.1.1.	Membrana en forma tubular.....	100
4.5.5.1.2.	Arrollamiento en espiral.....	101
4.5.5.1.3.	Membrana de fibra hueca.....	102
4.5.5.2.	Según su composición química.....	104
4.5.5.2.1.	Membranas orgánicas.....	104
4.5.5.2.2.	Membranas inorgánicas.....	105
4.5.5.3.	Según su presión de trabajo.....	105
4.5.6.	Ensuciamiento y técnicas de limpieza.....	106
4.5.7.	Configuraciones constructivas.....	106
4.5.7.1.	Módulos.....	107
4.5.7.2.	Etapas.....	107
4.5.7.3.	Sistemas.....	108
5	DISEÑO QUÍMICO.....	112
5.1.	Análisis del agua.....	112
6	ETAPAS DE TRATAMIENTO DE AGUA.....	124
6.1.	Consideraciones y cálculos previos.....	126
6.2.	Filtración inicial.....	126
6.2.1.	Justificación,.....	126
6.2.2.	Descripción.....	127
6.2.3.	Diseño y cálculo.....	128
6.3.	Depósito y bombeo.....	134
6.3.1.	Justificación.....	134
6.3.2.	Descripción.....	134

6.3.3. Diseño y cálculo.....	135
6.3.3.1. Pérdidas de carga en la instalación.....	137
6.4. Descalcificación.....	141
6.4.1. Justificación.....	141
6.4.2. Descripción.....	142
6.4.3. Cálculos y dimensionamiento.....	143
6.5. Decloración en lecho CAG.....	153
6.5.1. Justificación	153
6.5.2. Doble lecho CAG en serie.....	154
6.5.3. Cálculos y dimensionamiento de la etapa.....	155
6.6. Doble ósmosis inversa con acumulación intermedia.....	165
6.6.1. Justificación.....	165
6.6.2. Ecuaciones y balances másicos de la etapa.....	166
6.6.3. Primera ósmosis inversa 1.....	168
6.6.4. Acumulación intermedia.....	181
6.6.4.1. Diseño.....	181
6.6.5. Segunda ósmosis inversa.....	183
6.7. Sistema de distribución de agua a cada puesto de HD.....	189
6.7.1. Materiales y especificaciones constructivas.....	190
6.7.2. Anillo y retorno a la acumulación intermedia.....	191
6.7.3. Bombas recirculadoras.....	196
6.7.4. Desinfección con luz ultravioleta.....	196
6.7.5. Filtración bacteriana.....	202
7 CONCLUSIONES.....	206
8 DESARROLLOS FUTUROS PROPUESTOS.....	210
9 BIBLIOGRAFÍA.....	215
10 ANEXOS	
10.1. Norma UNE 111-301-90.....	223
10.2. Ficha de características de cartuchos de polipropileno GESFILTER.....	225
10.3. Ficha de características del cabezal hidráulico V250 de SIATA.....	227

10.4.	Hoja de características de resina DOWEX MARATHON C.....	229
10.5.	Ficha de características del CAG CENTAUR 12x40 de CALGON.....	232
10.6.	Características de la membrana RO - 390 de la marca DOW CHEMICAL.....	234
10.7.	Ficha de características de lámpara TUV T5 de PHILIPS...	236
10.8.	Ficha de características de filtros para agua ultrapura ZTEC E de GRAVER TECHNOLOGIES.....	238



1- JUSTIFICACIÓN Y OBJETIVOS.



Universidad de Valladolid

DISEÑO DE UNA PLANTA DE
PRODUCCIÓN DE AGUA PARA LÍQUIDO
DE DIÁLISIS.



**ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES**



1.1. Justificación.

A pesar del buen funcionamiento del sistema de trasplantes en España, la demanda de un trasplante de riñón sigue una tendencia al alza, producida seguramente por unas costumbres sedentarias y por unos hábitos alimenticios deficientes.

Se espera en un futuro que la tendencia continúe, por lo que el tratamiento de la enfermedad renal crónica requerirá de un mayor uso de la diálisis.

Para garantizar un tratamiento adecuado a los pacientes es necesario disponer de una fuente de agua de gran calidad, que cumpla con la normativa, pero que incluso vaya más allá para intentar acercarse al agua pura.

Por otro lado el suministro debe ser constante, de modo que en la medida de lo posible no se vea afectado por una avería que paralice la unidad de hemodiálisis. Si esto ocurre los pacientes deben ser trasladados a otros centros para continuar su tratamiento lo antes posible, pero puede ocurrir que esto, en un futuro, sea cada vez más difícil por la saturación de los centros hospitalarios y el alto coste de las clínicas privadas.

Por todo lo anterior creo que disponer de un modelo de planta para producir el agua de hemodiálisis, que asegure la fiabilidad de una unidad de hemodiálisis es fundamental para un ofrecer un buen servicio al ciudadano desde la sanidad pública.

1.2. Objetivos:

Los objetivos de este trabajo son:



- Diseñar una planta de producción de agua para hemodiálisis, de acuerdo al estado actual de la técnica, de la normativa vigente y, de forma que se garantice una máxima calidad del agua junto con la mayor continuidad posible en el suministro.
- Dimensionar cada una de las etapas de las que consta la planta, para conseguir un rendimiento y una calidad del agua óptima.

1.3. Normativa de aplicación

La norma básica y de obligado cumplimiento en España es la **UNE 111-301-90** de Enero de 1990 (ANEXO1).

Sin carácter normativo pero basándose en la evidencia científica y en la experiencia de trabajo, también hay que tener en cuenta las **“Guías de Gestión de Calidad del Líquido de Diálisis”** de la **Sociedad Española de Nefrología**, en las que se comparan las recomendaciones internacionales existentes y se sintetizan en unas recomendaciones para España. En la Guía, se especifica que la hemodiálisis requiere el uso de un agua purificada que se ajuste al mínimo exigido por las Recomendaciones de la Farmacopea Europea y Española.

Una norma norteamericana de referencia para la producción de agua para hemodiálisis es la ANSI/AAMI Standard RD 62:2006, “Water Treatment Equipment for Hemodialysis Applications”.

Por otro lado el agua de consumo humano debe cumplir con el RD 140/2003, de 7 de febrero, por el que se establecen los criterios sanitarios de la calidad del agua de consumo humano. En este Real Decreto se especifican los valores máximos de varias sustancias presentes normalmente en el agua. También debe cumplir si abastece a un edificio de uso colectivo el RD 865/2003, de 4 de julio, por el que se establecen los criterios higiénico-sanitarios para la prevención y control de la legionelosis.

2- DIÁLISIS



2. DIÁLISIS.

En el cuerpo humano, los riñones son los órganos que filtran la sangre eliminando el exceso de líquido, los minerales y los desechos. Los riñones también producen hormonas que mantienen los huesos y la sangre sanos. Cuando los riñones fallan, las sustancias químicas que las células excretan como desechos no se eliminan, se van acumulando en el cuerpo, la presión arterial puede aumentar y el cuerpo puede retener exceso de líquido y no producir suficientes glóbulos rojos. Si el fallo renal es severo o, aun no siéndolo, la situación se prolonga durante cierto tiempo, el resultado final será la muerte del paciente.

La diálisis es el método más común para tratar la insuficiencia renal avanzada y permanente. Se lleva realizando desde la década de los sesenta, cuando la hemodiálisis se convirtió por primera vez en un tratamiento práctico para la insuficiencia renal.

En los últimos años, los aparatos para diálisis más modernos y fiables han hecho que la diálisis se haya convertido en una técnica muy segura. Pero incluso con los mejores procedimientos y equipos, la diálisis sigue dependiendo de forma crucial de la calidad del agua que necesitan para funcionar.

Existen dos técnicas principales de diálisis, ambas necesitan como componente básico agua ultrapura:

- La hemodiálisis.
- La diálisis peritoneal.

2.1. La hemodiálisis

En el procedimiento de hemodiálisis la sangre del paciente es impulsada externamente a través de un dispositivo filtrante, llamado dializador, y una

vez depurada es restituida al sistema vascular. Se trata de un procedimiento de circulación extracorpórea a través de este filtro, impulsado y controlado por un equipo especial.

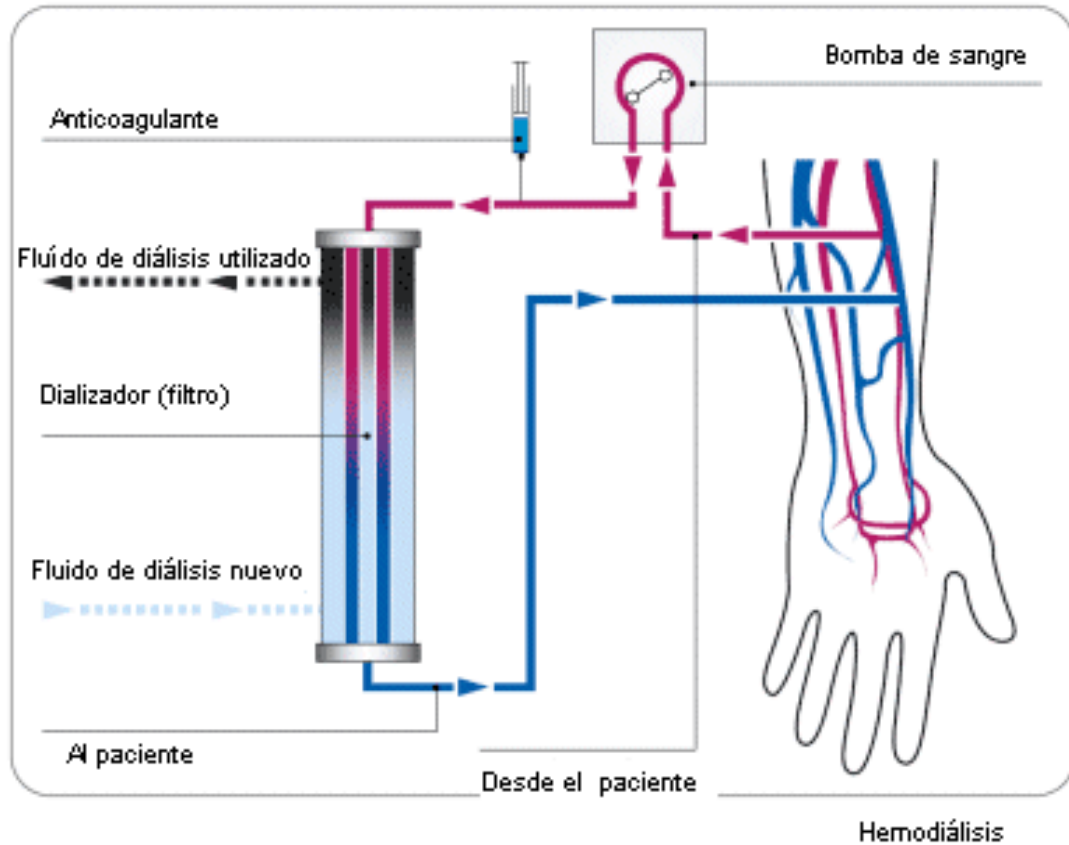


Figura 2.1 Esquema de principio de la hemodiálisis.

2.1.1. Monitor de hemodiálisis.

El aparato para la hemodiálisis cumple con cuatro funciones principalmente:

- Bombear la sangre y controlar su flujo de manera segura.
- Constituir el líquido de diálisis.
- Filtrar los desechos de la sangre en el dializador.
- Controlar la presión arterial y la velocidad de eliminación de líquido del cuerpo.

El monitor de hemodiálisis, comprende una bomba impulsora de la sangre y dispositivos de programación, seguimiento y control, que permiten

fijar los parámetros del tratamiento con la fiabilidad y seguridad requeridas. Durante el tratamiento se administra la medicación necesaria, por ejemplo la heparina, que evita la coagulación de la sangre cuando entra en contacto con todos estos elementos del circuito extraños al cuerpo.



Figura 2.2 Detalle de un monitor de hemodiálisis.



Figura 2.3 Vista general de los monitores de hemodiálisis.

El dializador está formado por un haz de miles de pequeñísimos tubos de grosor similar al cabello humano, por cuyo interior circula la sangre. La pared de estos tubos es una delgada membrana sintética, similar a las de ósmosis inversa, que permite el paso desde la sangre del paciente de las toxinas y

agua en exceso, sin permitir la pérdida de proteínas y otros componentes vitales. Por el exterior de estos tubos circula el líquido de diálisis, que es una solución salina, cuyo cometido es disolver las toxinas y sustancias filtradas y equilibrar el balance iónico del paciente.



Figura 2.4 Detalle de los tubos capilares del dializador.

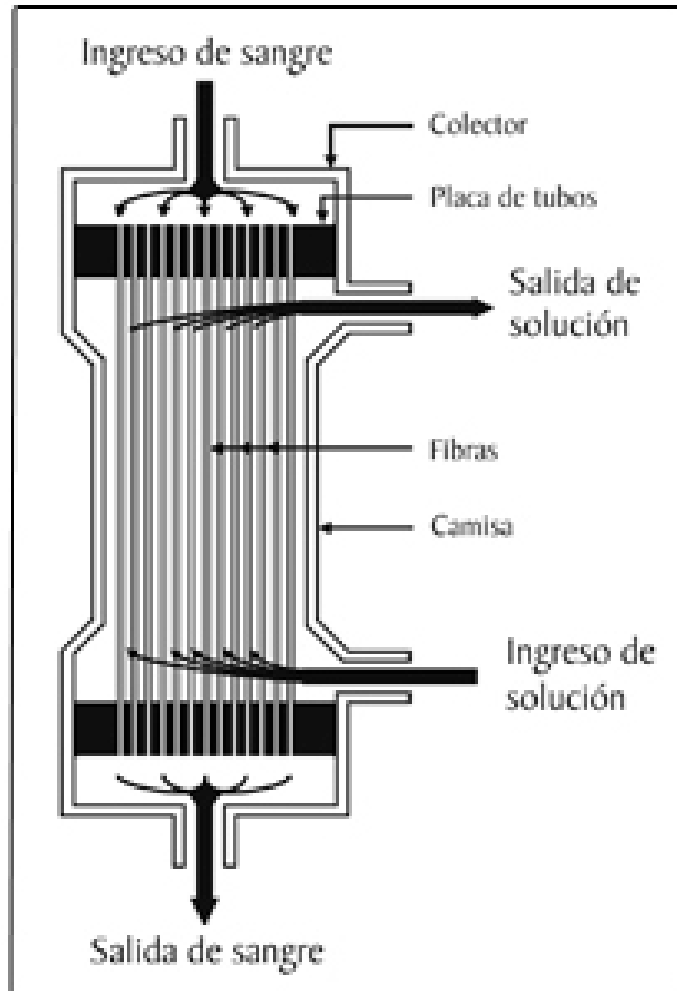


Figura 2.5 Estructura de un dializador de fibra hueca común.

2.1.2. El líquido de diálisis (LD).

Es un elemento fundamental de la hemodiálisis. Es un medio líquido que se pone en contacto con la sangre a través de la membrana semipermeable del dializador durante la sesión de hemodiálisis.

Se trata de una solución electrolítica preparada extemporáneamente por el monitor de hemodiálisis a partir de agua purificada y solutos proporcionados en forma de concentrados electrolíticos o sales no disueltas. La composición del LD así formada es prácticamente isotónica y tiene una composición electrolítica parecida al plasma. Las diferencias de sus concentraciones están en función de los gradientes necesarios para lograr los



balances adecuados de cada sustancia, en función de las necesidades del paciente.

2.1.3. Extracción de toxinas mediante la hemodiálisis.

Los tubos capilares del dializador, cerca de 10.000 unidades tienen un diámetro de 0,3 mm y están constituidos por una membrana porosa. Por su interior circula la sangre y por su exterior fluye en dirección opuesta el líquido de diálisis.

La transferencia de toxinas metabólicas a través de la membrana hacia la solución externa se basa en el fenómeno físico de la difusión. Cuando dos líquidos con concentraciones diferentes de algunos componentes se encuentran separados por una membrana porosa, las moléculas de mayor concentración a un lado de la membrana transitan a través de los poros de la misma hacia el otro lado hasta igualar concentraciones. Las moléculas grandes como las proteínas, al igual que las células, no tienen posibilidad de pasar porque su tamaño excede el diámetro de los poros selectivos y de este modo son retenidas. Se nota la importancia crítica de la estructura del material de la membrana pues debe asegurar la selectividad de sus poros, además de ser biocompatible con la sangre.

Otro proceso físico que regula el tránsito de sustancias a través de la membrana semipermeable es debido a una diferencia de presiones entre las dos soluciones líquidas separadas por la membrana porosa. Por efecto de una mayor presión en una de las soluciones a uno de los lados de la membrana (el circuito de sangre), las moléculas de agua de la sangre son impulsadas a través de los poros hacia el lado de menor presión (el circuito de solución clarificante). Ese movimiento de masa arrastra consigo los componentes tóxicos que pueden pasar por los poros hacia el líquido de diálisis.

En la hemodiálisis los dos procesos físicos actúan simultáneamente, dependiendo de las características de la membrana y de las condiciones de

presión y concentraciones de algunas sales fijadas por el monitor que controla la diálisis. Prescribiendo adecuadamente la diálisis, se logra la eliminación del excedente de agua y de las toxinas acumuladas que afectan al paciente al inicio del tratamiento.

2.2. Diálisis peritoneal

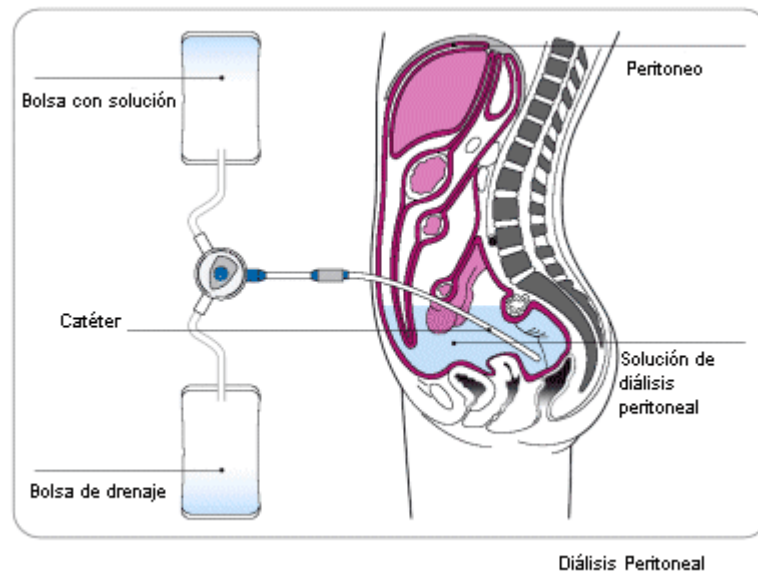


Figura 2.6 Esquema de funcionamiento de la diálisis peritoneal.

El peritoneo es una membrana que envuelve los órganos internos del abdomen y está irrigada por finos vasos sanguíneos. Su estructura permeable permite la filtración selectiva de los componentes de la sangre que deben ser eliminados, con la ventaja de ser un tejido natural propio del paciente, evitando el contacto prolongado de la sangre fuera del cuerpo con materiales sintéticos y la circulación fuera del cuerpo.

La solución de diálisis peritoneal es introducida dentro de la cavidad peritoneal por medio de un catéter que se coloca en el abdomen del paciente mediante una intervención quirúrgica simple. Un extremo del catéter se ubica próximo a la pelvis detrás de la vejiga y el otro extremo sale a través de la pared abdominal. Las toxinas metabólicas se filtran desde los vasos capilares



sanguíneos que irrigan la membrana peritoneal hacia la solución clarificante que se encuentra en la cavidad abdominal.

La solución clarificante contiene concentraciones elevadas de dextrosa, de este modo, mediante un proceso de ósmosis, se produce una transferencia de agua desde la sangre que circula por los vasos que irrigan el peritoneo hacia la solución, a través de dicha membrana. Los componentes tóxicos también se transfieren desde la sangre a la solución por difusión a través de la membrana. El líquido conteniendo todos estos componentes extraídos, es luego drenado a través del catéter, eliminándose de este modo tanto las toxinas como el exceso de agua extraídos del paciente.

Esta técnica en la mayoría de los casos el paciente la lleva a cabo en su casa, pero en algunas ocasiones debe realizarse en el centro hospitalario, en cuyo caso se hará uso del agua ultrapura producida para la hemodiálisis.

2.2.1. Extracción de toxinas mediante la diálisis peritoneal.

En el caso de la diálisis peritoneal, el tránsito de los componentes tóxicos desde la sangre hacia la solución clarificante a través de los poros de la membrana peritoneal, ocurre por difusión. La eliminación del exceso de agua acumulada en el cuerpo del paciente se alcanza por un fenómeno de ósmosis, debido a la presencia de una elevada concentración de moléculas de dextrosa en la solución clarificante. Estas moléculas no pueden atravesar los poros del peritoneo, por lo tanto la fuerza natural que tiende a igualar concentraciones hace que se produzca el paso, en este caso de agua desde la sangre hacia el líquido clarificante, disminuyendo así la concentración de glucosa de esta segunda solución. Mediante sucesivos recambios del líquido clarificante a través del catéter implantado, se extrae el exceso de agua y de toxinas acumuladas en el cuerpo del paciente.



3- AGUA DE DIÁLISIS.



3. AGUA DE DIÁLISIS.

El agua de diálisis se utiliza para preparar el líquido de diálisis, siendo más de un 96% de su contenido. El LD finalmente se pone en contacto con el paciente a través del dializador, en una cantidad de entre 90 y 240 litros por sesión aproximadamente.

Al ser el agua el principal componente del LD se requiere un control constante de su calidad durante la producción. Algunos contaminantes del agua se pueden transferir al paciente y acumularse en grandes cantidades. A esto habría que sumar el hecho de que la insuficiencia renal le impide eliminar los contaminantes, pudiéndole ocasionar una verdadera intoxicación. Por tanto el agua de diálisis, debe cumplir estrictamente y en todo momento los estándares de calidad definidos por la normativa.

Históricamente, al comienzo de la hemodiálisis, el tratamiento del agua simplemente intentaba prevenir el síndrome de agua dura y las contaminaciones bacterianas. Posteriormente hubo que enfrentarse a contaminantes difíciles de eliminar como es el caso de algunos metales, como el aluminio, cuya intoxicación produce encefalopatía y osteomalacia, o el caso de las cloraminas, que pueden provocar anemia por hemólisis en las unidades de hemodiálisis.

Actualmente se intenta conseguir un líquido de hemodiálisis ultra puro, que sólo contenga agua y los componentes necesarios con un grado de pureza como el que se exige para las soluciones para infusión intravenosa. Una parte importante de la biocompatibilidad de la técnica de HD la constituye el líquido de diálisis y de ahí la importancia de su nivel de calidad.

3.1. Calidad necesaria del agua producida.

Como norma básica, han de satisfacerse como mínimo los niveles químicos y microbiológicos recomendados en la Real Farmacopea Española y en la Farmacopea Europea. Además, se considera preceptivo, el cumplimiento



de las recomendaciones recogidas en la Guía de Gestión de la Calidad del Líquido de Diálisis, editado por la Sociedad Española de Nefrología, en Marzo del 2006.

3.1.1. Niveles microbiológicos.

Las bacterias y otros microorganismos se encuentran y reproducen en todo tipo de medios acuáticos, por tanto es posible encontrar este tipo de contaminación en el agua destinada a diálisis, con el consiguiente riesgo de infección del paciente. Para evitar esta circunstancia se han establecido los siguientes límites:

- Bacterias: El agua purificada que se emplea para diluir el concentrado de diálisis, debe contener menos de 100 UFC/ml.
- Endotoxinas: En el agua purificada para hemodiálisis no debe exceder las 0,25 UE/ml.
- Hongos: La Real Farmacopea Española no establece unos límites de contaminación específicos para hongos en el agua de diálisis.

3.1.2. Conductividad.

La conductividad eléctrica de una disolución es función de la cantidad de electrolitos que contiene, por tanto es un excelente indicador de la pureza de un agua. Es el parámetro más importante para el control de la pureza del agua para diálisis.

El valor máximo para la conductividad es de 4,3 $\mu\text{S}/\text{cm}$ a 20° C.

3.1.3. Valores límite para los contaminantes químicos.

Las sustancias químicas disueltas en el agua a la salida de la planta no deberán exceder ninguno de los siguientes valores expresados en mg/l:



Tabla 3.1 Niveles máximos de elementos químicos en el agua de diálisis.

Sustancias que se adicionan al líquido de diálisis.	
Calcio	2
Magnesio	2
Sodio	50
Potasio	2
Sustancias tóxicas reguladas para el agua potable.	
Antimonio	0,006
Arsénico	0,005
Bario	0,1
Berilio	0,0004
Cadmio	0,001
Cromo	0,014
Plomo	0,005
Mercurio	0,001
Selenio	0,09
Plata	0,005
Sustancias identificadas como tóxicas en diálisis.	
Aluminio	0,01
Amonio	0,2
Cloraminas	0,1
Cloro libre	0,5
Cloruros	50



Cobre	0,1
Flúor	0,2
Nitrato (como N)	2
Sulfatos	50
Talio	0,002
Zinc	0,1
Metales pesados	0,1

Las metodologías para la determinación de todos los anteriores elementos químicos se describen en European Pharmacopoeia 4.3 01/2003:1167, pag 3049.

3.1.4. Contaminantes problemáticos.

Existen sustancias en el agua a las que hay que prestar especial atención, ya sea por su peligrosidad para el paciente o por interferir en el funcionamiento de alguna etapa de la producción del agua. En algunos casos ya se ha especificado su valor límite en el apartado anterior, pero es interesante explicar un poco más algunos aspectos particulares:

- **El aluminio:** Puede encontrarse en el agua como ión, asociado a sales o bien, en forma coloidal, unido a la materia orgánica. Dependiendo del pH del agua, la forma iónica puede variar a su vez entre un catión trivalente o un anión complejo.

El aluminio normalmente no procede de fuentes naturales, si no de su uso en los tratamientos previos de potabilización del agua. En dichos procesos suele ser común la utilización de productos químicos para coagular y flocular los coloides presentes en el agua de manera natural, y así poder eliminar esta materia sólida por sedimentación o filtración. Por ejemplo se usa el sulfato de aluminio ($Al_2(SO_4)_3$), que cede un catión de aluminio



trivalente, y el hidroxiclorigenato de aluminio ($\text{Al}_n(\text{OH})_m\text{Cl}_{(3n-m)}\cdot\text{H}_2\text{O}$), donde $0 < m < 3n$, que es un polímero inorgánico catiónico muy soluble, por lo que si se dosifica en exceso pasa a formar parte del aluminio coloidal.

Su eliminación no es fácil, los descalcificadores eliminarían sólo sus formas catiónicas y el aluminio coloidal sólo se podría eliminar por ósmosis inversa, siendo las resinas de intercambio iónico incapaces de hacerlo. Además, en los casos en los que el aluminio se añade al agua como floculante de la materia orgánica, alcanzando niveles muy elevados, la única forma de conseguir niveles óptimos en el líquido de diálisis sería trabajando en serie con dos ósmosis inversas o bien con un descalcificador previo a una etapa de ósmosis inversa.

o **Cloro y cloraminas:** El cloro, debido a su gran capacidad germicida, se añade al agua potable como desinfectante, para ello se usan principalmente tres especies químicas:

- **Cloro gas** Cl_2 .
- **Hipoclorito sódico** NaClO (lejía común) o **hipoclorito cálcico** $\text{Ca}(\text{ClO})_2$.
- **Cloraminas:** generalmente se usa la monoclaramina (ClNH_2) debido a que no da sabor al agua.

Las cloraminas, a veces pueden encontrarse en el agua aunque no se hayan usado como desinfectante. Esto puede ocurrir si en el agua hubiese previamente trazas de amoníaco y se añadiese cloro como desinfectante. De hecho las compañías suministradoras de agua cuando deciden usar cloraminas para desinfectar, no añaden esta sustancia química como tal, si no, que realizan una cloración normal y aguas abajo dosifican amoníaco de modo que a un pH cercano a 7, consiguen una conversión casi total del cloro libre a monoclaramina.

La cantidad de cloraminas presentes en el agua se determina analíticamente por la medición de cloro total residual, y a este valor se le



resta la cantidad de cloro libre. Esta forma de medir las cloraminas lleva implícita la suposición de que todo el cloro combinado se halla en forma de cloraminas, lo cual suele suponer, en la mayoría de los casos un error despreciable.

Las cloraminas debido a que no son apenas polares y a su bajo peso molecular, no son rechazadas mediante ósmosis inversa. Hasta hace poco tiempo sólo existían dos formas de ser eliminadas de una corriente de agua, pero en el momento actual se están aplicando con éxito nuevos métodos. Uno es el carbón activo catalítico, el cual se diseña para retener específicamente las cloraminas, consiguiéndose rendimientos de casi cuatro veces los del carbón activo normal. Por último la radiación ultravioleta para destruir la molécula, aunque aún es una técnica muy novedosa. Por tanto actualmente existen cuatro métodos para su eliminación:

- Mediante un reductor como el bisulfito de sodio o el ácido ascórbico.
- Mediante carbón activo.
- Mediante carbón activo catalítico.
- Radiación UV.

Como ya hemos comentado, las cloraminas pueden contaminar el LD y pasar a la sangre de los pacientes, produciendo graves trastornos en la salud de los mismos. Para prevenir estos graves problemas es necesaria su eliminación completa del agua para preparar el líquido de diálisis, mediante un correcto funcionamiento de la planta de producción de agua.

○ **Hierro y Manganeso.**

El hierro y el manganeso no son especialmente problemáticos de cara al paciente de hemodiálisis, pero sí lo son en cuanto a su interferencia con algunos tratamientos del agua. Son elementos muy comunes en la mayoría de aguas.



La química del hierro en el agua es bastante compleja y muy parecida a la del manganeso. El hierro existe en disolución en forma de ión ferroso Fe^{+2} y de ión férrico Fe^{+3} , siendo muy soluble el primero en aguas neutras o ligeramente ácidas. Sin embargo es inestable en presencia de aire, en cuyo caso pasa a ión férrico, el cual es prácticamente insoluble en aguas con pH mayor de 6.

Generalmente el agua de consumo humano en núcleos de cierta población proviene de suministros superficiales, como ríos o lagos por lo que suele contener suficiente cantidad de oxígeno. Más adelante en la ETAP municipal suele sufrir un tratamiento de desinfección mediante agentes oxidantes como el cloro. Por tanto normalmente será difícil encontrar la forma reducida y más soluble del hierro, y se encontrará como Fe^{+3} , por lo que podrá ser retenido en procesos de filtración o sedimentación. En caso contrario, si hubiese ión ferroso, debido por ejemplo a un aporte de agua de pozo, sería necesaria una etapa previa a la descalcificación para su eliminación debido al envenenamiento que sufrirían las resinas de intercambio iónico.

El hierro, además puede actuar como un catalizador en la oxidación de las MOI, favoreciendo el deterioro de las mismas. También puede reaccionar con los carbonatos presentes en el agua formando precipitados. Estos dos fenómenos muy peligrosos para las MOI, sin embargo pueden eliminarse fácilmente mediante una limpieza ácida de la membranas.

o **Subproductos de la desinfección (SPD):** Tanto el cloro gas como el hipoclorito sódico al cumplir con su acción desinfectante y reaccionar con la materia orgánica, acaban en parte, transformándose en trihalometanos, y ácidos haloacéticos, como subproductos de la desinfección, los cuales se ha comprobado que tienen un gran poder mutagénico y carcinogénico.

La Organización Mundial de la Salud (OMS), fija en 2004, unos valores guía para algunos subproductos, que se indican a continuación:

Tabla 3.2 Valores guía definidos por la OMS para algunos SPD.



SUBPRODUCTOS DE LA DESINFECCION EN mg/l.	
Cloroformo	0.2
Bromodiclorometano	0.06
Dibromoclorometano	0.1
Bromoformo	0.1
Acido Dicloroacetico	0.05
AcidoTricloroacetico	0.2
Bromato	0.01
Clorito	0.7
Hidrato de Cloral (tricloroacetaldehido)	0.01
Dicloroacetoniitrilo	0.02
Dibromoacetoniitrilo	0.07
Cloruro de Cianogeno	0.07
2,4,6-Triclorofenol	0.2
Formaldehido	0.9

Tabla 3.3. Información Toxicológica de los SPD [16].

INFORMACIÓN TOXICOLÓGICA DE LOS SPD			
Clase de subproducto	Compuesto	Clasificación EPA	Efectos nocivos
Trihalometanos (THM)	Cloroformo	B2	Cáncer, hígado, riñón, efectos sobre la reproducción
	Dibromoclorometano	C	Sistema nervioso, hígado, riñón, efectos sobre la reproducción
	Bromodichlorometano	B2	Cáncer, hígado, riñón, efectos sobre la reproducción
	Bromoformo	B2	Cáncer, sistema nervioso, hígado, efectos sobre el riñón
Haloacetónitrilo (HAN)	Tricloroacetónitrilo	C	Cáncer, efectos mutagénicos y clastogénicos
Aldehídos halogenados y cetonas	Formaldehído	B1	Mutagénicos *
Halofenol	2-Chlorofenol	D	Cáncer, agente de tumores
Ácidos haloacéticos (AHA)	Ácido dicloroacético	B2	Cáncer, efectos sobre la reproducción y el desarrollo
	Ácido tricloroacético	C	Hígado, riñón, bazo, efectos sobre el desarrollo
Compuestos inorgánicos	Bromatos	B2	Cáncer
	Cloritos	D	Efectos sobre el desarrollo y la reproducción

A: carcinógeno humano, B1: carcinógeno humano probable (con alguna evidencia epidemiológica), B2: carcinógeno humano probable (evidencia de laboratorio suficiente), C: carcinógeno humano posible, D: no clasificable, *: exposición por inhalación. Modificada de EPA (1999b).

o **Pesticidas y plaguicidas:** Generalmente provienen de los lixiviados de las tierras de cultivo. Actualmente existen pruebas abrumadoras de que el uso agrícola de los plaguicidas tiene importantes efectos en la calidad del agua, y en función principalmente de su capacidad específica de acumulación en el cuerpo humano pueden provocar graves problemas de salud.



4- TÉCNICAS DE TRATAMIENTO DE AGUA.



Universidad de Valladolid

DISEÑO DE UNA PLANTA DE
PRODUCCIÓN DE AGUA PARA LÍQUIDO
DE DIÁLISIS.



ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES



4. TÉCNICAS DE TRATAMIENTO DEL AGUA.

En este apartado se van a mostrar los fundamentos y aspectos teóricos de las técnicas para tratar el agua, relacionados con los procesos de tratamiento que se aplicarán en la planta de producción de agua para diálisis.

4.1 Filtración.

La filtración consiste en la separación de las partículas sólidas en suspensión presentes en una corriente de agua, al atravesar un medio poroso.

La filtración es una operación compleja debido a la gran cantidad de parámetros implicados y la variedad de las condiciones de funcionamiento. A pesar de los grandes esfuerzos realizados no se ha podido encontrar una teoría general válida que explique correctamente el fenómeno de la filtración, por lo que la técnica actual sigue siendo muy dependiente de los estudios experimentales para cada medio filtrante, variables físicas y tipo de suspensión.

4.1.1. Mecanismos de la filtración.

Dado que las fuerzas que mantienen a las partículas separadas de la suspensión, adheridas a la superficie del medio filtrante son activas para distancias de unos pocos amstrongs, la filtración usualmente es considerada como el resultado de dos acciones distintas:

- Transporte hasta la superficie del medio filtrante.
- Adherencia a la superficie del medio filtrante.

Las partículas que se van a extraer de la suspensión, previamente, tienen que ser transportadas desde el seno de la disolución hasta la superficie del medio filtrante, donde las partículas permanecerán adheridas, siempre que resistan la acción de las fuerzas de cizallamiento debidas a las condiciones hidrodinámicas de la corriente al atravesar el medio filtrante.



El transporte de partículas es un fenómeno físico. La adherencia entre partículas y medio filtrante es básicamente un fenómeno de acción superficial, influenciado por parámetros físicos y químicos.

Los mecanismos que pueden realizar transporte son los siguientes:

- Cribado.
- Sedimentación.
- Impacto inercial.
- Difusión.
- Acción hidrodinámica.
- Mecanismos de transporte combinados.

Los mecanismos de adherencia son los siguientes:

- Fuerzas de Van der Waals;
- Fuerzas electroquímicas;
- Enlace químico.

Durante la filtración, para un sistema en concreto, puede actuar en mayor grado uno de estos mecanismos, controlando el proceso, pero también puede ocurrir que se dé una combinación de varios, e incluso que varíe a lo largo del proceso.

Dada la complejidad del fenómeno, es de esperar que más de un mecanismo estará actuando para transportar los diferentes tamaños de partículas hasta la superficie del medio filtrante y dejarlas adheridas.

Si la filtración se produce en las capas superficiales, parece que el mecanismo dominante será el cribado, por el contrario si la filtración ocurre en todo el lecho filtrante el cribado podría ser despreciable. Este hecho posibilita que se pueda distinguir dos tipos de filtración:

- Filtración en superficie.



- Filtración en profundidad.

La filtración en superficie sólo suele ser eficiente para un determinado tamaño de partícula dejando pasar la mayoría de las partículas más pequeñas, es muy sensible a posibles caminos preferentes, pudiendo provocar un escape de sólidos en caso de rotura de medio filtrante.

En la filtración en profundidad, el medio filtrante presenta mayor espesor y sus poros son de tamaño desigual, incluso pueden ser mayores que el de las partículas a retener. Este tipo de filtración es mucho más eficiente, ya que consigue retener la mayoría de las partículas cualquiera que sea su tamaño, si bien existe un rango variable, según las características del sistema y condiciones físicas, alrededor del tamaño de $1\ \mu\text{m}$, en el que la eficiencia es menor. En este caso, además, el tiempo que se mantiene operativo el filtro es sensiblemente superior al de filtración en superficie.

4.1.1.1. Mecanismos de transporte en la filtración.

- Cribado

Tiene lugar cuando la partícula es de tamaño mayor que los intersticios del lecho filtrante por lo que queda atrapada bloqueando total o parcialmente el paso a través del mencionado intersticio. Está claro que este mecanismo actuará preferentemente en las capas más superficiales del lecho y con partículas relativamente fuertes, capaces de resistir los esfuerzos cortantes producidos por el flujo, cuya velocidad aumenta en las constricciones.

- Sedimentación

Se produce por efecto de la gravedad sobre las partículas suspendidas durante la filtración, en aquellos huecos del medio filtrante donde la velocidad del paso de agua sea menor que la de sedimentación. La contribución de este mecanismo no se considera significativa, ya que



realmente es difícil que se den las condiciones adecuadas salvo quizás dentro de algunos poros del medio filtrante.

- Intercepción

Normalmente, el régimen de escurrimiento durante la filtración es laminar y, por lo tanto, las partículas se mueven a lo largo de las líneas de corriente. Debido a que las partículas suspendidas tienen una densidad aproximadamente igual a la del agua, ellas serán removidas de la suspensión cuando, en relación con la superficie de los granos del medio filtrante, las líneas de corriente estén a una distancia menor que la mitad del diámetro de las partículas suspendidas.

- Difusión

Se ha observado que las partículas relativamente pequeñas presentan un movimiento errático cuando se encuentran suspendidas en un medio líquido. Este fenómeno, resultado de un bombardeo intenso a las partículas suspendidas por las moléculas de agua, es conocido como movimiento browniano, y se debe al aumento de la energía termodinámica y a la disminución de la viscosidad del agua.

La eficiencia del filtro debida a la difusión es directamente proporcional a la temperatura e inversamente proporcional al diámetro de la partícula del grano.

- Impacto inercial

Durante el escurrimiento, las líneas de corriente divergen al estar cerca de los granos del medio filtrante, de modo que las partículas suspendidas, con cantidad de movimiento suficiente para mantener su trayectoria, colisionan con los granos.

4.1.1.2. Mecanismos de adherencia en la filtración.



La adherencia entre las partículas transportadas y los granos está gobernada, principalmente, por las características de las superficies de las partículas suspendidas y de los granos del medio filtrante. Las partículas se pueden adherir directamente tanto a la superficie de los granos como a partículas previamente retenidas.

La adherencia se atribuye a dos tipos de fenómenos: interacción entre las fuerzas electrostáticas y de Van der Waals, y al enlace químico entre las partículas y la superficie de los granos del medio filtrante.

- Interacción combinada de las fuerzas electrostáticas y las de Van der Waals

Las partículas sólidas en suspensión en el agua, normalmente presentan cargas electrostáticas en sus superficies, debido a las siguientes razones:

- Disociación de iones en la superficie de las partículas.
- Cargas no compensadas debido a las imperfecciones de la estructura del cristal.
- Reacciones químicas con iones específicos de la suspensión, con formación de enlaces químicos.
- Sustitución isomórfica en la estructura del cristal.

En la interfase sólido-líquido existe una capa de iones de carga opuesta a la del sólido, conocida como capa estacionaria o compacta, y otra de iones esparcidos, también de carga opuesta, denominada capa difusa. Esta capa electroquímica doble, establece un potencial de repulsión entre las partículas de la suspensión con cargas eléctricas semejantes. La magnitud de este potencial de repulsión y la distancia a la cual se extiende su campo de acción depende de las características químicas de la suspensión. Las características de la interfase sólido-líquido han sido evaluadas en términos del potencial Z , que es la medida de la energía requerida para llevar una carga unitaria desde el infinito hasta un plano que separe el resto de la dispersión, a la sección de la capa difusa que se mueve junto con las partículas, figura 4.1.

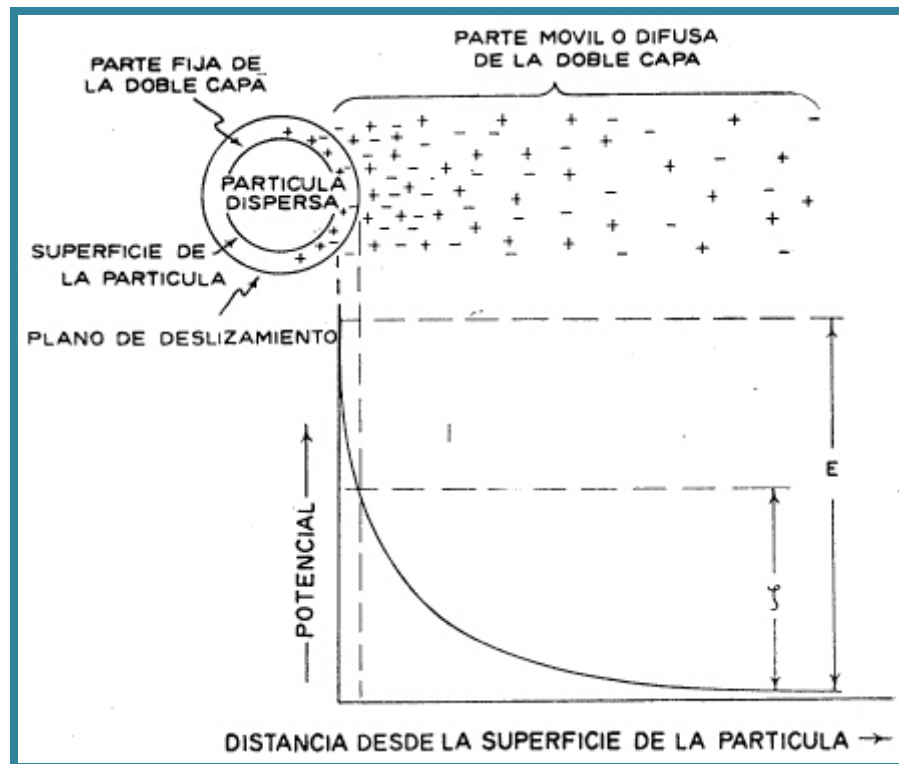


Figura 4.1 Esquema del modelo de capa fija y capa difusa para los coloides.

- Enlace químico entre las partículas y la superficie de los granos

Como se sabe, la desestabilización de los coloides se puede conseguir por los productos de la hidrólisis de algunas sales que a determinado pH se polimerizan. Las cadenas poliméricas adheridas a las partículas dejan sus segmentos extendidos en el agua, los cuales pueden ser adsorbidos por otras partículas o por sitios vacantes en los granos del filtro. Este fenómeno es independiente de las fuerzas de Van der Waals y de las cargas electrostáticas.

Las partículas con sus segmentos poliméricos adheridos, al atravesar las constricciones del medio filtrante, se enlazan con los segmentos sueltos adsorbidos por los granos o por los de partículas ya adheridas al lecho filtrante y quedan retenidas.



4.1.2. Filtración en lecho fijo.

Consiste en la deposición en la superficie del medio filtrante, generalmente granos de arena de los sólidos coloidales mientras el agua atraviesa el lecho filtrante. La eficacia del filtrado depende del tamaño, carga superficial y geometría, tanto de los sólidos suspendidos como de los granos del medio filtrante, y de los parámetros operacionales. Con un filtro bien diseñado se suelen conseguir valores de SDI < 5.

La dimensión en cuanto al tamaño de poro o capacidad de discriminación de la arena de los filtros puede llegar hasta la exclusión de partículas mayores de 5 μm , aunque normalmente serán de 20 μm . Si se quiere la eliminación de partículas por debajo de estas dimensiones habrá que recurrir a otros filtros posteriores en serie. Dependiendo de las características del agua bruta de entrada se llevará a cabo la elección de los filtros a instalar, siempre de mayor a menor tamaño de las partículas que sean capaces de retener.

Habitualmente para conseguir una mayor eficacia al separar los sólidos en suspensión, se usan lechos con los dos tipos de material, una primera capa de antracita sobre otra de arena. En este caso las alturas suelen ser respectivamente de 0,3 m y 0,5 m, y el tamaño de grano más eficaz está entre 0,35 – 0,5 mm para la arena y 0,7– 0,8 mm para la antracita.

Los caudales en este tipo de filtración están generalmente entre 10–20 $\text{m}^3/\text{m}^2\text{h}$. La presión de trabajo puede estar en torno a 4 bares. Es importante que no se produzcan variaciones de caudal bruscas para prevenir la liberación de partículas antes depositadas.

Durante la operación, el agua entra por la parte superior del filtro, atraviesa el lecho filtrante y sale por el fondo donde se recoge mediante un tubo central para ser devuelta de nuevo a la cabeza del filtro. Durante este proceso la evolución de la pérdida de carga y la turbidez del agua filtrada, puede verse en la figura 4.2. Periódicamente, cuando la caída de presión aumenta por encima de un cierto valor, el filtro es lavado a contracorriente



para eliminar la materia que se ha ido depositando en el lecho. Pero si antes de tener la pérdida de carga necesaria para el lavado, en el efluente del filtro comienza a aparecer turbidez en un grado no admisible, se dice que el filtro ha llegado a la perforación. En la figura 4.2 está representado este caso, mediante la turbidez e y el tiempo t_1 . Como no se ha alcanzado aún la pérdida de carga máxima, el filtro continuará filtrando aunque la calidad del efluente no sea aceptable. Esto nos indicará que el filtro está mal diseñado y una solución podría consistir en aumentar el espesor del lecho filtrante, de forma que la pérdida de carga máxima se alcance antes sin llegar a la perforación del filtro, manteniendo la turbidez durante la carrera del filtro, en todo momento en valores aceptable.

El proceso de lavado puede durar aproximadamente 10 minutos. Consistiendo en un lavado en contracorriente con la expansión del lecho en un porcentaje de un 50%. El siguiente paso es el lavado a favor de la corriente en el que se deberá descartar el efluente y se acomodarán de nuevo las capas del lecho.

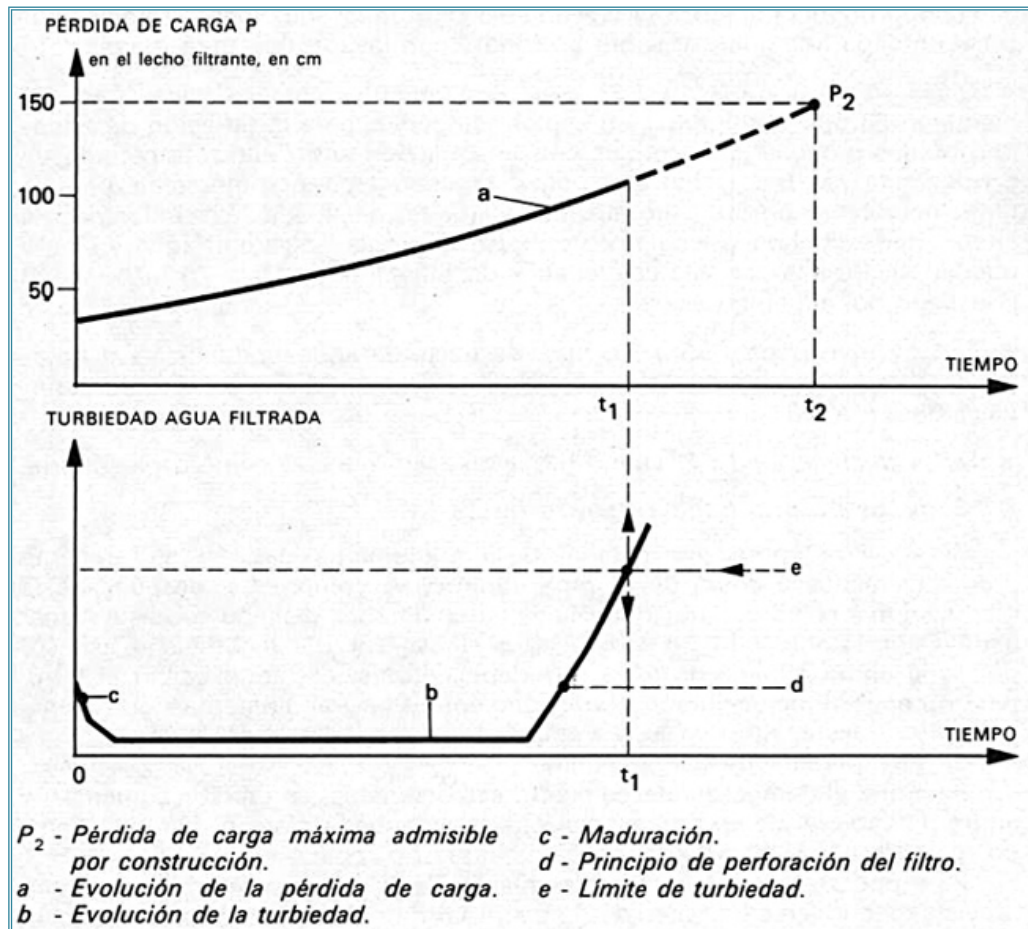


Figura 4.2 Diagrama de evolución de la pérdida de carga junto con la turbidez del efluente en un filtro de lecho de arena.

4.1.3. Filtración con cartuchos de polipropileno.

Los filtros de cartuchos de polipropileno se insertarán en diversas partes de la planta de tratamiento con dos objetivos principales:

- Retener las partículas por encima de un tamaño determinado de la corriente de agua.
- Reducir la fuga de sólidos de los lechos fijos cuando hay una avería, o simplemente que debido al uso se hayan fracturado algunos gránulos que lo constituyen, apareciendo finos que no pueden ser retenidos por las crepinas de los contenedores del lecho. (Una crepina, simplemente es un tamiz con una luz de malla un poco menor que el tamaño medio



de los gránulos que forman el lecho, situada en la tubería de salida para evitar la fuga de dicho material).

Los cartuchos filtrantes son muy adecuados debido a su bajo coste, durabilidad, y su falta de interacción química con el agua. Existen tres tipos según su tipo constructivo:

- Polipropileno sinterizado: Prestaciones suficientes.
- Polipropileno plisado: Es el más caro, su uso debe limitarse a situaciones en las que hay que mantener un alto caudal.
- Polipropileno bobinado: Son los más baratos pero su eficacia es menor frente al sinterizado.

Esencialmente existen dos formas de filtrar:

- Filtración en superficie.
- Filtración en profundidad.

La **filtración en superficie** se consigue por un medio filtrante cuyos poros son esencialmente más pequeños que el tamaño de las partículas a eliminar de la corriente de agua. Así las partículas sólidas son retenidas exclusivamente sobre la superficie del medio filtrante. Se trata de una filtración muy sensible a posibles caminos preferentes, pudiendo provocar un escape de sólidos en caso de rotura de medio filtrante.

En los cartuchos de polipropileno además de la filtración en superficie, se produce también **filtración en profundidad**, es decir, el medio filtrante presenta mayor espesor y sus poros son de tamaño desigual, incluso pueden ser mayores que el de las partículas a retener. En este caso, además de la **interceptación directa**, se dan fenómenos de **impacto inercial** e **interceptación difusa**, que posibilitan la retención de partículas de tamaño menor que los poros del medio filtrante. Por todo lo anterior se consigue una filtración de gran eficacia y el tiempo de vida del cartucho es sensiblemente superior comparado con otros sistemas que sólo aprovechan la filtración en superficie.



Figura 4.3 Cartucho filtrante de polipropileno sinterizado.

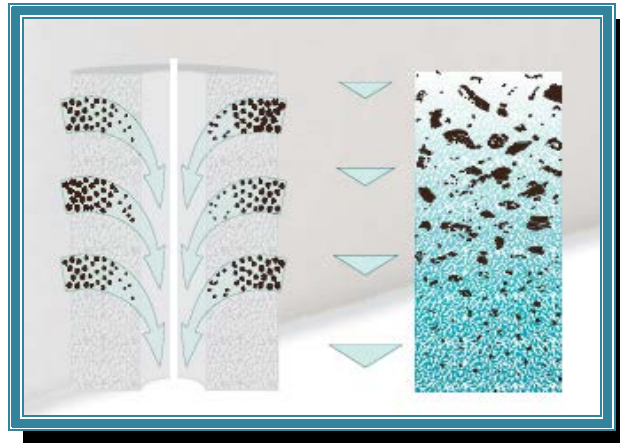


Figura 4.4 Filtración en profundidad en un cartucho de polipropileno.

Un filtro de cartucho con un grado de filtración de menos de $10\ \mu\text{m}$ es el último paso antes de una OI. En este sentido se trata de un dispositivo de seguridad para proteger las membranas y la bomba de partículas suspendidas.

Si hay riesgo de ensuciamiento por sílice coloidal o silicatos metálicos, se recomienda un filtrado de 1 a $3\ \mu\text{m}$. En realidad se suele usar una batería de cartuchos en serie con una reducción progresiva del grado de filtración, por ejemplo, mediante una secuencia de 20 , 10 , 5 y $1\ \mu\text{m}$.

El filtro debe equiparse con un manómetro para indicar la presión diferencial y de este modo hacernos una idea del grado de ensuciamiento. Normalmente al alcanzar una pérdida de carga de 0,5 bar, el cartucho deberá ser sustituido por otro nuevo. Si la frecuencia del cambio es menor de un mes o la presión diferencial aumenta rápidamente, puede ser indicativo de un problema en la planta o un deficiente diseño.

El filtro de cartucho, sin embargo, no está diseñado para eliminar grandes cantidades de sólidos ya que rápidamente se colmataría.



Figura 4.5 Carcasa y cartucho filtrante de polipropileno en su interior.

4.2. DESINFECCIÓN

La desinfección del agua significa la extracción, desactivación o eliminación de los microorganismos patógenos que se encuentran en el agua. La destrucción o desactivación de los microorganismos supone la imposibilidad de su reproducción y, por tanto se evita su proliferación.

4.2.1. Mediante derivados del cloro.



El cloro, debido a su gran capacidad germicida, se añade al agua potable como desinfectante, para ello se usan principalmente tres especies químicas:

- Cloro puro (en estado gaseoso Cl_2)
- Como hipocloritos ya sea sódico (NaClO) o cálcico (CaClO).
- Cloraminas, generalmente se usa la monoclорamina (ClNH_2) debido a que no da sabor al agua.

Tanto si se usa cloro puro como hipoclorito, el resultado es el mismo, apareciendo lo que se denomina **cloro libre**, es decir una mezcla de ácido hipocloroso y el anión hipoclorito disueltos en el agua.

El ácido hipocloroso (HClO) es un ácido débil que tiende a disociarse parcialmente, según la siguiente ecuación:



Las distribución porcentual de ácido hipocloroso e ión hipoclorito (OCl^-) depende fuertemente del pH, y en menor medida de la temperatura. En el agua de red normalmente el pH oscilará en valores muy próximos a 7, por lo que la concentración de ácido hipocloroso será aproximadamente del 67% y la de hipoclorito del 33% como se puede observar en la figura 4.6, según las siguientes reacciones consecutivas:

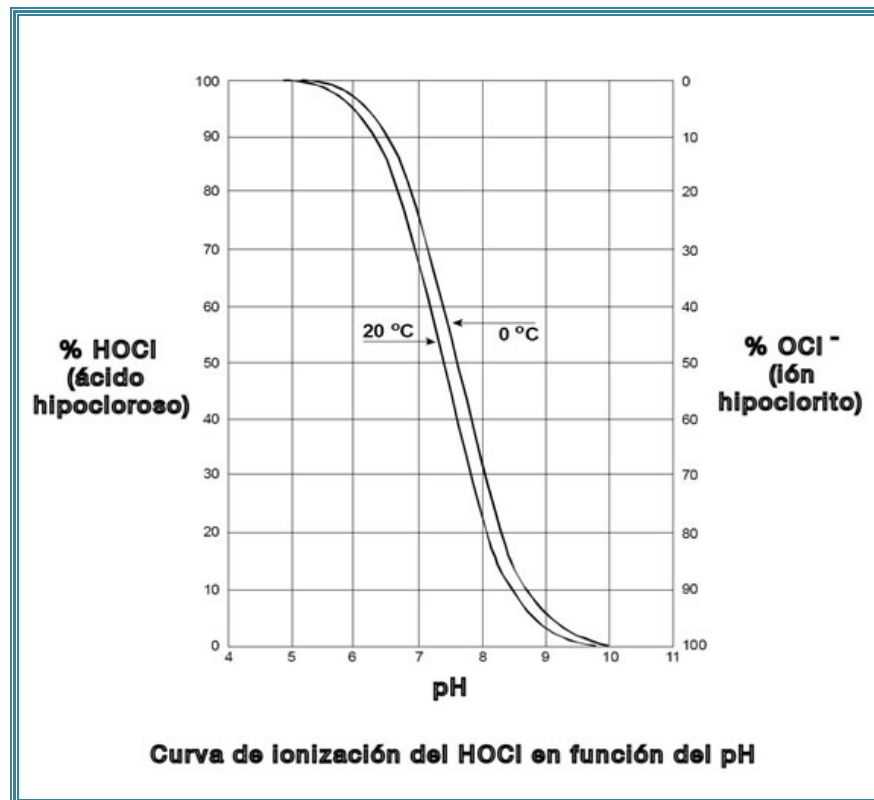


Figura 4.6 Diagrama porcentaje de ácido hipocloroso frente a pH.

Las **cloraminas** se forman al reaccionar el ácido hipocloroso con el amoníaco en una serie sucesiva de reacciones. La formación de una u otra especie, así como la velocidad de reacción, son función del pH, la temperatura y la proporción de cloro y amoníaco.

- $\text{NH}_3 + \text{HClO} \rightleftharpoons \text{NH}_2\text{Cl} + \text{H}_2\text{O}$ (monocloramina) [Ec 4.2]
- $\text{NH}_2\text{Cl} + \text{HClO} \rightleftharpoons \text{NHCl}_2 + \text{H}_2\text{O}$ (dicloramina) [Ec 4.3]
- $\text{NHCl}_2 + \text{HClO} \rightleftharpoons \text{NCl}_3 + \text{H}_2\text{O}$ (tricloramina) [Ec 4.4]

El gráfico de la figura 4.7, muestra la relación entre las diferentes especies de cloraminas en función del pH. A pH mayor de 7 y una relación molar de cloro/amoníaco igual a 1 o menor, predominará la formación de monocloramina, su tasa de formación es muy rápida (su rapidez será máxima a pH=8,3). La tasa de formación de la dicloramina es más baja, su máximo se alcanza a pH próximos a 4,5, a pH menor de 4, fundamentalmente, sólo habrá tricloruro de nitrógeno, por tanto, a los pH normales del tratamiento de

agua, comprendidos entre 7 y 8, la principal especie presente en el agua será la monocloramina, mientras que la dicloramina no representará un porcentaje significativo en el total, a menos que la relación molar cloro/amoniaco sea mayor de 1.

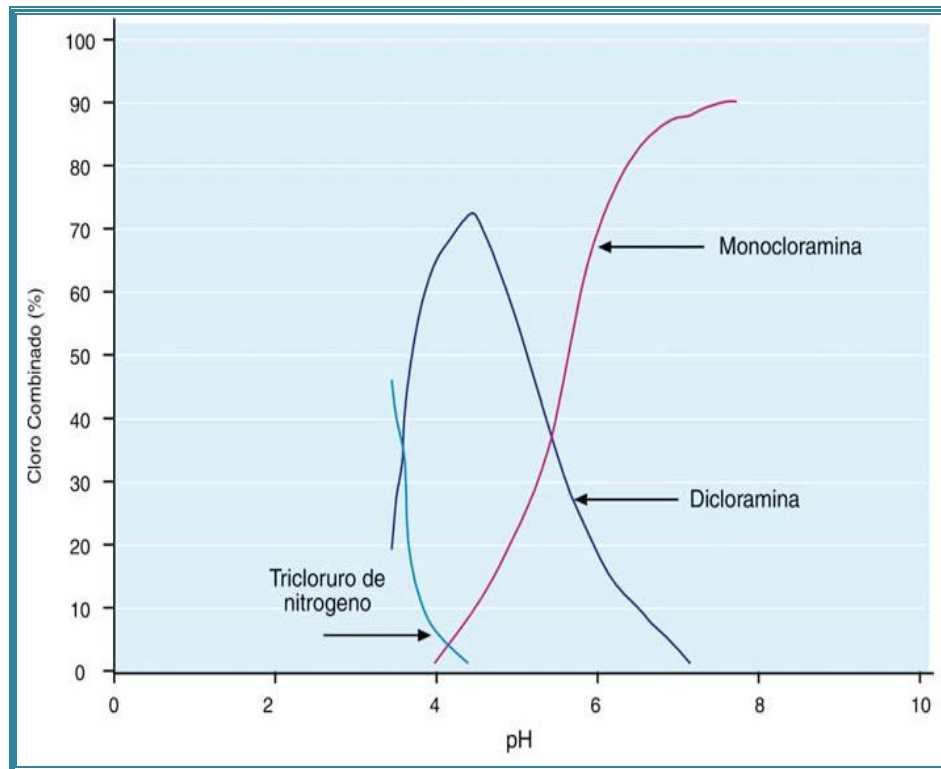


Figura 4.7 Cloramina predominante en función del pH.

Tabla 4.1 Propiedades de las cloraminas.

Formula química	Nombre	Peso molecular (Da)	pH requerido	Efecto biocida
NH_2Cl	monocloramina	52	> 7	Bueno
$NHCl_2$	dicloramina	85	4 - 7	tolerable
NCl_3	tricloramina	119	1 - 3	medio
$RNHCl$	Cloraminas orgánicas	---	Desconocido	Malo

La desinfección por cloraminas es un método relativamente nuevo, que cada vez se está utilizando más en las ETAP municipales, ya que conlleva las siguientes ventajas:



- No forman subproductos de desinfección, como los trihalometanos.
- Se mantienen más tiempo como desinfectante residual que el ácido hipocloroso.
- No modifican el pH del agua.
- La monocloramina, la principal especie a pH 7, no da sabor ni olor al agua.

4.2.2. Mediante radiación ultravioleta.

La radiación UV es una forma de luz más energética que la luz visible y por tanto con una longitud de onda menor que puede ir desde los 400 hasta los 150 nanómetros (nm). En función de la longitud de onda podremos distinguir tres tipos de radiación UV:

- **UVA.**- Con una radiación que va desde los 320 a los 400 nm. Es la más cercana al espectro visible y no es absorbida por el ozono.
- **UVB.**- Va de los 280 a los 320 nm. Este tipo de radiación es muy dañina provocando alteraciones en el ADN.
- **UVC.**- Para una longitud de onda menor de 280 nm. Esta radiación es la más energética y peligrosa de las tres.

Esta última, precisamente por su efecto dañino para los seres vivos puede usarse para la desinfección y eliminación de organismos vivos en un sinnúmero de aplicaciones, y por supuesto en todo tipo de tratamiento de aguas en los que tengamos un contenido biológico. Está demostrado que una lámpara que irradie UVC de 254 nm produce el rendimiento más alto de desinfección.

Cuando la luz ultravioleta incide sobre el ADN de los seres vivos provoca una unión de varios nucleótidos adyacentes, destruyendo la cadena y produciendo la muerte o inactivación de los organismos. El tratamiento mediante radiación ultravioleta es por tanto una alternativa muy eficaz para la desinfección del agua.

Los sistemas de tratamiento y desinfección de Agua mediante luz UV, garantizan la eliminación de entre el 99,9% y el 99,99 de agentes patógenos. Para lograr este grado de efectividad casi absoluta, es totalmente imprescindible que los procesos previos del agua eliminen de forma casi total cualquier turbiedad de la misma, ya que la Luz Ultravioleta debe poder atravesar perfectamente el flujo de agua a tratar.

De todos los métodos de desinfección actual, la luz UV es el más eficiente, económico y seguro. Más aún, su acción germicida se realiza en segundos o en fracciones de éstos. Además no deja ningún residuo químico, como el cloro, por lo que es el método más respetuoso con el medio ambiente.



Fig 4.8 Lámpara germicida de Luz Ultravioleta en acero inoxidable

4.3. DESCALCIFICACIÓN

Con este tratamiento se eliminará la dureza del agua, es decir los iones Ca^{+2} Mg^{+2} en disolución, mediante una resina de intercambio iónico.

4.3.1. Fundamento teórico del intercambio iónico.

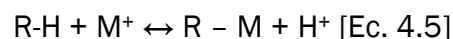


El intercambio iónico es una operación de separación basada en un intercambio reversible de iones entre una fase sólida iónica y una fase líquida externa, sin un cambio sustancial de la estructura del sólido.

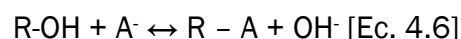
Se producirá la transferencia de uno o más tipos de iones desde la fase fluida hasta la fase sólida, donde quedarán retenidos por adsorción a los grupos funcionales. En sentido contrario el contraíón del grupo funcional pasará a la disolución, de forma que en el proceso se intercambie un número de cargas eléctricas iguales. La eficacia del proceso depende del equilibrio sólido-fluido y de la velocidad de transferencia de materia.

La fase sólida consiste usualmente en una matriz polimérica o una red cristalina, insoluble pero permeable, sobre la cual se ubican los grupos funcionales fijos y los contraiones móviles de carga opuesta que pueden ser intercambiados por los iones de la fase líquida.

Este método es aplicable generalmente a compuestos iónicos. Los grupos funcionales de las resinas intercambian en el caso más sencillo iones H^+ y OH^- , presentes en la solución según sea el tipo de intercambiadores. Las resinas intercambiadoras de iones, se representan por la fórmula general R-H y R-OH en donde R, representa una estructura molecular orgánica, originada por condensación o polimerización, que contiene casi siempre cadenas laterales largas. Si el ion intercambiable en la resina es el H^+ , evidentemente podrá ser sustituido por otros iones de su mismo signo según la siguiente ecuación:



En el segundo caso, se tendría análogamente.



Los enlaces entre el cambiador y el ion tienen lugar en los grupos funcionales iónicos. Los grupos funcionales se encuentran en zonas

concretas del cambiador y esta estructura física en su conjunto garantiza un equilibrio químico y electroquímico con la disolución acuosa. Para ello, las moléculas y los iones que están en el interior del cambiador se mueven libremente gracias al campo eléctrico o a la difusión. Además, para mantener el equilibrio eléctrico, los grupos funcionales iónicos están unidos a los contraiones.

Para la matriz polimérica de la resina se usa el estireno, el cual es lineal, pero para darle una estructura tridimensional se introducen moléculas de divinilbenceno. La cantidad relativa de divinilbenceno junto con el estireno indica el grado de entrecruzamiento de la resina, que normalmente suele ser del 2 al 20 %. En la figura 4.9 puede verse el proceso de formación de la matriz de la resina.

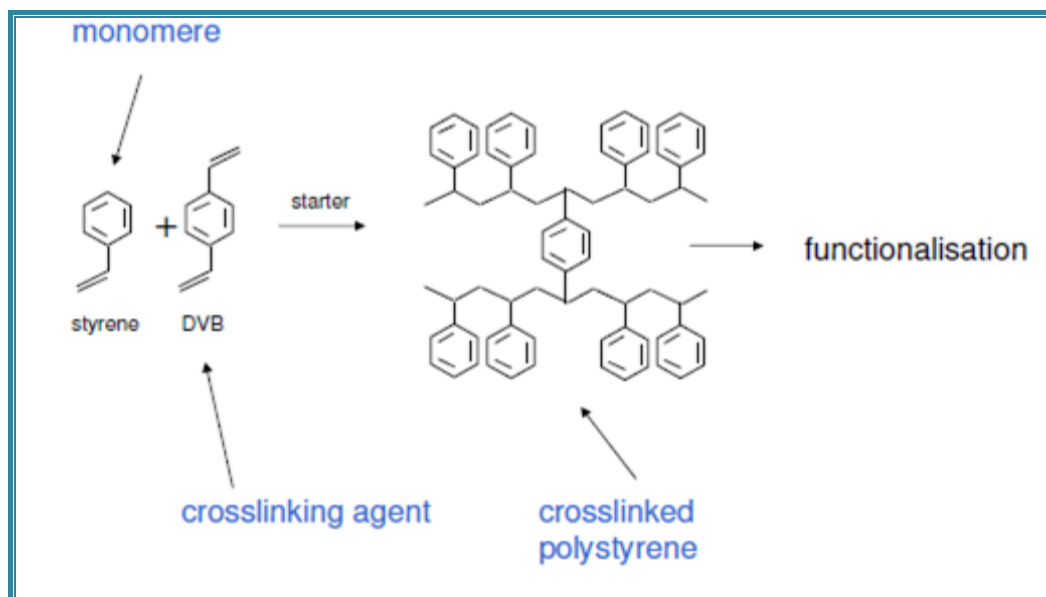


Figura 4.9. Polimerización de la resina.

A esta estructura reticular polimérica se le introducen los grupos funcionales para obtener un cambiador iónico.

Los grupos funcionales, al tener una naturaleza iónica, muestran una gran afinidad por el agua, pero debido al grado de entrecruzamiento de la matriz polimérica, no se disuelven en el agua. En lugar de disolverse, la

estructura tridimensional que forman al unirse al agua se hincha y a través de esa matriz porosa el agua y los iones que hay en ella penetran en su interior.

A medida que la disolución pasa a través de la resina, los iones presentes en la disolución desplazan a los que estaban originariamente en los sitios activos. La eficiencia de este proceso depende de factores como la afinidad de la resina por un ion en particular, el pH de la disolución si el grupo activo tiene carácter ácido o básico, la concentración de iones o la temperatura.

Es obvio que para que tenga lugar el intercambio iónico, los iones deben moverse de la disolución a la resina y viceversa. Este movimiento es un fenómeno de difusión. La difusión de un ion es función de sus dimensiones, carga electrostática, temperatura y también depende de la estructura y tamaño de poro de la matriz. El proceso de difusión tiene lugar entre zonas con un gradiente de concentración mayor que cero, de modo que los iones se mueven desde la zona de más concentración a la de menos.

El intercambio iónico puede explicarse como una reacción reversible implicando cantidades químicamente equivalentes. Un ejemplo común del intercambio catiónico, siendo además el objetivo de una etapa de este trabajo, es la reacción para el ablandamiento del agua:

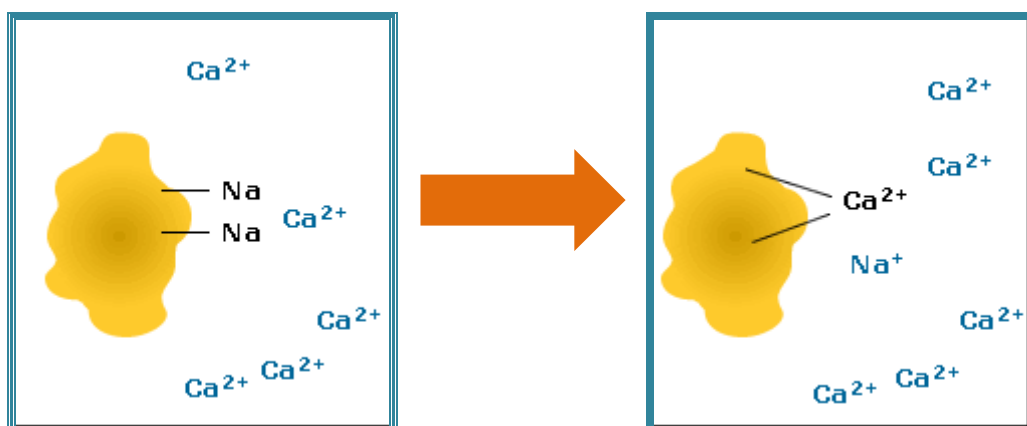


Figura 4.10. Esquema de descalcificación sobre una resina de intercambio iónico.



4.3.2. Tipos de resinas de intercambio iónico

Los contraiones de los grupos funcionales pueden ser cationes o aniones. Si la resina posee cationes sólo podrá intercambiarlos por otros cationes, en cuyo caso se dice que la resina es de **tipo catiónico**, y al contrario si la resina intercambia aniones se dirá que es de **tipo aniónico**. A su vez cada uno de los tipos anteriores puede dividirse en otras dos clases:

- **Resinas catiónicas de ácido fuerte:**
 - Resinas catiónicas de sodio: eliminan la dureza del agua por intercambio de sodio por el calcio y el magnesio.
 - Resinas catiónicas de hidrógeno: pueden eliminar todos los cationes (calcio, magnesio, sodio, potasio, etc) por intercambio con hidrógeno.
- **Resinas catiónicas de ácidos débiles:** eliminan los cationes que están asociados con bicarbonatos
- **Resinas aniónicas de bases fuertes:** eliminan todos los aniones. Su uso se ha generalizado para eliminar aniones débiles en bajas concentraciones, tales como: carbonatos y silicatos.
- **Resinas aniónicas de base débil:** eliminan con gran eficiencia los aniones de los ácidos fuertes, tales como sulfatos, nitratos y cloruros.

4.3.3. Selectividad de las resinas de intercambio iónico

Las resinas de intercambio iónico presentan mayor afinidad por unos iones que por otros. La selectividad de una resina por un ion determinado se mide con el coeficiente de selectividad, K . La selectividad depende de las interacciones electroestáticas que se establezcan entre el ion y el intercambiador y de la formación de enlaces con el grupo ionofílico, grado de reticulación, concentración de grupos funcionales. La regla principal es que un intercambiador preferirá aquellos iones con los que forme unos enlaces más fuertes. Normalmente para una resina dada se cumplen dos reglas:

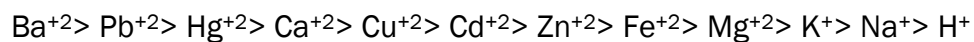


- Cuanta más carga tenga el ión mayor preferencia mostrará la resina.
- Cuanto mayor sea el radio iónico del ión mayor preferencia mostrará la resina.

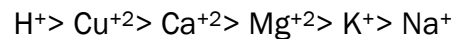
La estructura de poro y la elasticidad del intercambiador también influyen en su selectividad, como ocurre con las zeolitas. Su estructura de poro rígida les permite actuar como tamices moleculares, impidiendo la entrada de ciertos iones simplemente por su tamaño.

A continuación se detalla el orden de selectividad general de las resinas de intercambio iónico:

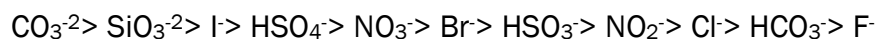
- Resinas catiónicas de ácidos fuertes:



- Resinas catiónicas de ácidos débiles:



- Resinas aniónicas de bases fuertes:



- Resinas aniónicas de bases débiles:



4.3.4. Características de las resinas de intercambio iónico.

4.3.4.1. Capacidad de intercambio iónico.



Se define como la cantidad de iones que una resina puede intercambiar en unas determinadas condiciones. Depende del tipo de grupo activo y del grado de entrecruzamiento de la matriz y se expresa en equivalentes por litro de resina, o por gramo.

La capacidad teórica de intercambio de una resina es la cantidad de grupos funcionales por unidad de peso o de volumen. Dado que las resinas se hinchan y contraen según la forma iónica, la referencia al peso es mucho más constante, pero se suele usar la capacidad volumétrica de la forma completamente hinchada, expresada en meq/litro. La capacidad aparente es un valor práctico que indica cuántos iones de la solución pueden ser captados realmente bajo las condiciones específicas de operación.

4.34.2. Capacidad específica teórica.

Se denomina así al número máximo de sitios activos del intercambiador por gramo. Este valor suele ser mayor que la capacidad de intercambio, ya que no todos los sitios activos son accesibles a los iones en disolución.

4.3.4.3. Grado de entrecruzamiento y porosidad.

Como se ha dicho anteriormente, al aumentar el contenido de divinilbenceno la resina suele ser o más fuerte o de menor flexibilidad. Las resinas de un nivel de entrecruzamiento alto suelen tener grandes dificultades para oxidarse y su estabilidad es muy alta. Cuando el nivel de divinilbenceno es mayor del 10 % la estructura física de la resina es muy fuerte y la activación del polímero (la introducción de los iones en las zonas efectivas) es muy dificultosa. Además, el movimiento de los iones a través de esa matriz es muy lento y la eficacia de la resina para el cambio podría ser muy baja.

Para las resinas sulfónicas, la efectividad más grande se logra con un nivel de entrecruzamiento del 8 %. Cuando se aumenta la movilidad de los



iones a través de la resina, en cambio, la separación entre los iones de igual carga es más escasa. Debido a ello, si se quiere tener resinas más selectivas o una asociación iónica más adecuada hay que aumentar el grado de entrecruzamiento.

4.3.4.4. Estabilidad.

Las resinas poliméricas pueden trabajar en un intervalo amplio de pH. No obstante, en condiciones muy ácidas o básicas se puede observar la descomposición de algunas resinas. En este sentido, los intercambiadores aniónicos son mucho más sensibles a las condiciones básicas.

Además de la estabilidad química hay que tener en cuenta la estabilidad térmica de la resina y la mecánica, sobre todo en aplicaciones industriales. De cualquier manera, las resinas tienen que estar lo más húmedas posible y no han de sufrir cambios de temperatura muy violentos.

Otras características físicas son la densidad de la resina, el tamaño de las partículas y el contenido de humedad pero éstas solo hay que tenerlas en cuenta en separaciones a gran escala.

4.3.4.5. Vida útil de las resinas.

Después de una serie de ciclos de intercambio iónico las resinas sufren la pérdida de sitios de intercambio activo o sufren la rotura de los enlaces transversales de la resina, disminuyendo su capacidad de intercambio. Las resinas catiónicas fuertes primero pierden su capacidad de intercambio para captar cationes asociados a los ácidos fuertes y las resinas aniónicas fuertes disminuyen su capacidad de captar aniones débiles a baja concentración, tales como los carbonatos y silicatos. La mayoría de autores asignan una vida útil media de las resinas de intercambio iónico entre 5 y 10 años dependiendo de la calidad del agua a tratar.

4.3.5. Intercambio iónico en lecho fijo.

La operación de intercambio iónico se realiza habitualmente en semicontínuo, en un lecho fijo de resina a través del cual fluye una disolución portadora de los iones a retirar. El régimen de funcionamiento no es estacionario por variar continuamente la concentración de los iones en cada punto del sistema. Las instalaciones constan generalmente de dos lechos idénticos, de forma que si por uno de ellos circula la disolución que contiene los iones que se desea intercambiar, el otro se está regenerando.

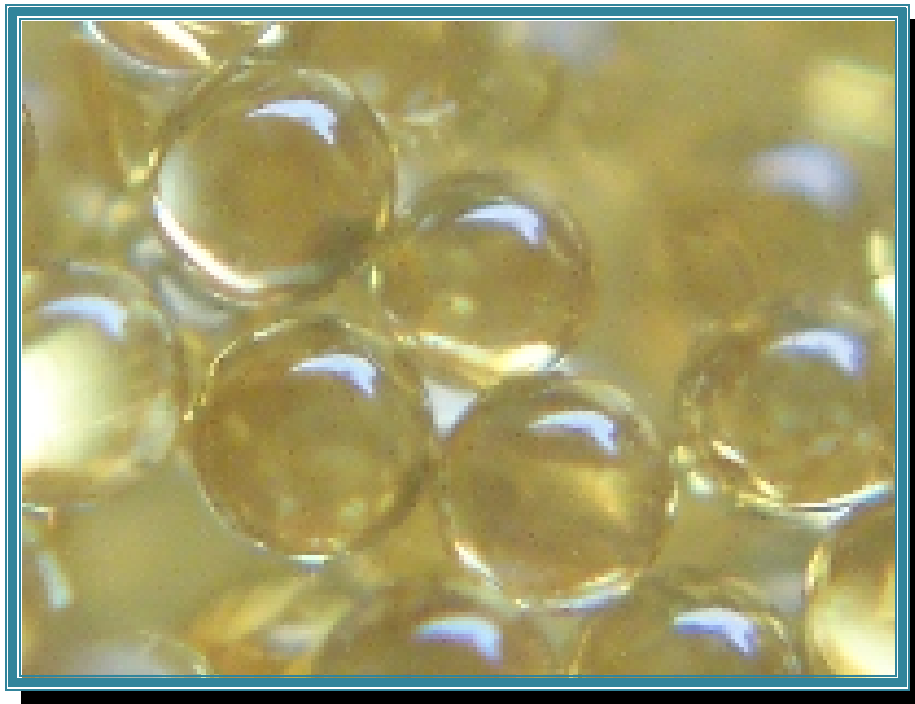


Figura 4.11 Detalle de las esferas de resina de intercambio iónico. El tamaño real de las esferas es superior a 0.2 mm para que no puedan pasar a través de las crepinas del desmineralizador, y generalmente inferior a 1 mm

Durante el período de intercambio iónico, las capas superiores del lecho se van agotando progresivamente. Sin embargo, la reacción de intercambio no es instantánea, ya que los iones deben llegar hasta los puntos activos disponibles dentro de cada perla de resina y allí desplazar al contraión. Por eso, algunos iones pasan hasta capas inferiores de resina

antes de que las capas superiores estén completamente saturadas. Se establece por tanto un gradiente de concentración en la dirección del flujo.

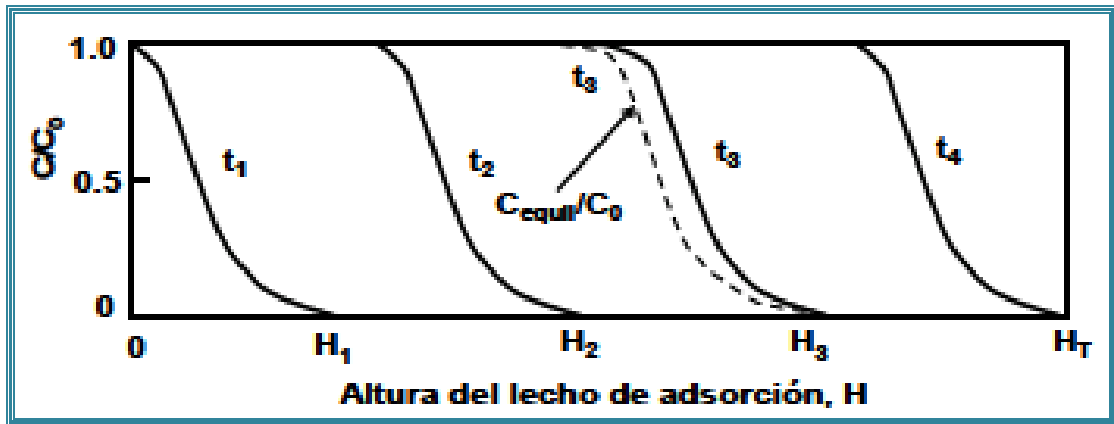


Figura 4.12 Perfiles de concentración de la zona de intercambio a lo largo del lecho.

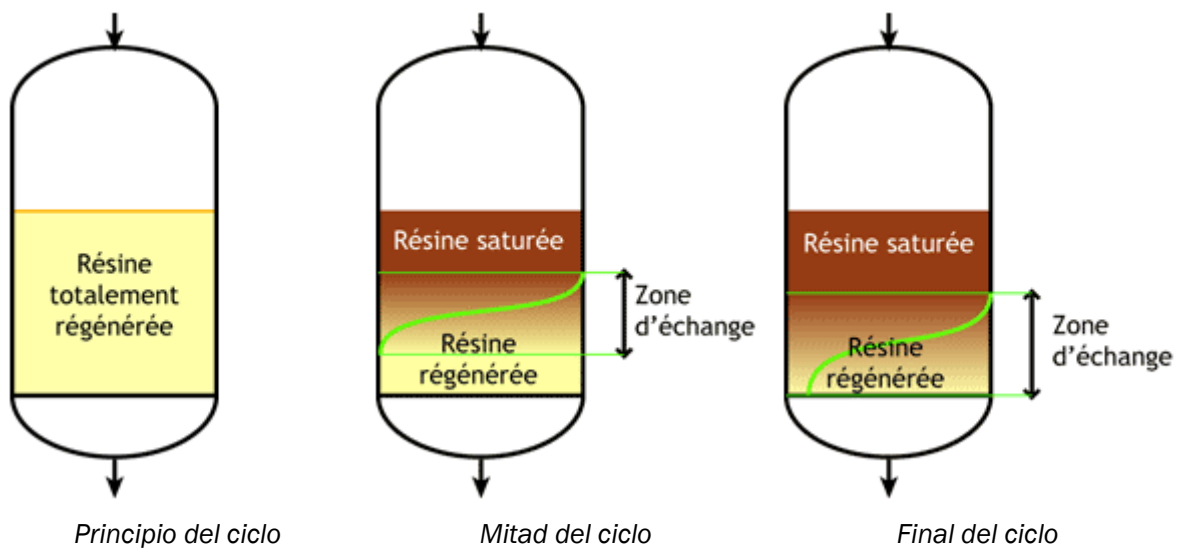


Figura 4.13 Perfiles de concentración en el lecho a lo largo del tiempo.

La zona incluida entre la resina totalmente saturada y la resina completamente agotada se llama **zona de transferencia de masa** o zona de reacción, la cual se va desplazando a medida que progresa el intercambio



iónico hasta el extremo del lecho. Los límites de la zona de intercambio normalmente se toman en $C/C_0 = 0,95$ a $0,05$.

Después de cierto tiempo, cuando las capas superiores están totalmente agotadas y las capas inferiores empiezan a agotarse, los iones no eliminados empiezan a aparecer en el agua tratada. La fase de agotamiento se detiene cuando la concentración de la **fuga iónica** alcanza un valor predeterminado, pero el lecho de resina aún no está totalmente agotado. El valor de la fuga iónica máximo es un dato de diseño y por tanto depende de cada sistema de intercambio.

Este comportamiento es típico de las resinas intercambiadoras débilmente ácidas y débilmente básicas, las cuales, se pueden regenerar completamente con una concentración de regenerante mínima, ligeramente superior a su valor estequiométrico.

Por el contrario, las resinas fuertemente ácidas y fuertemente básicas, se regeneran más difícilmente y necesitan un exceso importante de la concentración de la solución regenerante. Aun así puede no ser económico regenerar totalmente estas resinas, de manera que en la mayoría de los casos la regeneración es incompleta. Es frecuente que al cabo de varias regeneraciones, al comenzar el ciclo de intercambio, la resina no esté completamente regenerada. Esta es una situación típica de las resinas fuertes con regeneración en contracorriente, en cuyo caso tendremos el siguiente esquema de la figura 4.14.

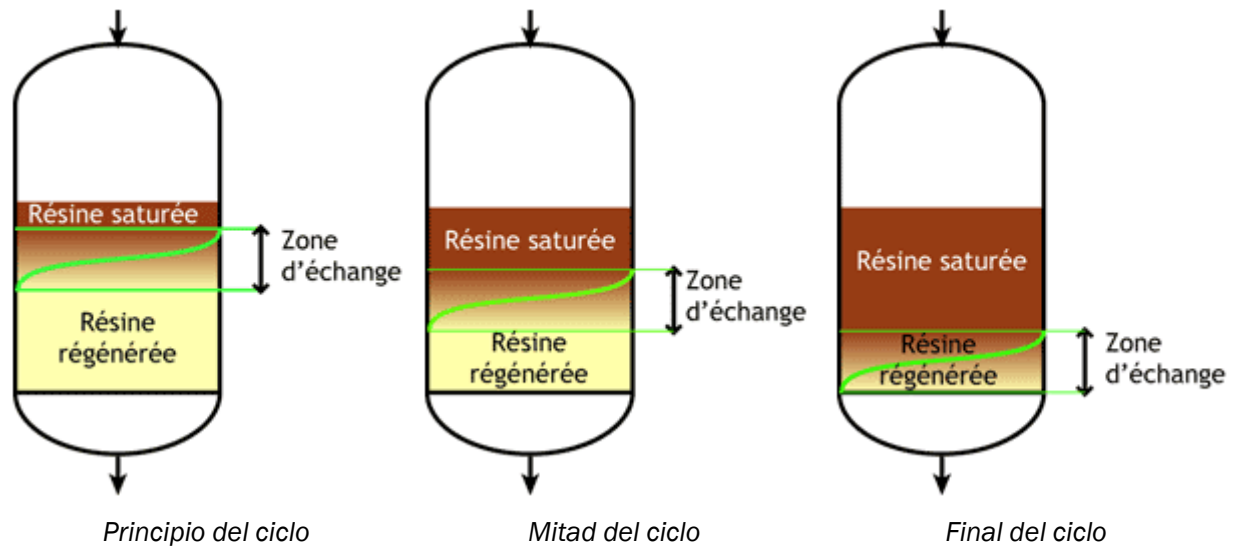


Figura 4.14 Evolución del perfil de concentración partiendo de un lecho parcialmente agotado.

La capacidad útil típica de las resinas fuertes es del 40 a 70 % de su capacidad total.

El tiempo transcurrido desde el comienzo de la operación en el lecho, hasta que se alcanza la máxima concentración permisible en el efluente, se denomina **Tiempo de ruptura (t_b)**. Momento en que la corriente se desviaría a un segundo lecho, (si se opera en continuo), iniciando el proceso de regeneración del primero. La curva que representa la evolución de la concentración del efluente que abandona el lecho recibe el nombre de **Curva de ruptura**.

El conocimiento de la curva de ruptura, es fundamental para el diseño de un lecho fijo de intercambio iónico, y en general debe determinarse experimentalmente, dada la dificultad que entraña su predicción.

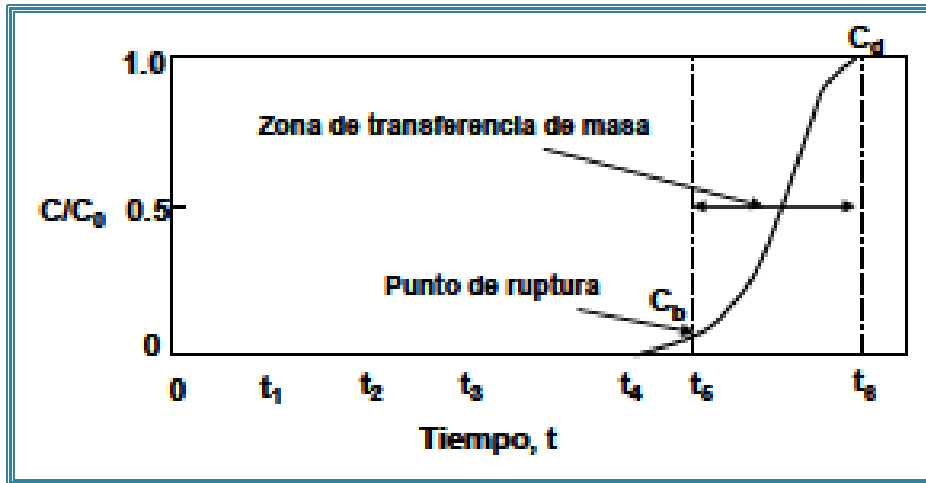


Figura 4.15 Curva de ruptura típica.

4.3.5.1. Determinación de la capacidad de la resina.

Se define como Capacidad de la resina a la cantidad de iones que pueden ser retenidos por la unidad de peso de resina. Suele expresarse como miliequivalentes de soluto retenidos por gramo de resina seca. La capacidad de la resina es un parámetro fundamental para la selección del intercambiador ya que generalmente se requieren capacidades altas para la separación o purificación a realizar.

Para el cálculo de la capacidad de la resina en un lecho fijo en unas condiciones determinadas, es necesario conocer cuál es la cantidad total de soluto retenido por la misma. Este valor se puede determinar a partir de la curva de ruptura del sistema (ver figura 4.15) en función del tiempo. Para ello se calcula el área de la zona comprendida entre la curva de ruptura y la línea recta horizontal correspondiente a la concentración de la disolución de entrada (zona rayada a 45° de la figura 4.16). Se multiplica esta área por el caudal del efluente y por su concentración inicial, siendo ambos valores constantes. Dividiendo el resultado anterior entre el peso total de resina contenida en la columna, se determinará la capacidad de la resina utilizada para las condiciones de la prueba.

$$q_0 = \frac{AQC_0}{V\rho} \text{ [Ec. 4.8]}$$

Donde:

q_0 es la capacidad específica de adsorción de la resina en equivalentes por unidad de masa de la resina.

A es el área por encima de la curva de ruptura medida en unidades de tiempo.

Q es el caudal de la corriente que atraviesa el lecho.

C_0 es la concentración a la entrada del caudal de flujo.

V es el volumen del lecho de resina.

ρ es la densidad del lecho de resina.

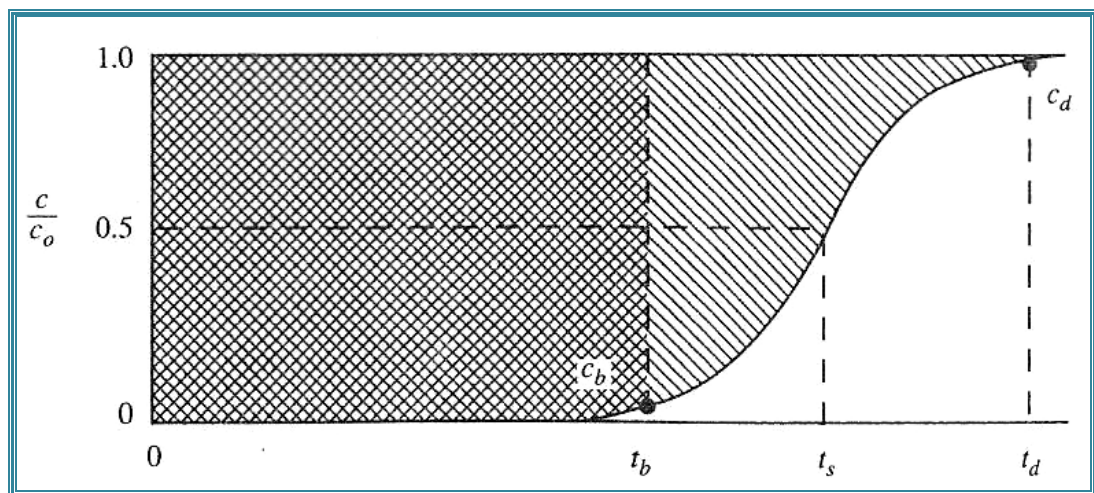


Figura 4.16.- Curva de ruptura en función del tiempo.

4.3.5.2. Fracción de lecho utilizado.

La cantidad de soluto retenida en un tiempo dado, se calcula determinando el área de la zona comprendida entre la curva de ruptura, la línea vertical definida por el tiempo de cálculo y, la línea recta horizontal que corresponde a la concentración de la disolución de entrada (en la figura 4.16 se puede ver la cantidad de soluto retenido en el punto de ruptura, que se corresponde con el área de doble rayado). Al valor obtenido se le multiplica por el caudal y concentración inicial de la corriente que atraviesa el lecho.



$$q_T = A_T Q C_0 \text{ [Ec. 4.9]}$$

Donde:

q_T es la cantidad de soluto retenido en un tiempo de operación T.

A_T es el área por encima de la curva de ruptura medida en unidades de tiempo.

Q es el caudal de la corriente que atraviesa el lecho.

C_0 es la concentración a la entrada del caudal de flujo.

La fracción de lecho utilizado en un tiempo dado o incluso en el punto de ruptura, se puede determinar a partir de la cantidad de soluto retenido en ese momento y la capacidad de la resina.

$$F = \frac{q_T}{q_0 V \rho} \text{ [Ec. 4.10]}$$

Donde:

F es la fracción de lecho utilizado.

q_T es la cantidad de soluto retenido en un tiempo de operación T.

q_0 es la capacidad específica de la resina.

V es el volumen del lecho de resina.

ρ es la densidad del lecho de resina.

4.3.5.3. Longitud de lecho no utilizado

Una vez iniciada la operación de intercambio, el perfil de concentración en la zona de transferencia de materia adquiere pronto su forma característica y una anchura que no varía al desplazarse a través del lecho si el caudal permanece constante y, en general si las demás variables permanecen constantes. Por tanto, si se utilizan diferentes longitudes de lecho, manteniendo constante el resto de las condiciones, se obtendrán curvas de ruptura de la misma forma. En lechos de gran longitud la zona de transferencia representa una fracción menor de forma que se utiliza una mayor fracción y longitud de lecho. La longitud de lecho no utilizado en un



punto determinado se puede calcular a partir de la fracción del lecho utilizado y la longitud del lecho.

$$L_0 = (1 - F)L \text{ [Ec. 4.11]}$$

Donde:

L_0 es la altura de lecho no utilizado.

F es la fracción de lecho utilizado.

L es la altura del lecho de intercambio.

4.4. DECLORACIÓN EN LECHO DE CARBÓN ACTIVO GRANULAR.

4.4.1. El carbón activo.

El carbón activo es carbón que se produce artificialmente de manera que exhiba un elevado grado de porosidad y una alta superficie interna. Estas características, junto con la naturaleza química de los átomos de carbono que lo conforman, le dan la propiedad de atraer y atrapar de manera preferencial ciertas moléculas del fluido que rodea al carbón.

La unión entre el carbón y el adsorbato se lleva a cabo por medio de fuerzas de Van der Waals. Éstas son relativamente débiles, por lo tanto, la adsorción es reversible. El carbón activado, es un compuesto covalente y, por lo tanto, muestra preferencia por moléculas covalentes; es decir, por moléculas que tienden a ser no iónicas y poco polares. Tal es el caso de la mayoría de los compuestos orgánicos. Por lo tanto, el carbón activado se considera un adsorbente casi universal de moléculas orgánicas.

Debido a lo anterior una de las principales aplicaciones del carbón activado es la purificación de líquidos y gases contaminados con alguna molécula orgánica.

4.4.1.1. Fabricación del carbón activo.



Prácticamente cualquier material orgánico con proporciones relativamente altas de carbono es susceptible de ser transformado en carbón activo. Industrialmente se parte de madera y residuos forestales, turba, lignito y otros carbones minerales, así como de diferentes polímeros y fibras naturales o sintéticas. Los factores que hay que tener en cuenta para elegir un precursor adecuado son: buena disponibilidad y bajo coste, bajo contenido en materia mineral y que el carbón resultante posea unas buenas propiedades mecánicas y capacidad de adsorción. Los residuos de madera, las cáscaras de coco y frutos secos, así como las semillas de algunas frutas junto con los carbones minerales y el coque de petróleo, son los precursores más usados.

4.4.1.2. Activación del carbón.

Este proceso dará lugar a la estructura porosa en el material de origen, favoreciendo la aparición de grandes superficies de contacto internas. Existen dos tipos:

- **Activación térmica.** Llamada también activación física, a pesar de que la activación se produce por la reacción (química) del agente activante (un oxidante como el aire, vapor de agua, CO₂, etc.) con el carbono del material que está siendo activado.

Este tipo de activación consta de varias etapas. Así, a veces son necesarios ciertos pretratamientos como la molienda y el tamizado para obtener un tamaño adecuado del precursor. En otras ocasiones el material de partida es molido hasta formar un fino polvo, después compactado con algún aglomerante en forma de briquetas y luego vuelto a moler hasta obtener el tamaño deseado. Otra etapa previa a la activación propiamente dicha es la carbonización, en la cual el precursor es sometido a elevadas temperaturas, del orden de los 800 °C en ausencia de aire, para eliminar las sustancias volátiles y dejar un residuo carbonoso que será el que se someta a la



activación. Durante este proceso, la salida de los gases y vapores del precursor produce una primera porosidad en el carbonizado, la cual se desarrolla aún más durante la etapa de activación.

La activación consiste en hacer reaccionar un agente activante con el carbonizado de la etapa anterior, de forma que se produzca un “quemado selectivo” que va horadando progresivamente al carbonizado, aumentando la porosidad hasta transformarlo en un carbón activo. El agente activante que más se suelen usar es el vapor de agua, y en menor medida el aire y CO₂.

- **Activación química.** En este tipo de activación el precursor se hace reaccionar con un agente químico activante. La activación suele tener lugar en una única etapa a temperaturas que pueden variar entre 450 y 900 °C. Posteriormente, en este tipo de activación, es necesaria una etapa final de lavado para eliminar los restos del agente químico utilizado. Existen numerosos compuestos que podrían ser usados como agentes activantes, sin embargo los más usados industrialmente son el cloruro de zinc (ZnCl₂), el ácido fosfórico (H₃PO₄) y el hidróxido de potasio (KOH). La activación química con ZnCl₂ fue el método más usado hasta 1970, especialmente para la activación de residuos de madera. Su uso, sin embargo, se ha restringido mucho en la actualidad debido a los problemas medioambientales que conlleva su uso.

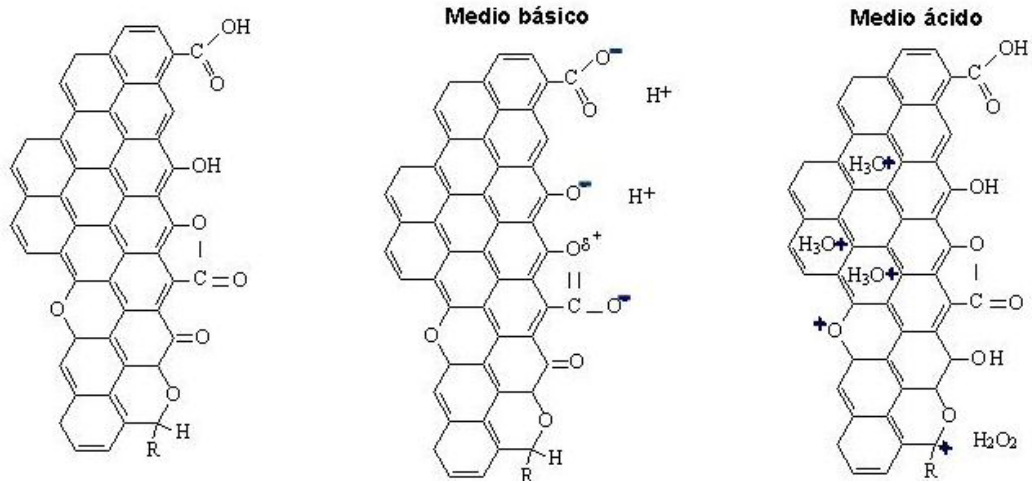


Figura 4.17 Estructura de un carbón activo y sus grupos funcionales en medio básico y ácido.

4.4.1.3. Superficie del carbón activo.

Una de las características principales de los carbones activados es su gran superficie de contacto en relación al volumen o a la masa del mismo, favoreciendo fenómenos físicos-químicos, tales como la adsorción. El carbón activo puede tener un área superficial mayor de 500 m²/gr, siendo fácilmente alcanzables valores de 1500 m²/gr.

Los elevados valores de superficie específica se deben en gran medida a la porosidad que presenta, siendo los microporos los que contribuyen en mayor proporción.

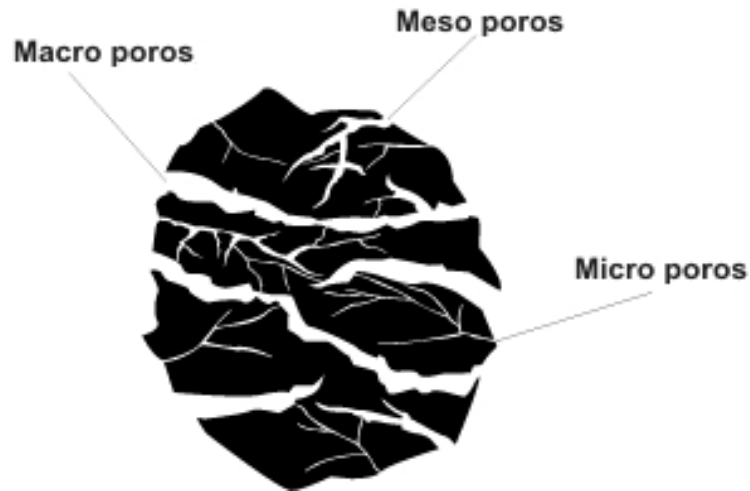


Figura 4.18 Esquema de la estructura porosa de un carbón activo.

Pero la capacidad de un carbón activo para retener una sustancia determinada no sólo, está dada por su superficie específica, sino por la proporción de poros cuyo tamaño sea el adecuado, esto es, de una a cinco veces el diámetro de la molécula de dicha sustancia. Si se cumple esta condición, la capacidad de un carbón activo puede ser de entre el 20% y el 60% de su propio peso, es decir, 1 Kg de carbón retendrá entre 200 y 600 gr de contaminante.

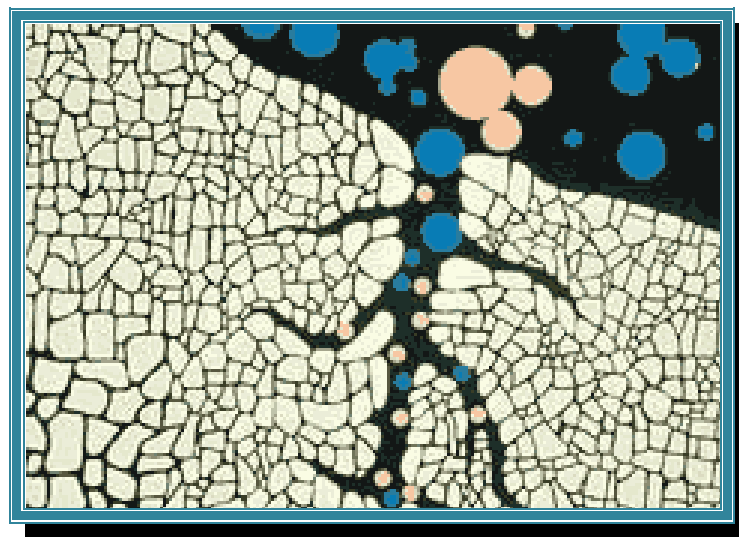


Figura 4.19 Esquema de la exclusión de sustancias por el tamaño de poro en un carbón activo.



4.4.1.4. Regeneración del carbón activo.

La viabilidad económica de la aplicación del carbón activo depende de la existencia de un medio eficaz para su regeneración y recuperación, una vez agotada su capacidad de adsorción. El carbón activado granular se regenera fácilmente por oxidación de la materia orgánica y su posterior eliminación de la superficie del carbón en un horno. En este proceso se destruye parte del carbón, entre un 5 y un 10 %, y es necesario reemplazarlo por carbón nuevo. Es conveniente aclarar que la capacidad de adsorción del carbón regenerado es ligeramente inferior a la del carbón nuevo. En el caso de la regeneración del carbón activo en polvo, es un proceso que aún no es muy eficiente, por lo que si se logra resolver este problema, es previsible que su aplicación aumente de forma considerable.

4.4.1.5. Tipos de carbones activos.

Los carbones activos pueden clasificarse atendiendo al tamaño de las partículas:

- Carbón activo en polvo (CAP), tamaño menor de 100 μm , típicamente entre 15 y 25 μm
- Carbón activo granular (CAG), tamaño medio de partícula entre 1 y 5 mm.

Para la mayoría de los sistemas de tratamiento de aguas se utiliza el tipo CAG, formando parte de un lecho fijo atravesado por la corriente del agua que se quiere purificar. El flujo suele ser descendente. El CAG típico es de tamaño de 8×30, 12×30 o de 12×40 de malla.

La gama de tamaños para el carbón activo granular se expresa normalmente en base a los tamaños de los tamices, en los cuales se retiene la mayor parte del CAG. Se mide mediante el cribado de una muestra de CAG



a través de una serie decreciente de tamices. En unidades métricas, es el espacio (luz) entre los alambres del tamiz expresado en mm.

Por ejemplo: un CAG 8×30 significa que al menos el 93 % de los gránulos en peso son más grandes que la malla 30 (0,60 mm) y al menos el 90 % de los gránulos en peso son más pequeños que la malla 8 (2,36 mm).

Tabla 4.2 Tamices normalizados Tyler.

N.º de tamiz (ASTM E11-87)	Tamaño de tamiz mm
4	4.75
6	3.35
7	2.80
8	2.36
10	2.00
12	1.70
14	1.40
16	1.18
18	1.00
20	0.85
25	0.71
30	0.60
35	0.50
40	0.42
45	0.35
50	0.30
60	0.25
70	0.21
80	0.18
100	0.15
120	0.12

170	0.090
200	0.075
325	0.045

4.4.1.5.1. Características del CAG

- Tamaño efectivo del CAG.

El tamaño efectivo del CAG se calcula como el tamaño, expresado en mm, para el cual el 10 % en peso de los gránulos son más pequeños. Es un indicador de la caída de presión y del rendimiento de la filtración en los lechos de CAG. Un tamaño efectivo pequeño provocará una caída de presión más alta y filtrará partículas más pequeñas lo que puede generar una frecuencia de los lavados mayor en comparación con otro lecho CAG de un tamaño efectivo más alto

- Diámetro medio de partícula del CAG.

El diámetro medio de partícula del CAG se calcula como el tamaño, expresado en mm, para el cual el 50 % en peso de los gránulos son más pequeños.

- Tamaño más pequeño.

Es la cantidad de carbón activo, expresada en % en peso, que es menor que el tamiz más fino. Este parámetro de calidad se utiliza a menudo para determinar las pérdidas potenciales durante la reactivación.

- Coeficiente de uniformidad.

El coeficiente de uniformidad del CAG se calcula como la relación entre el tamaño, expresada en mm, para el 60 % en peso de aquellos gránulos más pequeños, dividido por el tamaño efectivo. Cuanto menor sea el coeficiente



de uniformidad, más uniformes son las partículas del producto. Un coeficiente de uniformidad de 1 indica que todos los gránulos tienen el mismo tamaño. Los carbones activos granulares con un coeficiente de uniformidad bajo se usan a menudo cuando se instalan en el filtrado de primer paso para la producción de agua potable.

- o Tiempos de ruptura y de agotamiento.

Durante la adsorción en las columnas de CAG, existen dos momentos muy importantes:

Tiempo de ruptura. También llamado tiempo de servicio del lecho. Corresponde al momento en el que, en el efluente de una columna de CAG el adsorbato alcanza una concentración preestablecida.

Tiempo del agotamiento. Corresponde al instante en el cual ocurre la saturación completa de la capacidad de adsorción del lecho.

Si se conoce la cantidad de CAG y su capacidad de adsorción, el tiempo de ruptura puede ser determinado por medio de la siguiente ecuación:

$$t_b = \frac{Y_b M}{Q \left(C_0 - \frac{C_b}{2} \right)} \quad [\text{Ec. 4.12}]$$

Donde:

t_b es el tiempo hasta la ruptura.

Y_b es la capacidad de adsorción real, (mg adsorbato/mg CAG).

M es la masa de CAG contenido en la columna.

Q es el caudal.

C_0 es la concentración de adsorbato a la entrada de la columna.

C_b es la concentración de adsorbato al producirse la ruptura.

Al reemplazar C_b por el valor de C_0 se obtiene el tiempo de agotamiento. En las aplicaciones prácticas, la capacidad de adsorción de un CAG a escala



real, Y_b , es un porcentaje de la capacidad teórica de adsorción, Y_o , obtenida a partir de la isoterma de adsorción. Se puede asumir como valor de la capacidad de adsorción real un valor aproximado entre el 25% y el 50% de Y_o .

4.4.2. Lecho fijo de CAG.

La velocidad de adsorción aumenta sustancialmente al disminuir el tamaño de partícula del carbón activado. Esto permite para un fin determinado usar lechos de menor altura con un tamaño de partícula más pequeña. Sin embargo, cuanto más pequeño sea el tamaño de la partícula, mayor será la pérdida de carga experimentada por el flujo de agua a través del lecho.

El lecho de carbón activo también actúa inevitablemente como un lecho filtrante reteniendo partículas sólidas. Por ello resulta necesario efectuar lavados en contracorriente periódicos de los lechos para eliminar las partículas retenidas. Los lavados deben tener una cierta frecuencia, ya que trabajar mucho tiempo sin lavarlo puede llevar a una compactación del lecho y formación de caminos preferentes que afectan seriamente a la eficacia del proceso.

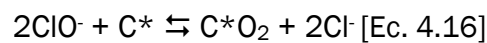
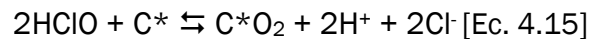
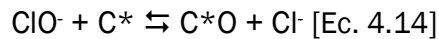
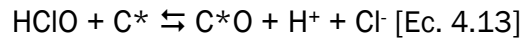
Otra cuestión importante es la sanitización de los filtros de carbón activado. Dado que el carbón activo elimina el cloro, pueden aparecer colonias de microorganismos, favorecidas por la gran superficie del material. Por ello, periódicamente es necesario desinfectar el lecho mediante calor o incluso cambiarlo directamente.

4.4.3. Mecanismo de la decoloración.

La decoloración es un proceso complicado que puede seguir distintos caminos de reacción en los que el carbón activo puede intervenir como reactivo o como catalizador.



Cuando el cloro libre se pone en contacto con el carbón activo, tanto el ácido hipocloroso como el ión hipoclorito se reducen a ión cloruro (Cl^-). Dicha reducción es consecuencia de que el carbón activado granular actúa como un agente reductor, de acuerdo con las siguientes reacciones:

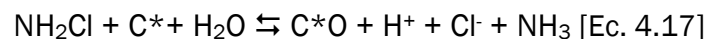


Donde el C^* representa al carbón activo, el C^*O y C^*O_2 son óxidos superficiales, que poco a poco van ocupando espacios, y van disminuyendo la superficie útil del carbón. Algunos de estos óxidos se liberan hacia la solución como CO y CO_2 . Esto vuelve a dejar espacios disponibles en la superficie del carbón haciendo que se recupere su capacidad para establecer las anteriores reacciones.

Puede observarse que el carbón activo reacciona y por lo tanto desaparece. Si no hubiera acumulación de óxidos superficiales, la reacción continuaría hasta la desaparición completa del carbón.

Existen también una gran variedad de reacciones secundarias, algunas de las cuáles se llevan a cabo entre el cloro libre y los óxidos superficiales que estaban presentes en el carbón.

El carbón activo, como ya se ha mencionado, también elimina las cloraminas. La reacción entre la monocloramina y el CA se da según:



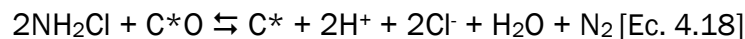
Esta reacción no es instantánea, en un CAG nuevo puede ser necesario un tiempo de contacto de entre 5 a 10 minutos y en un lecho viejo puede ser



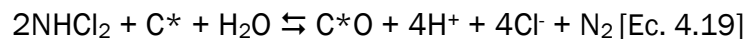
de 30 minutos. Esto contrasta con las reacciones vistas anteriormente para el cloro libre, las cuales son prácticamente instantáneas.

Debe observarse que la reacción (6) produce una molécula de amoníaco residual. El amoníaco como gas no puede ser rechazado por las membranas de OI, sólo si se transforma a ión amonio, siendo para ello necesario mantener el pH por debajo de 7,8.

En la reacción 4.17 la monocloramina se ha reducido a amoníaco y se ha formado un óxido superficial. Sin embargo, si previamente estuviera ya presente un óxido superficial, la reacción que tendría lugar sería:



En este caso, la monocloramina se oxida a nitrógeno y el carbón se regenera al destruirse el óxido superficial. En el caso de la dicloroamina Bauer y Snoeyink [34] proponen la siguiente reacción:



El nitrógeno de la dicloroamina pasa a nitrógeno gas. También puede verse como dos moléculas de dicloroamina reaccionan para producir un óxido superficial, mientras que cada molécula de cloro libre es capaz de producir dos, de modo que la capacidad del CA para decolorar a partir de dicloroaminas es cuatro veces mayor que con cloro libre.

4.4.4. Isotermas de adsorción.

Es la relación entre la cantidad de sustancia adsorbida sobre un adsorbente y su concentración residual en la solución cuando se ha alcanzado el equilibrio a temperatura constante. Los modelos matemáticos más frecuentemente empleados para el tratamiento de los datos experimentales de las isotermas de adsorción fueron desarrollados por



Freundlich y por Langmuir. Posteriormente se propuso la isoterma BET por Brunauer, Emmet y Teller.

El modelo matemático que ha sido más empleado y del que hay más datos en la bibliografía es el de Freundlich. Se utiliza con excelentes resultados para soluciones diluidas. Se puede aplicar a la adsorción de impurezas de una solución acuosa sobre carbón activado. Una forma de la ecuación es:

$$Y = \frac{X}{M} = KC_e^n \text{ [Ec. 4.20]}$$

Donde:

Y es cantidad de adsorbato por peso unitario de adsorbente.

X es masa de sustancia adsorbida.

M es masa de sustancia adsorbente.

C_e es concentración de equilibrio del adsorbato en solución.

K y n Son constantes obtenidas experimentalmente para una temperatura fija.

Las constantes de la isoterma de Freundlich se determinan representando gráficamente la relación entre Y y C_e , empleando la ecuación 4.21 reescrita en la forma:

$$\log Y = \log K + n \log C_e \text{ [Ec. 4.21]}$$

Si se hace una gráfica de $\log Y$ en función de $\log C_e$, se obtiene una línea recta, en la cual $\log K$ viene determinado por la intersección con el eje de ordenadas, y n es la pendiente de la recta.

4.5. ÓSMOSIS INVERSA

4.5.1. Ósmosis y presión osmótica



La ósmosis se define como el transporte espontáneo de un disolvente desde una disolución diluida a una disolución concentrada a través de una membrana semipermeable, que impide el paso del soluto pero deja pasar el disolvente, para intentar igualar las concentraciones a ambos lados de la membrana.

Este fenómeno termodinámicamente favorable se seguirá produciendo hasta que se igualen las concentraciones, (momento en el cual el número de moléculas que atraviesan la membrana en uno y otro sentido es el mismo) o, la columna de líquido en la disolución más concentrada ejerza una presión tal, que detenga el flujo neto de disolvente a través de la membrana. La presión generada por la diferencia de altura de las columnas de líquido en las dos disoluciones es la presión osmótica.

La ósmosis inversa tiene lugar cuando el movimiento del agua a través de la membrana es contrario al gradiente de concentraciones y tiene lugar, de manera no espontánea por aplicación de una presión, desde la disolución de mayor concentración a la de menor, capaz de vencer la presión osmótica.

4.5.2. Principio de la ósmosis inversa.

En el mismo sistema mencionado, en el caso de que se ejerciera una presión exterior mayor que la presión osmótica, en la solución más concentrada, el disolvente empezaría a circular en sentido inverso, de modo que pasaría de la disolución más concentrada a la más diluida. Este último fenómeno es a lo que se llama ósmosis inversa.

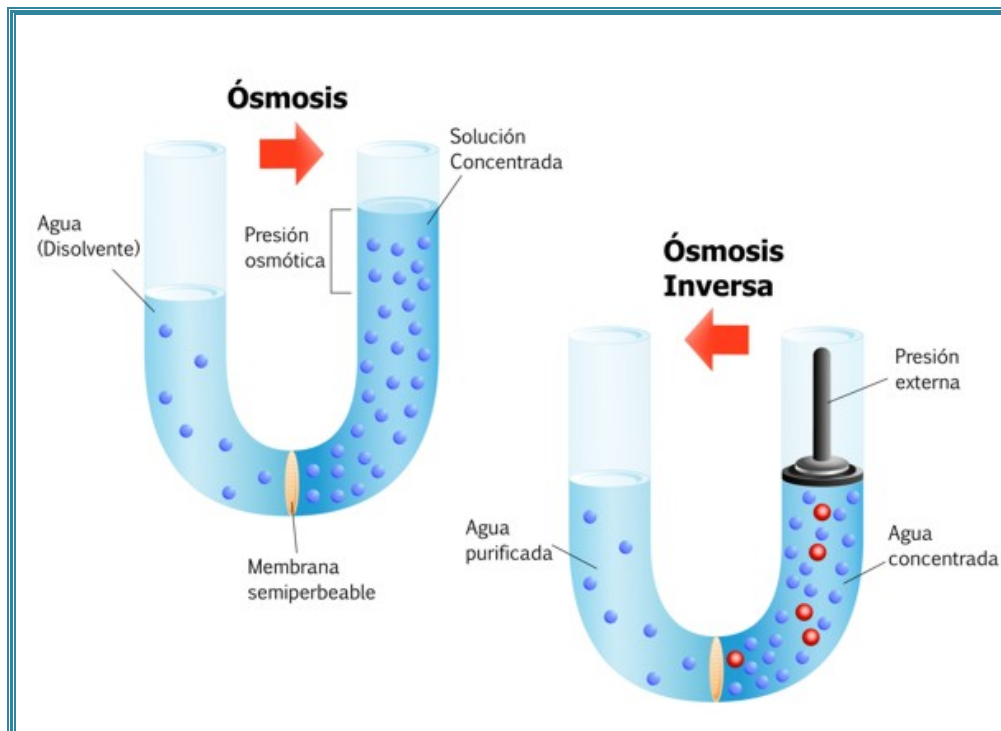


Figura 4.20 Principio de funcionamiento de la ósmosis inversa.

4.5.3. Transferencia de materia en la ósmosis inversa

La transferencia de materia en una operación de ósmosis inversa está controlado por la difusión, y se ha modelado por la sucesión de tres etapas en serie: absorción del agua en la superficie de membrana, difusión del agua a través del espesor de la membrana y desabsorción del permeado a través de la superficie de membrana. Este modelo, denominado modelo solución-difusión, describe cómo una vez absorbida una molécula de agua en la superficie de la membrana, ésta se difunde hacia el lado del permeado en la dirección que marca el gradiente de concentración de agua, tras lo cual la molécula se desabsorbe pasando a formar parte del grueso de permeado.

El movimiento del líquido se fuerza a través de la membrana por aplicación de una presión hidrostática positiva superior a la presión osmótica diferencial entre el agua de aporte y el permeado. La presión diferencial



positiva origina un potencial químico responsable del movimiento del agua en sentido contrario al del proceso espontáneo de ósmosis, mientras que las sales quedan retenidas y concentradas en el lado de la membrana al que se alimenta el influente. No obstante, el paso de sales a través de la membrana tiene lugar en cierta extensión, siendo éste tanto mayor cuanto mayor es la temperatura y la concentración salina del agua de partida

4.5.4. Características y parámetros de funcionamiento de la OI.

A continuación, se pasa a definir y establecer las variables y conceptos a tener en consideración en un proceso de ósmosis inversa:

4.5.4.1. Agua de aporte

El agua de aporte es el agua que alimenta a la unidad de ósmosis inversa por su lado de alta presión impulsada mediante una bomba. Está claro que las características del agua de aporte influirán de forma decisiva en el proceso de ósmosis inversa. Las más importantes son la temperatura, el pH y la presión osmótica.

4.5.4.2. Permeado

El permeado es el agua obtenida al atravesar la membrana de ósmosis inversa, con una concentración muy baja en sales. Su control en continuo se lleva a cabo normalmente a través de su conductividad, siendo normal su reducción respecto de la del agua de aporte en un factor de 50.

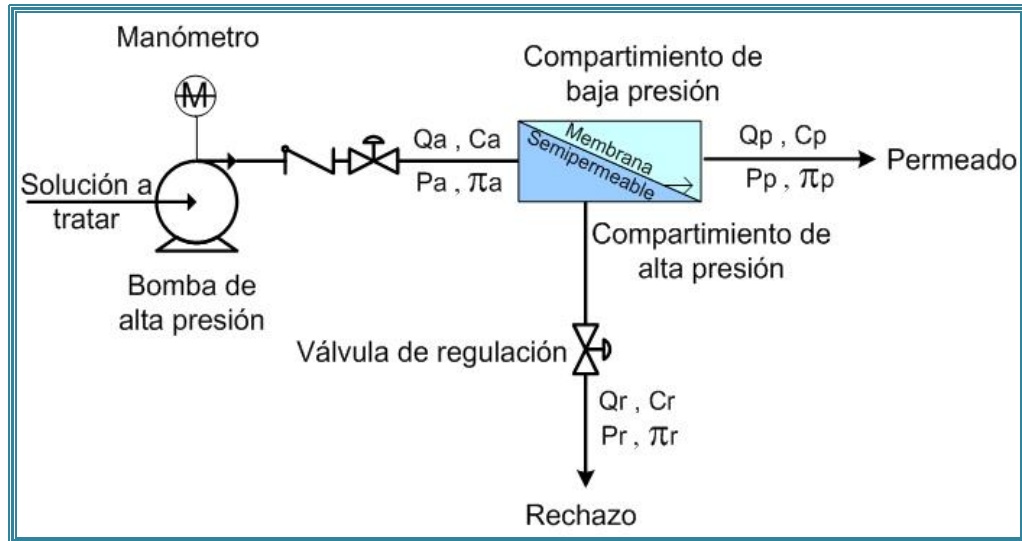


Figura 4.21 Esquema de un equipo de OI, con sus principales variables.

4.5.4.3. Rechazo

El rechazo es el agua que no atraviesa la membrana junto con las sales retenidas al paso del agua a través de la misma. Su conductividad, dependiendo de la conversión de la OI, será de aproximadamente el doble que la del agua de aporte, aunque normalmente es un parámetro que no se controla.

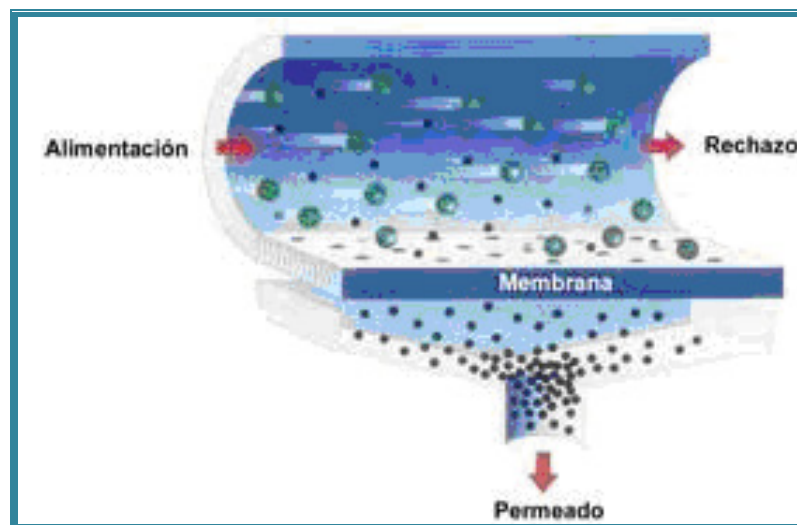


Figura 4.22 Esquema del funcionamiento de una membrana de OI.



4.5.4.4. Paso de sales

El paso de sales es la variable que expresa el cociente entre la concentración iónica del permeado respecto de aquel correspondiente al agua de aporte, ya sea expresado en tanto por uno, o bien en porcentaje.

4.5.4.5. Rechazo de sales

Es la variable complementaria del paso de sales, que puede obtenerse como diferencia de la unidad o el 100% menos el paso de sales, y que es indicativa del rendimiento global de las membranas, por lo que es un dato generalmente proporcionado por los fabricantes. Las membranas de ósmosis inversa alcanzan valores de rechazo de cloruro sódico de hasta 98,0-99,8%.

Se define el rechazo de sales como:

$$R_s = 100 \times (C_a - C_p)/C_a \text{ [Ec. 4.22]}$$

Donde:

C_a es la concentración de una determinada sal en la corriente de alimentación.

C_p es la concentración de una determinada sal en la corriente de permeado.

Este parámetro describe por tanto el porcentaje de una determinada sal, presente en el agua de aporte, que las membranas rechazan. El rechazo de una determinada sustancia depende de los siguientes factores:

- Carga iónica: Normalmente el rechazo para las distintas sales crece con la carga de los iones, por ejemplo $Al^{+3} > Ca^{+2} > Na^{+}$. Los compuestos poco ionizados a un determinado pH, como los ácidos y bases débiles, no son apenas rechazados.
- El grado de disociación: Cuanto mayor es el grado de disociación de una especie mayor rechazo se consigue. Por ejemplo, un ácido débil es rechazado en mayor proporción a un pH alto.



- El peso molecular: Cuanto mayor sea éste mejor rechazo se consigue. Por ejemplo el grado de rechazo del ión calcio es mayor que para el ión magnesio.
- La polaridad: En general cuanto mayor es la polaridad de una molécula menor rechazo se consigue. Por ejemplo, las moléculas orgánicas se rechazan mejor que el agua.
- Grado de hidratación: En general cuanto mayor es el grado de hidratación mayor rechazo se consigue. Por ejemplo, el ión cloruro se rechaza mejor que el ión nitrato.
- Grado de ramificación en la molécula: Cuanta mayor ramificación mejor rechazo. Por ejemplo el isopropanol es rechazado mejor que el propanol.
- Los gases no son rechazados por lo que pasan al permeado en la misma concentración que en el agua de aporte.
- Las bacterias y los virus son rechazados completamente.

En los compuestos orgánicos no polarizados su rechazo depende de su peso molecular, por ejemplo si es inferior a 200 prácticamente pasan todos, pero con pesos moleculares mayores, o formas polimerizadas se consiguen rechazos de más del 95%.

En las membranas comerciales el paso de agua y de sales aumenta con la temperatura. Por tanto los valores se suelen indicar a una temperatura de 25 °C, y las condiciones deben ajustarse a la temperatura real. Un solo grado centígrado puede representar un aumento de caudal de un 2 a un 3 %.

Tabla 4.3 Porcentaje rechazado de cada ión en una MOI a 25 °C.

Especie iónica	Rechazo (%)
Sódio, Na ⁺	92 - 98
Calcio, Ca ⁺⁺	93 - 99
Magnesio, Mg ⁺⁺	93 - 98
Potasio, K ⁺	92 - 96



Hierro, Fe ³⁺ y Fe ²⁺	96 - 98
Manganeso, Mn ⁺⁴	96 - 98
Aluminio, Al ³⁺	96 - 98
Cobre, Cu ⁺⁺	96 - 99
Níquel, Ni ³⁺ y Ni ²⁺	96 - 99
Cinc, Zn ⁺⁺	96 - 98
Plata, Ag ⁺⁺	93 - 96
Mercurio, Hg ⁺⁺ y Hg ⁺	94 - 97
Cloro, Cl ⁻	92 - 98
Bicarbonatos, HCO ₃ ⁻	96 - 99
Sulfato, SO ₄ ⁼	96 - 99
Fluoruro, Fl ⁻	92 - 95
Silicato, SiO ₃ ⁼	92 - 95
Fosfato, PO ₄ ³⁻	96 - 98
Cianuro, CN ⁻	90 - 99

Sin embargo, como la membrana no es perfectamente semipermeable, el rechazo de la sal no es total y hay un pequeño flujo expresado por:

$$Q_s = K_s S (C_1 - C_2) \text{ [Ec. 4.23]}$$

Donde:

C_1 y C_2 son las concentraciones de sales a ambos lados de la membrana.

K_s es nuevamente una constante característica de la membrana.

S es la superficie de la membrana.

El flujo de agua se puede aumentar incrementando la presión exterior aplicada, sin que esto represente mayor paso de sales. Por consiguiente, con mayor presión se obtiene una mayor calidad de agua. Sin embargo, mayor presión significa un mayor coste energético. Con el incremento de presión hay que controlar además que no se supere la carga superficial máxima.

4.5.4.6. Factor de conversión



La recuperación, o conversión porcentual. Nos indica el porcentaje de agua que se “convierte” en agua purificada respecto del caudal total de agua que entra a la ósmosis inversa. Por tanto una recuperación del 60% significa que por cada 100 m³ alimentados, 60 m³ pasan como producto y 40 m³ van al rechazo. Se define como:

$$R = 100 \times Q_p / Q_a \text{ [Ec. 4.24]}$$

Donde:

Q_p es el caudal de permeado.

Q_a es el caudal de agua de alimentación.

Cada membrana admite como máximo una recuperación de aproximadamente un 15%. Por tanto para conseguir mayores producciones habrá que instalar suficientes membranas hasta conseguir el caudal necesario. Una planta de OI suele trabajar con recuperaciones globales desde 50 hasta el 85 %, siendo la mayoría de los sistemas diseñados a nivel industrial para el 70%.

Con el aumento de la conversión disminuye el volumen del rechazo, con lo que aumenta su concentración de sales. Dicho aumento puede estimarse mediante el factor de concentración

Tabla 4.4 Concentración del rechazo en función del grado de conversión en la OI.

Conversión porcentual (%)	Factor de concentración
50	2
66	≈ 3
75	4
80	5
83	6
87,5	8



Por ejemplo, para una conversión de un 50% la concentración de sales del rechazo ha aumentado al doble.

El grado de conversión está limitado por el contenido en sales insolubles tales como sulfatos, carbonatos, sílice y fluoruros. Una conversión demasiado alta provocará que el rechazo este demasiado concentrado, siendo en el extremo de salida del rechazo el punto crítico donde se alcanza la máxima concentración. Esto implica que debe asegurarse un caudal de rechazo mínimo suficiente para arrastrar los precipitados salinos que pudieran producirse sobre las membranas.

Cuando se desean conversiones muy altas deben disponerse las membranas en serie, de forma que el rechazo del primer grupo de membranas pase a tratamiento a un segundo grupo, y a un tercero si hace falta. Con una buena combinación de la disposición puede optimizarse la calidad y conversión de agua.

4.5.4.7. Factor de concentración

El factor de concentración da cuenta de las veces que se concentran las sales del agua de aporte en el rechazo, expresado como el cociente entre la concentración de iones del rechazo respecto de la concentración de iones del agua de aporte.

4.5.4.8. Coeficiente de permeabilidad del agua

Este parámetro informa sobre el volumen de agua que atraviesa la membrana por unidad de tiempo, unidad de presión y unidad de superficie, en condiciones de temperatura y salinidad constantes. El coeficiente de permeabilidad depende de las características de la membrana y puede expresarse como sigue:

$$K_w = \frac{DSV}{RTl} \text{ [Ec. 4.25]}$$

Donde:

D es la difusividad del agua a través de la membrana.

S su solubilidad.

V el volumen parcial molar del agua.

R la constante de los gases.

T la temperatura de operación.

l el espesor de la membrana.

4.5.4.9. Presión osmótica

La presión osmótica depende de la concentración salina y la temperatura, fundamentalmente, quedando definida supuesta una elevada dilución a partir de la siguiente expresión:

$$\pi^o = \varphi CRT \text{ [Ec. 4.26]}$$

Donde:

φ es el coeficiente de presión osmótica, en condiciones ideales y para soluciones diluidas adquiere el valor de 1.

C es la concentración de la especie química en mol/l

R es la constante de los gases ideales 0,082 atm l/mol K

T es la temperatura en grados kelvin.

4.5.4.10. Flujo específico

El flujo específico de permeado, es el volumen de agua que pasa por unidad de superficie de la membrana y unidad de tiempo. Normalmente se expresa en metros cúbicos por metro cuadrado y día. El flujo específico es directamente proporcional a la diferencia neta de la fuerza impulsora de presión aplicada sobre el agua (NPDF). Se expresa:

$$J = K_W (\Delta P - \Delta \pi^o) \text{ [Ec. 4.26]}$$

Donde:

J es el caudal específico de agua que atraviesa la membrana.

K_W coeficiente de permeabilidad.

ΔP es la diferencia de presión entre las dos caras de la membrana.

$\Delta \pi^o$ es la diferencia de presión osmótica entre las dos caras de la membrana.

El coeficiente de transporte depende de cada membrana y no es una constante, es función de la temperatura. Algunos coeficientes de las membranas más modernas de poliamida también son función del pH.

Al diseñar una OI se debe seleccionar un valor de flujo específico, el cual no es una propiedad de las membranas. En un sistema real de OI es función de la calidad del agua que le llega.

Si el flujo específico es demasiado alto, provocará un ensuciamiento de las membranas más rápido, además cuanto peor sea la calidad del agua que llega a la OI menor flujo específico debería permitirse, como puede verse en la tabla siguiente.

Tabla 4.5 Flujo específico en MOI en función del tipo de agua.

Agua a procesar	SDI	Flujo específico recomendado en m^3/d
Permeado de ósmosis inversa	<1	0,08 – 0,09
Agua de pozo	<3	0,05 – 0,06
Agua superficial	<3	0,05
Agua superficial	<5	0,04 – 0,05
Efluente municipal secundario (tratamiento convencional)	<5	0,03 – 0,05



4.5.4.11. Temperatura

La temperatura del agua es una variable de gran importancia en los sistemas de OI. La temperatura afecta tanto a la presión osmótica como a la permeabilidad del agua a través de la membrana: normalmente se acepta que el flujo de permeado se incrementa alrededor de un 3 % por cada °C de incremento de temperatura. Sin embargo, el paso de sales también aumenta en el mismo porcentaje que el flujo, por lo que al incrementarse la temperatura a flujo de permeado constante, la calidad del permeado disminuye.

También hay que tener en cuenta los efectos que la temperatura tiene sobre la estructura de las membranas, ya que elevadas temperaturas pueden disminuir su rendimiento de forma irreversible.

4.5.4.12. Polarización por concentración.

Al pasar el agua por la membrana en la corriente de rechazo aparece, como en el flujo por tuberías, una capa límite en la que el transporte de materia se produce por difusión y no por convección como en el resto de la corriente. Al disminuir la velocidad de la corriente la capa límite va aumentando de espesor. Como existe un transporte neto de agua a través de la membrana, existe también un flujo convectivo dentro de la capa límite que compite con el transporte difusivo de las sales rechazadas desde la membrana, este fenómeno acaba por provocar una tendencia de las sales rechazadas a concentrarse en la capa límite y entorpecer el paso de agua a través de las membranas.

Este fenómeno reduce el rendimiento de las membranas en tres aspectos. Se crea una resistencia hidráulica al paso de agua por las membranas. La acumulación de solutos aumenta la presión osmótica dentro de la capa límite reduciendo la diferencia neta de la fuerza impulsora de



presión. El aumento de la concentración de solutos en la capa límite genera un mayor paso de sales a la corriente de permeado.

La polarización de la concentración sobre la membrana hace que la presión sea mayor y demanda una mayor presión útil exterior.

La polarización por concentración es un fenómeno que tiene lugar en la superficie de la membrana y en la película de fluido adyacente, en la que se produce un incremento de la concentración de sales con respecto a la salinidad de la masa de agua de aporte, lo que implica un aumento local de la presión osmótica, disminuyéndose con ello el potencial químico que fuerza el paso de agua a través de la membrana y disminuyendo con ello el flujo. Se expresa como cociente de la concentración de sales en la superficie de la membrana con respecto a la concentración en sales del agua de aporte, siendo el paso de sales mayor que el previsto en función de esta última. La polarización también puede provocar complicaciones en la operación asociadas a precipitaciones e incrustaciones.

4.5.4.13. Valor de Corte de la membrana (Cut-Off).

Es el peso molecular mínimo de soluto que puede ser retenido por la membrana. Se utiliza el término NMWCO (Nominal Molecular Weight Cut Off) que es el peso molecular en el cual el 90% de todas las moléculas esféricas no cargadas, son retenidas.

4.5.4.14. Resistencia al cloro.

Los fabricantes de membranas de ósmosis inversa suelen indicar la resistencia de las membranas al cloro libre con valores que van desde 200 a 2.000 horas de funcionamiento con un agua de aporte de 1 mg/l. En el caso de las cloraminas muestran una resistencia mayor, de hasta 300.000 h en las mismas condiciones.

4.5.5. Tipos de membranas.



Las membranas son el elemento más importante en una instalación de ósmosis inversa, puesto que de ellas dependen importantes factores como son la selectividad, la relación entre el caudal de permeado y la alimentación o el factor de concentración. Se pueden clasificar atendiendo a numerosos criterios.

4.5.5.1. Según tipo constructivo

4.5.5.1.1. Membrana en forma tubular.

Está formada por largos tubos porosos de un diámetro de 5 a 15 mm, en cuyo interior y pegada a su pared se encuentra la membrana. El agua de alimentación penetra por un extremo del haz de tubos y circula por su interior saliendo el rechazo por el extremo opuesto. El permeado atraviesa la membrana y la pared del tubo soporte transversalmente recogiendo en el contenedor.

Estas membranas son las que tienen mayor área por unidad de volumen, que suele ser de unos $400 \text{ m}^2/\text{m}^3$. Debido a su forma constructiva, no es probable que las membranas tubulares se obstruyan, por lo que pueden aceptar gran cantidad de fluidos sin apenas tratamiento previo. Un inconveniente de las membranas tubulares es que la densidad del empaquetamiento es baja, lo que resulta en un mayor precio por módulo.

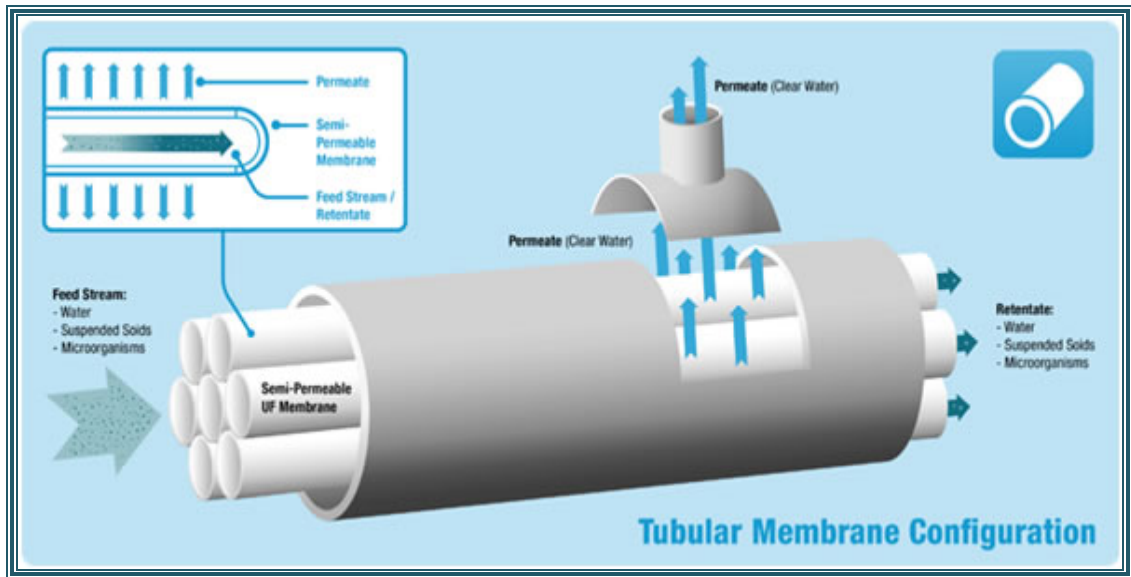


Figura 4.23 Estructura de una membrana tubular de OI.

4.5.5.1.2. Arrollamiento en espiral.

La membrana espiral consiste en un conjunto de hojas enrolladas en un soporte poroso y espaciador que se enrolla en un tubo de PVC que es el colector de agua producto. Generalmente, las membranas de las máquinas de ósmosis son de este tipo, debido a su mayor facilidad para limpiarse.

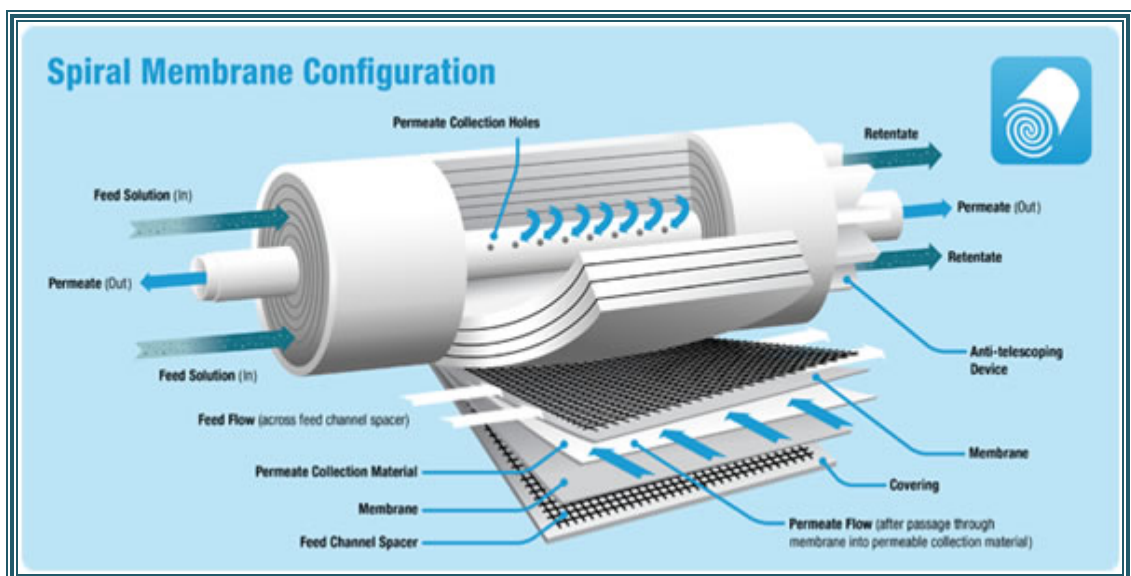


Figura 4.24 Estructura de una membrana espiral de Ol.

4.5.5.1.3. Membrana de fibra hueca.

La membrana de fibra hueca consta de miles de fibras huecas, con un diámetro inferior a $0,1 \mu\text{m}$, que constituyen un haz en el interior del contenedor y cuyos extremos terminan en un soporte de resina.

En este tipo de membranas, la alimentación no circula por el interior del tubo formado por la membrana, sino que lo hace exteriormente, el permeado atraviesa la pared de la fibra y circula por su interior. Exteriormente, las membranas de fibra hueca tienen el aspecto que se muestra en la figura 2.9iii:

Esta configuración de membrana solo puede ser usada para el tratamiento de agua con un bajo contenido de sólidos suspendidos, debido a la mayor posibilidad de obstrucción.

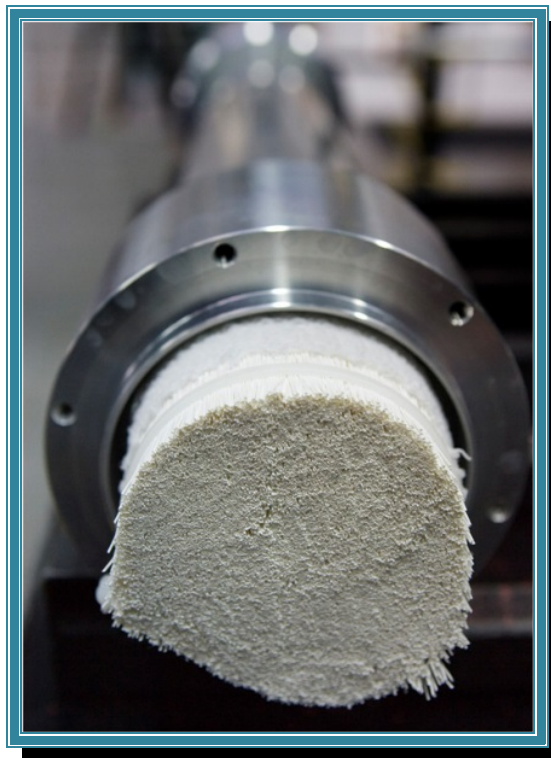


Figura 4.25 Fotografía de una membrana de fibra hueca de OI.

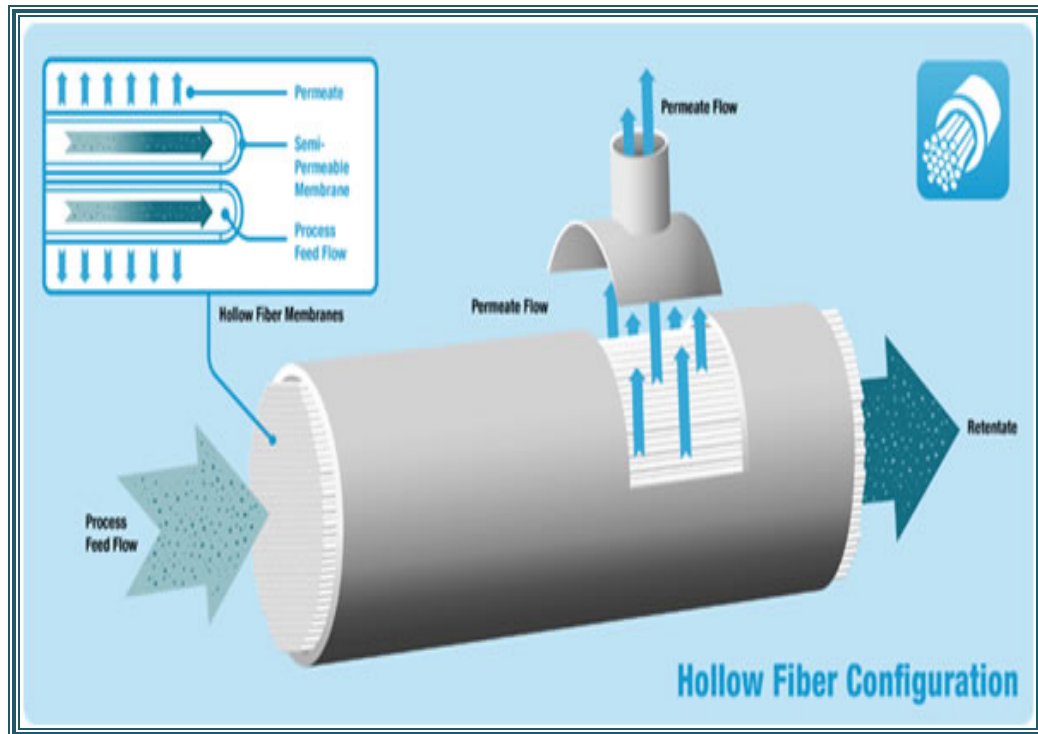


Figura 4.26 Estructura de una membrana de fibra hueca de OI.

4.5.5.2. Según su composición química.

En función de qué material esté fabricada la capa activa se pueden distinguir entre membranas orgánicas e inorgánicas.

4.5.5.2.1. Membranas orgánicas.

La capa activa está fabricada a partir de un polímero orgánico. Las más importantes son:

- Acetato de celulosa
- Triacetato de celulosa
- Poliamidas aromáticas
- Poliéterurea
- Poliacrilonitrilo

En general, puede afirmarse que las principales ventajas de este tipo de membranas son su menor precio y su mejor procesabilidad. En cambio, tienen una vida de operación corta, y se ven muy afectadas por la temperatura, el pH y multitud de sustancias químicas. Debido a sus características, sus principales usos se encuentran en el tratamiento de fluidos que hayan sido convenientemente pretratados y a bajas temperaturas.

En plantas de diálisis han sido muy usadas las membranas de acetato de celulosa. Las cuales resisten bien el cloro y los productos oxidantes, pero son sensibles al pH del agua, ya que puede provocar su hidrólisis limitando su vida útil. Además son fácilmente degradables por ataque microbiano. Actualmente se prefieren las membranas de poliamida. Resisten mucho mejor las variaciones de pH pero no son compatibles con el cloro residual. Por otro lado se consigue un poro y una permeabilidad mejores, siendo capaces de separar sustancias orgánicas e inorgánicas con tamaños de 1 a 10 ppm. Son membranas que en general presentan un mayor rendimiento y durabilidad.

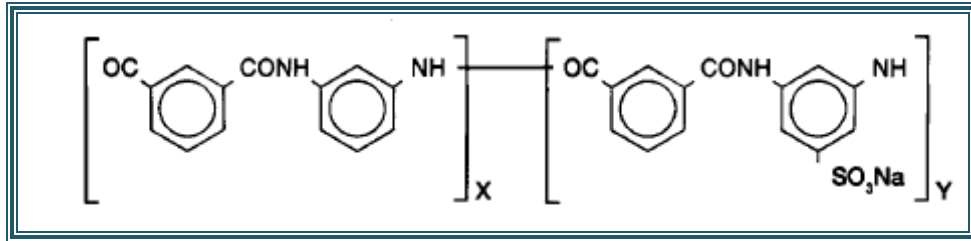


Figura 4.27 Estructura química de la capa activa de una membrana de poliamida aromática.

4.5.5.2.2. Membranas inorgánicas.

Este tipo de membranas suelen estar formadas por cerámicas (alúmina), vidrios, o estructuras de carbono. Las más utilizadas son las cerámicas refractarias preparadas a partir de alúmina, zirconio u óxido de titanio.

Son de reciente aparición, pero se han ido imponiendo a las orgánicas, ya que presentan una mejor resistencia mecánica, térmica y química, lo que les confiere una larga vida de operación. Sus principales desventajas son su fragilidad y coste, que generalmente suele ser superior al de las orgánicas. Debido a su estabilidad térmica y química, pueden utilizarse para el tratamiento de fluidos a elevadas temperaturas, en un amplio rango de pH y con la presencia de agentes oxidantes como el cloro.

4.5.5.3. Según su presión de trabajo.

La presión de trabajo es una característica muy importante en una membrana de OI, y puede indicar a qué fin está dedicada. Normalmente, cuanto mayor cantidad de sales tenga la alimentación, será necesaria una mayor presión de trabajo.

- Membranas de muy baja presión: Emplean presiones de entre 5 y 10 bares, y se utilizan para tratar aguas de baja salinidad y fabricar agua ultrapura. Es el caso de las plantas de diálisis.
- Membranas de baja presión: Utilizan presiones de entre 10 y 20 bares, y se suelen usar para tratar aguas de salinidad media.

- Membranas de media presión: su rango de trabajo está comprendido entre los 20 y los 40 bares, y se utilizan para numerosas aplicaciones.
- Membranas de alta presión: su principal aplicación es la desalación de agua del mar para obtener agua potable. Emplean presiones de entre 50 y 80 bares.

4.5.6. Ensuciamientos y técnicas de limpieza.

A pesar del pretratamiento al que se pueda someter la corriente de alimentación de la OI, es habitual que con el tiempo descienda el rendimiento de las MOI. Esto, principalmente es debido a:

- Precipitaciones de sales minerales y óxidos metálicos. Si se controla su concentración es posible evitar el problema.
- Depósitos de partículas y coloides. Los coloides particularmente crean grandes problemas de obstrucción de las membranas.
- Proliferación biológica. Puede aparecer cuando la alimentación contiene nutrientes que favorecen el desarrollo de microorganismos en el interior de los módulos.

Para restaurar las características de funcionamiento de la planta es necesario realizar una limpieza periódica de las membranas. Esta limpieza puede ser de dos tipos:

- Limpieza con permeado a presión o Flushing. Consiste en hacer llegar a las membranas un permeado exento de sustancias disueltas, de tal forma que arrastre la suciedad. Este tipo de limpieza suele hacerse siempre en cada puesta en marcha de la OI.
- Limpieza química. Consiste en hacer recircular a través de las MOI una serie de productos químicos en solución acuosa, capaces de disolver los precipitados de sales acumulados sobre las membranas.

4.5.7. Configuraciones constructivas.

En este apartado se describirán distintas formas de agrupar los módulos de ósmosis inversa en una instalación. Normalmente se tratará de una MOI de tipo espiral.

4.5.7.1. Módulos

Un módulo o recipiente de presión, es un tubo capaz de soportar grandes presiones, que contendrá un número variable de unidades de MOI dispuestas en serie, ver la figura xxx. Para mejorar los rendimientos de una planta de OI, es muy común agrupar los módulos, bien en serie o bien en paralelo.

- Módulos en serie: el permeado se recolecta en cada módulo y se conduce a un colector de permeado general. El rechazo del primer módulo se convierte en la alimentación del módulo siguiente, y así sucesivamente hasta llegar al rechazo general.
- Módulos en paralelo: en este caso, todos los módulos reciben la misma alimentación, que se reparte mediante un colector de aporte. El permeado de todos los módulos va al permeado general, mientras que el rechazo se canaliza mediante el rechazo general.

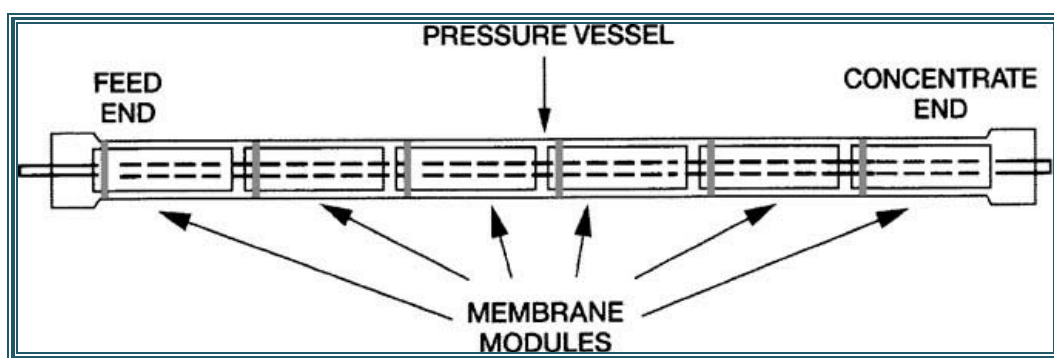


Figura 4.28 Esquema de la disposición de las unidades de MOI dentro del módulo de presión.

4.5.7.2. Etapas

Una etapa es un grupo de módulos que trabajan en paralelo, a la misma presión y alimentados desde una misma línea. Las etapas, como los módulos, pueden combinarse de diversas formas:

- Rechazo en serie: El rechazo de una etapa es la alimentación de la etapa siguiente, mientras que los permeados que se generan en cada etapa se canalizan separadamente. Es un sistema análogo a la agrupación de módulos en serie. Al instalar etapas en serie se consigue un mayor porcentaje de recuperación. No es común instalar más de 3 etapas en serie, ya que la ganancia en porcentaje de recuperación no suele compensar el coste que supone una etapa nueva.
- Recirculación del rechazo: en este tipo de agrupación de etapas, los rechazos de los módulos no son llevados a una segunda etapa en línea, sino que se colectan en una tubería única. De esa tubería, una parte se recircula hacia la alimentación, mientras que la otra parte se desecha como rechazo general. Los permeados se separan de la forma habitual. Con este procedimiento pueden alcanzarse conversiones de hasta el 75%, es decir, concentraciones en el rechazo cuatro veces superiores a las de la alimentación.

4.5.7.3. Sistemas

Un sistema es un conjunto de etapas agrupadas de cualquier forma, pero con una única bomba de alta presión. Atendiendo a esta definición, las plantas de ósmosis inversa pueden organizarse de distintas formas según cómo agrupen sus sistemas.

- Sistemas en serie: Los sistemas se denominan “pasos”, y están conectados de forma análoga a los agrupamientos de etapas con rechazo en serie. En este caso es muy raro encontrar más de dos sistemas colocados en serie, debido al elevado precio de las bombas

de alta presión, que hacen que el aumento en el porcentaje de recuperación no sea rentable.

- Sistemas en paralelo: Los sistemas se agrupan análogamente a la agrupación de módulos en paralelo, aunque como a la entrada de cada sistema se encuentra una bomba de alta presión, la alimentación puede no tener la misma presión en los dos sistemas.



Universidad de Valladolid

DISEÑO DE UNA PLANTA DE
PRODUCCIÓN DE AGUA PARA LÍQUIDO
DE DIÁLISIS.



ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES

5- DISEÑO QUÍMICO



Universidad de Valladolid

DISEÑO DE UNA PLANTA DE
PRODUCCIÓN DE AGUA PARA LÍQUIDO
DE DIÁLISIS.



**ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES**



5. DISEÑO QUÍMICO.

En el agua potable de consumo humano los contaminantes químicos deberían encontrarse en concentraciones muy bajas, casi siempre cumpliendo con los límites normativos, no obstante antes de ser utilizada en el proceso de diálisis, es imprescindible comprobar la calidad del agua mediante un **análisis actualizado**.

En cuanto al aspecto microbiológico, en principio no sería necesario ningún análisis, a no ser que sospechésemos la presencia de niveles altos de algún patógeno. Esto es así, ya que el agua bruta que va a alimentar a la planta es de consumo humano, con una calidad microbiológica ya de por sí muy alta.

5.1. Análisis del agua.

El análisis de agua para poder diseñar correctamente la planta de producción de agua, deberá incluir al menos los siguientes parámetros.

1º Conductividad o TDS.

2º Turbidez o SDI.

3º Dureza del agua.

4º Temperatura.

5º pH.

6º Desinfectante residual.

7º Todos aquellos iones regulados para el agua de hemodiálisis.

Conductividad o TDS

La conductividad de una disolución es, al contrario de la resistencia eléctrica, la facilidad que presenta la disolución para conducir la corriente eléctrica. Pero el agua pura no conduce prácticamente, siendo la presencia de sustancias en disolución las que la convierten en un buen conductor. Es una



propiedad fuertemente dependiente de la temperatura, por lo que cualquier medida para que pueda ser comparable debe corregirse a 20 °C.

El agua pura presenta una conductividad de 0,055 $\mu\text{S}/\text{cm}$ a 20 °C. Por tanto esta medida es un excelente y rápido indicador de la calidad del agua para diálisis.

TDS (Sólidos disueltos totales): Este parámetro indica la cantidad total de sustancias contenidas en un líquido en forma molecular, ionizada o en forma de suspensión coloidal. En general, la definición operativa es que los sólidos deben ser lo suficientemente pequeños como para pasar por una filtración de un tamaño de poro de 2 μm .

El TDS se diferencia del total de sólidos en suspensión (TSS), ya que este último además contiene sólidos que no pueden pasar a través del filtro de 2 μm , aunque sean estables en suspensión indefinidamente en el seno de la solución líquida.

La conductividad y el TDS están relacionados. Para la mayoría de aguas se puede considerar sin demasiado error:

$$\text{TDS (mg/l)} = 0,64 \times \text{CONDUCTIVIDAD } (\mu\text{S/cm}) \text{ [Ec. 5.1]}$$

Turbidez, SDI y MFI.

Son parámetros muy importantes ya que nos van a dar una idea de la capacidad que tiene un tipo de agua para ensuciar los filtros y especialmente las membranas de ósmosis inversa, por suspensiones de partículas coloidales. Se han propuesto varios índices para predecir el potencial de ensuciamiento coloidal en aguas de consumo humano:

- **Turbidez:** Es un índice de la cantidad de sólidos en suspensión que porta el agua. La turbidez se basa en la propiedad óptica que presentan las soluciones coloidales, la cual consiste en la dispersión de la luz con infinidad



de ángulos, en lugar de ser transmitida como un haz único a través de la muestra. Las soluciones coloidales se forman por innumerables materiales, por ejemplo arcilla, humus, microorganismos etc... La turbidez del agua de red para consumo Humano según normativa no podrá ser superior a **5 UNF**. El agua destinado a un proceso de ósmosis inversa, aunque se suele decir que con una turbidez menor de 5 UNF sería perfectamente asumible, la realidad es que haría falta más información, como el SDI o MFI. Muchas veces un agua con poca turbidez ha dado valores inaceptables de SDI para un proceso de ósmosis inversa.

- **SDI:** Se determina mediante un procedimiento estandarizado y reproducible, ampliamente aceptado en la industria. El procedimiento consiste en un ensayo normalizado (ASTM D4189), en el que se observa la disminución del flujo a través de un filtro debido a su ensuciamiento, a una presión de la alimentación constante de 30 psi. El aparato para medir el SDI se muestra en la figura 4.14, y consiste en un regulador de presión y un portafiltros, en el que se coloca un filtro estandarizado con un tamaño de poro de 0,45 μm , suficiente para ser obstruido por materia coloidal pero no por arena.

El ensayo consiste primeramente en colocar el filtro limpio en el portafiltros, y medir el tiempo que tarda en filtrarse 500 ml del agua objeto de estudio, a una presión constante de 30 psi, así se obtiene t_1 . A continuación se deja correr el agua a través del filtro durante 15 minutos, pasados los cuales, se determina nuevamente el tiempo que tarda en filtrarse otros 500 ml de agua, siendo t_2 . Finalmente el SDI se calcula aplicando la siguiente fórmula:

$$SDI = 100 \frac{1 - \frac{t_1}{t_2}}{T} \quad [\text{Ec. 5.2}]$$

Donde:

- t_1 es el tiempo necesario para filtrar 500 ml de muestra, al inicio de la prueba.

- t_2 es el tiempo necesario para filtrar 500 ml de muestra, al final de la prueba.

- T es el tiempo entre mediciones (15 minutos).

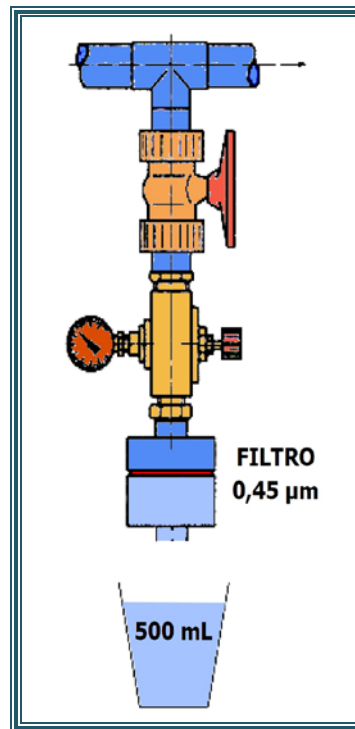


Figura 5.1: Aparato para la determinación del SDI

Valores de SDI altos indicarán una alimentación con gran cantidad de sustancias coloidales. El ensayo estándar antes descrito es válido para aguas con valores de SDI no muy altos, de 5,5 como máximo. Para aguas con SDI más elevados, existen procedimientos modificados. No obstante, por norma general se considera inviable tratar mediante ósmosis inversa aguas que presenten un SDI mayor de 5. En caso de disponer de un agua con un SDI más elevado, será necesario someterla a un tratamiento previo para disminuirlo.

- **MFI** (Modified Fouling Index): Es proporcional a la concentración de la materia suspendida y es un índice más exacto que el SDI para predecir la tendencia de un agua a ensuciar membranas de ósmosis inversa.



En principio, el ensayo del MFI se realiza con los mismos materiales y en las mismas condiciones que en el caso del SDI. Durante el ensayo de MFI, se necesita determinar una curva completa del volumen en litros, con respecto al tiempo en segundos. En la práctica los datos de los volúmenes filtrados cada 30 segundos se anotan durante los 15 minutos del ensayo de MFI y posteriormente se representan en un gráfico t/V respecto a V , donde se considera la zona recta de la curva correspondiente a la filtración de la torta formada sobre el filtro, excluyendo la zona inicial correspondiente al bloqueo por filtración y la zona final de rotura de torta. De acuerdo a la teoría esta gráfica debería ser totalmente lineal y cuya pendiente representaría el valor del MFI.

La medida del SDI es una medida práctica para dar una idea aproximada del potencial de ensuciamiento coloidal, pero no es muy preciso con algunos tipos de agua. El índice de atascamiento modificado, MFI, se muestra como una medida más exacta del potencial de ensuciamiento, en las membranas por coloides.

Las medidas de turbidez y de SDI seguirán usándose dada su sencillez de cálculo aunque debe tenerse en cuenta su interpretación y su verdadero significado. En especial es posible obtener valores realmente bajos de turbidez (inferiores a 0,5 NTU) y en cambio mantener potenciales de ensuciamiento coloidal muy elevados.

Dureza del agua.

La dureza representa una medida de la cantidad de metales alcalinotérreos disueltos en el agua, fundamentalmente Calcio y Magnesio. Se suele expresar como mg/l de CaCO_3 o en grados franceses, también llamados grados hidrotimétricos.

- Dureza total: es la suma total de las concentraciones de sales de calcio y magnesio, se mide por volumetría de complejación con EDTA, se expresa numéricamente en forma de carbonato de calcio u óxido de calcio,



pueden también utilizarse los grados franceses ($1^\circ f = 10 \text{ mg}$ de carbonato de calcio/l).

- Dureza temporal: es la que corresponde a los bicarbonatos de calcio y magnesio, y desaparece por ebullición, ya que precipitan en forma de carbonatos.
- Dureza permanente: es la que existe después de la ebullición del agua, se calcula como diferencia entre las dos anteriores.

En función del estado de mineralización, podemos distinguir distintos tipos de aguas:

Tabla 5.1. Clasificación del agua según su dureza.

Clasificación	Dureza (mg CaCO ₃ / l)
Blandas	0 – 100
Moderadamente duras	101 – 200
Duras	201 – 300
Muy duras	> 300

Temperatura.

La temperatura es una variable física que influye notablemente en la calidad de un agua. Afecta a parámetros o características tales como la solubilidad de gases y sales, la cinética de las reacciones químicas y bioquímicas, desplazamientos de los equilibrios químicos, tensión superficial, desarrollo de organismos presentes en el agua, etc....

Especial importancia va a tener en el rendimiento de las membranas de OI, donde un aumento de temperatura, sin llegar a superar un cierto límite a partir del cual la membrana puede ser destruida, favorecerá el paso de agua a su través.



pH.

El pH de un agua indica el carácter ácido o básico de la misma. Es una propiedad química importantísima ya que influye en prácticamente todos los procesos químicos y biológicos, la naturaleza de las especies iónicas que se encuentran en su seno, el potencial redox del agua, el poder desinfectante del cloro, etc...

Por lo general las aguas naturales tienen un cierto carácter básico con unos valores de pH comprendidos entre 6,5-8,5. El agua de los océanos tiene un valor medio de 8.

Los ríos presentan, en general, aguas con soluciones amortiguadoras naturales, es decir, presentan la facultad de mantener constante el nivel de pH al añadirse ácidos o bases hasta cierta cantidad. Un tampón o buffer, por lo general, consiste en sales solubles que son producto resultante de la reacción entre un ácido débil y una base fuerte, como el carbonato de calcio. La capacidad tampón viene dada por iones de carbonato y bicarbonato, estas sustancias, junto con el dióxido de carbono, forman el sistema tampón o búfer del agua. Si el agua tiene suficiente capacidad tampón, ésta capacidad tampón puede absorber y neutralizar el ácido añadido sin apenas modificar el pH.

Desinfectante residual utilizado.

Los desinfectantes residuales más comunes en las aguas de consumo humano municipales son el cloro libre y las cloraminas.

Si la desinfección aplicada por la compañía suministradora está basada en el uso de cloraminas, habrá que dimensionar la etapa de dechloración convenientemente para asegurar su ausencia en el LD. Por el momento en España sigue siendo mayoritario el uso de cloro libre como agente desinfectante.



Todos aquellos iones regulados para el agua de hemodiálisis.

Para ilustrar el procedimiento y poder dimensionar numéricamente las etapas de la planta de tratamiento de agua, se tomarán como referencia los valores de un análisis de agua de grifo, en febrero de 2013 en cierto establecimiento hospitalario en la ciudad de Valladolid.

En las tablas 5.2 y 5.3 podemos ver en la primera columna los valores obtenidos en el mencionado análisis, en la segunda columna los valores máximos admitidos en el agua de diálisis según la normativa, y en la tercera columna la disminución en el parámetro considerado que debe conseguir la planta objeto de este trabajo.

Tabla 5.2. Análisis físico-químico del agua.

	Valor	Límite máximo
Conductividad ($\mu\text{S}/\text{cm}$ corregido a 20°C)	543	4,3
pH	7,2	7
Temperatura (°C)	10,0	-
SDI	< 5	-
Dureza total (como mg/l CaCO_3)	220,19	
Bicarbonatos (mg/l)	243,4	
Carbonato (mg/l)	0,21	
Residuo seco (mg/l)	339	0

Tabla 5.3. Análisis químico y valores límite normativos para cada elemento.



	Valor (mg/l)	Límite máximo (mg/l)
Sílice	0,90	-
Hierro	0,5	-
Manganeso	0,2	-
Calcio	67,40	2
Magnesio	12,60	2
Sodio	30,74	50
Potasio	4,30	2
Antimonio	<0,004	0,006
Arsénico	<0,005	0,005
Bario	0,04	0,1
Berilio	<0,005	0,0004
Cadmio	<0,002	0,001
Cromo	<0,010	0,014
Plomo	<0,006	0,005
Mercurio	<0,001	0,001
Selenio	<0,009	0,09
Plata	<0,01	0,005
Aluminio	1,8	0,01
Amonio	<0,05	0,2
Cloraminas	<0,01	0,1
Cloro libre	0,89	0,5
Cloro (cloruros)	19,80	50
Cobre	<0,02	0,1
Flúor	0,18	0,2
Nitrato (como N)	9,30	2
Sulfatos	54,5	50
Talio	<0,002	0,002
Zinc	<0,01	0,1



Universidad de Valladolid

DISEÑO DE UNA PLANTA DE
PRODUCCIÓN DE AGUA PARA LÍQUIDO
DE DIÁLISIS.



ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES



6- ETAPAS DEL TRATAMIENTO DE AGUA.



6. ETAPAS DE TRATAMIENTO DEL AGUA.

Para conseguir la purificación del agua hasta obtener la calidad necesaria para su uso como agua para preparar el LD, son necesarios una serie de procesos físicos y/o químicos, aplicados en un orden determinado. El orden depende de la calidad necesaria del agua, para que sea efectivo el proceso siguiente o para que sea más económico su funcionamiento. Así pues, cada vez que el agua mejore en un determinado aspecto, por la aplicación de un proceso físico y/o químico definirá una etapa del tratamiento.

En cada etapa serán necesarios una serie de cálculos y consideraciones en el diseño que permitan asegurar el correcto funcionamiento de la planta. Los cálculos serán de tres tipos:

- Ajuste de balances másicos entre etapas o en la propia etapa.
- Dimensionamiento de la etapa o del equipo para que pueda cumplir con la tarea encomendada.
- Cálculos de pérdidas de carga en la instalación y en los equipos.

Como principales etapas de tratamiento y en el orden en que están, hemos de considerar:

1. Filtración inicial.
2. Recuperación de rechazo de RO2 y bombeo.
3. Descalcificación.
4. Decloración y filtración en lecho de carbón activo.
5. Ósmosis inversa 1.
6. Almacenaje intermedio.
7. Ósmosis inversa 2.
8. Esterilización con UV, filtración y distribución del agua.

Un esquema del proceso completo puede verse a continuación en la figura 6.1.

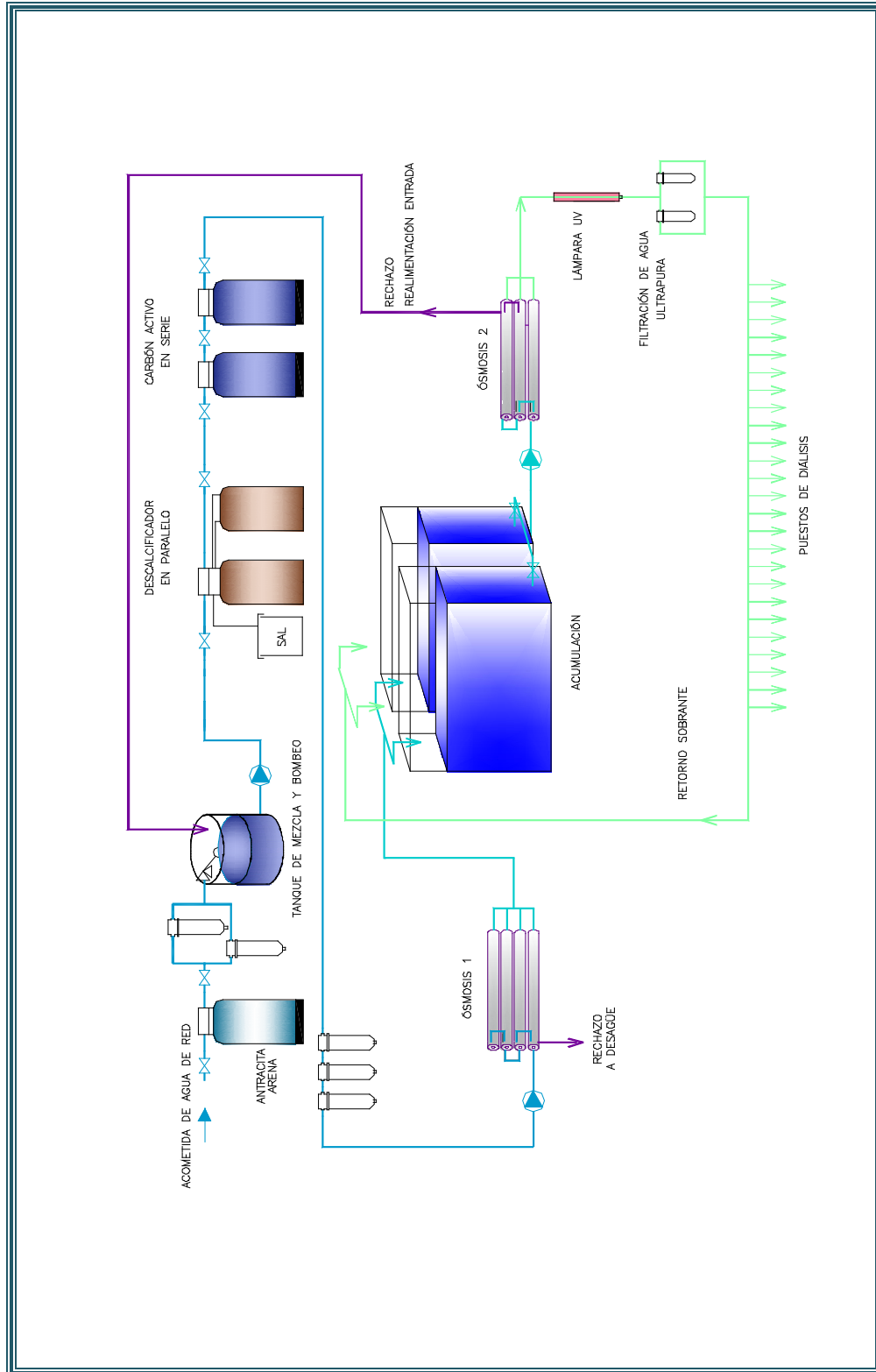


Figura 6.1 Esquema general de la planta de producción de agua para diálisis.

6.1. Consideraciones y cálculos previos.

El primer paso es dimensionar la planta para que la producción de agua que se consiga cubra con cierto margen de seguridad las necesidades de la Unidad de Hemodiálisis mencionada. Para ello hemos de tener en cuenta los siguientes datos:

Número de puestos:	25.
Caudal de cada monitor:	40 l/h.
Caudal punta útil de la planta:	1000 l/h.
Tiempo medio de una sesión de hemodiálisis:	4 h.
Tiempo diario estimado de funcionamiento de la planta:	13 h.

En los siguientes apartados voy a ir explicando cada etapa en el orden de paso del agua, ya que considero que es la mejor manera de comprender el funcionamiento de la planta. Sin embargo al estar todos los procesos interrelacionados muchas veces en una determinada etapa se requerirán datos provenientes de otra posterior. Los más importantes son:

Caudal de la planta: 9,6 m³/h es solución de la primera OI.

Caudal de permeado en la primera OI: 4,8 m³/h es función del tiempo de parada de la primera OI y del caudal de alimentación de la segunda OI.

Caudal de realimentación a la planta: 2 m³/h es el rechazo de la segunda OI.

6.2. Filtración inicial.

6.2.1. Justificación.

En todo aporte de agua hay en mayor o menor medida materia sólida en suspensión. De estos sólidos una parte se puede separar por decantación y filtración en la ETAP municipal, pero otra pequeña fracción inevitablemente



permanecerá en el agua, formando una suspensión coloidal. Por tanto la primera etapa deberá ser una filtración lo más eficiente posible para eliminar las partículas mayores de un cierto tamaño y también para reducir al máximo la carga coloidal. Esta acción permitirá un funcionamiento óptimo de las demás etapas. En concreto no se recomienda el uso de membranas de OI cuando el agua presente un SDI > 5 , siendo menos de 3 el valor ideal para su buen funcionamiento.

6.2.2. Descripción.

Esta etapa consta de un botellón donde está alojado el lecho filtrante. Dicho recipiente lleva incorporado un cabezal electromecánico para poder lavar el lecho periódicamente y arrastrar las partículas que hubieran quedado retenidas. El recipiente recibirá directamente el agua con la presión de la red. Aguas abajo del botellón se instalarán dos filtros tipo cartucho de polipropileno sinterizado de 20 μm en paralelo, para evitar el arrastre de finos procedentes del lecho, por variaciones bruscas del caudal de entrada, y para asegurar un tamaño de partícula menor aguas abajo.

El lecho estará compuesto por tres capas de materiales distintos. La primera capa en el sentido de avance del agua estará formada de gránulos de antracita, la segunda de arena con un tamaño de grano menor, y finalmente una de grava de 15 cm, sobre la que se asientan las anteriores e impide su fuga, esta capa no participa prácticamente en la filtración. Los granos de antracita al tener menor densidad y mayor tamaño que los de la arena, al hacer los lavados y el subsecuente esponjamiento del lecho, siempre quedarán en la parte superior, siendo el material con el que primero se encontrará el agua bruta al entrar en el botellón.



Figura 6.2 Botellón contenedor del lecho filtrante.

Los filtros comerciales generalmente poseen un cabezal programable horario para realizar la autolimpieza del lecho. En este trabajo voy a fijar una carrera de funcionamiento diaria, de modo que el lavado se lleve a cabo en horario nocturno cuando normalmente no se está dializando.

En esta etapa se reducirá el SDI del agua hasta un valor menor que 3, reteniéndose la mayoría de las partículas de más de 20 μm .

6.2.3. Diseño y cálculo.

Una planta de producción de agua para hemodiálisis se instalará en centros sanitarios, los cuales estarán abastecidos normalmente por suministros de agua municipales, por lo que la calidad del agua tanto en el aspecto microbiológico, como en el químico será buena. En particular la turbidez será menor que 5 UNF en casi todo momento (salvo averías), y esto implica pocas partículas en suspensión. No obstante, los hospitales y las clínicas deben cumplir, por ser edificios de uso colectivo, con el REAL DECRETO 865/2003, de 4 de julio, por el que se establecen los criterios higiénico-sanitarios para la prevención y control de la legionelosis. En dicho RD, en el artículo 7, apartado 1.b, haciendo referencia al agua de red para



uso humano dice que se debe “Disponer en el agua de aporte sistemas de filtración según la norma UNE-EN 13443-1, equipo de acondicionamiento del agua en el interior de los edificios –filtros mecánicos– parte 1: partículas de dimensiones comprendidas entre 80 μm y 150 μm -requisitos de funcionamiento, seguridad y ensayo.”

Es decir el agua suministrada al centro sanitario, antes de ser almacenada en un aljibe o distribuida debe ser filtrada para evitar la entrada de partículas de más de 150 μm . De modo que a la planta podrían llegar partículas sólidas en suspensión de tamaño variable pero no mayor que el tamaño mencionado.

La tabla 6.1 muestra los valores de las características más importantes del flujo de agua. Al final de cada etapa esta tabla nos irá indicando su variación durante el funcionamiento de la planta.

Tabla 6.1 Características del flujo de agua.

CARACTERÍSTICAS DEL AGUA DE ENTRADA	
Caudal (m^3/h)	9
Presión (bar)	4
pH	7,2
Conductividad ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	543
SDI	<5
Dureza ($^\circ\text{f}$)	22
Cloro total (mg/l)	0,89
Tamaño partícula sólida (μm)	< 150

El caudal nominal a tratar será **7,6 m^3/h** de agua de red. Este caudal se mezclará con el que provenga del rechazo de la segunda OI, como luego se



verá, y todo ello será la alimentación a la planta. Sin embargo existe la posibilidad de que por una avería en la segunda OI, no se pudiese contar con el aporte de su rechazo para realimentar a la planta, el filtro en este caso debe poder tratar un caudal máximo de **9,6 m³/h**, luego este será el valor de diseño.

Los caudales específicos en este tipo de filtración oscilan entre 10–20 m³/m²h (m/h) [2], así pues, fijaré un valor de **20 m³/m²h**. De modo que para este caudal se obtiene una superficie perpendicular al paso de la corriente de 0,48 m², lo que supone un diámetro del lecho filtrante de **0.78 m**.

Se sabe que la relación entre los espesores de las capas (antracita y arena), más eficiente, es 2/3 para la antracita y 1/3 de L para la arena, donde L es la altura total del lecho filtrante. El espesor de la capa de arena para agua superficial puede ser del orden de 25 cm y el de antracita 50 cm [2], así que voy a fijar unos espesores de **30 y 60 cm** respectivamente. Es evidente que cuanto mayor sea L mayor será la calidad del filtrado, sin embargo la pérdida de carga que se produciría podría no ser asumible. Un valor normal podría ser 0,4 bar para el total del lecho, de modo que el lecho limpio comienza a filtrar agua y se va ensuciando a medida que retiene materia en suspensión hasta llegar a un valor máximo de su pérdida de carga. En realidad para que el filtro funcione correctamente deben haberse hecho algunas pruebas para relacionar la pérdida de carga con el comienzo de la fuga de turbidez provocada por la materia que ya había sido retenida en el filtro.

En la tabla 6.2 se relacionan las características más importantes de los materiales de un filtro comercial de aplicación en agua potable.

Tabla 6.2 Características de los materiales.

CARACTERÍSTICAS DE LOS MATERIALES QUE FORMAN EL LECHO	
ANTRACITA	ARENA



Tamaño (mm)	0,9 - 1	0,5 - 0,55
Coefficiente de uniformidad	1,8	1,65
Peso específico	1,67	2,65
Porosidad (ϵ_0)	0,5	0,4

La pérdida de carga que produce un lecho granular se puede estimar por la ecuación de Ergun para flujo laminar. Esta ecuación solo es aplicable con flujo laminar, el cual solo se presenta cuando el número de Reynolds (ecuación 6.2) es menor que 20.

$$\Delta p = \frac{150(1 - \epsilon)^2 \mu u_0 L}{\epsilon^3 d_p^2} + 1,75 \text{ [Ec. 6.1]}$$

$$Re_p = \frac{d_p u_0}{\nu} \text{ [Ec. 6.2]}$$

Donde:

Δp es la pérdida de carga.

μ es la viscosidad dinámica del agua.

ν es la viscosidad cinemática del agua.

ϵ es la porosidad del lecho fijo.

L es la altura del lecho.

u_0 es el caudal específico.

d_p es el diámetro partícula.

Una simplificación del diseño al no tener más información sobre la distribución granulométrica de la arena y la antracita, es suponer que el tamaño de la arena y el de la antracita es homogéneo en todo el lecho. Entonces:

ANTRACITA

Parámetros funcionamiento



Q (m ³ /h)=	9,6
Caudal específico (m/h)=	20
Temperatura (°C)=	10
Viscosidad cinemática (m ² /s)=	1,31E-06
Viscosidad dinámica (kg/ms)=	0,001308

Características del lecho

Tamaño (mm)=	0,95
Porosidad	0,5
Altura (m)=	0,6

Resultados

R _{ep} =	4,04
Δp ₁ (bar)=	0,01

ARENA

Parámetros funcionamiento

Q (m ³ /h)=	9,6
Caudal específico (m/h)=	20
Temperatura (°C)=	10
Viscosidad cinemática (m ² /s)=	1,31E-06
Viscosidad dinámica (kg/ms)=	0,001308

Características del lecho

Tamaño (mm)=	0,5
Porosidad	0,4
Altura (m)=	0,3

Resultados

R _{ep} =	2,13
Δp ₂ (bar)=	0,07

Finalmente la pérdida de carga en el filtro será la suma de las dos anteriores, es decir $\Delta p_f = \Delta p_1 + \Delta p_2 = 0,08$ bar

Para calcular los cartuchos filtrantes de polipropileno sinterizado voy a recurrir a la figura 6.3 donde se nos ofrece un diagrama de pérdidas de carga

para un filtro de excelentes características, ver anexo 2. Son dos filtros en paralelo detrás del lecho filtrante, de modo que el caudal se dividirá entre los dos, siendo su valor de 80 litros por minuto para cada uno. El tamaño de poro nominal, se elige de $20\ \mu\text{m}$ para aumentar la eficacia de la etapa. La pérdida de carga por tanto será de casi 10 mbar. Pero esto es para un cartucho de 25 cm (10"), y como es evidente el proceso de filtrado proporcionará un agua de mayor calidad si aumento la superficie de filtrado, siendo además un equipo barato merece la pena elegir un filtro de 508 mm ($20\ \frac{3}{4}$ ") que tiene algo más del doble de superficie. La pérdida de carga final es de $\Delta p_c = 0,05\ \text{bar}$.

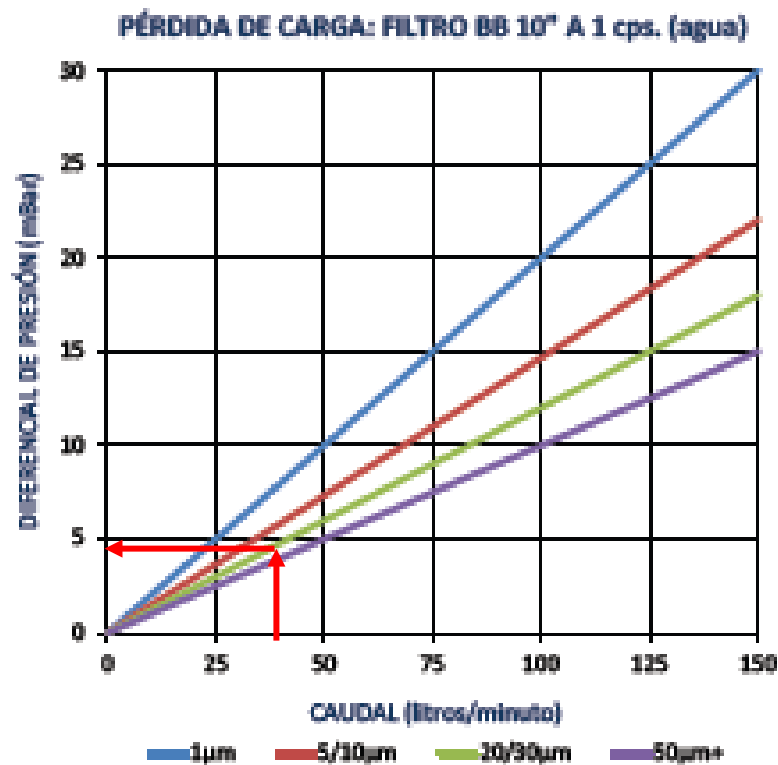


Figura 6.3 Diagrama de pérdida de carga para filtros de cartucho Gesfilter.

Finalmente la pérdida de carga de la etapa completa es de $\Delta P_1 = \Delta p_f + \Delta p_c$ 0,13 bar.



Tabla 6.3 Características del flujo de agua.

CARACTERÍSTICAS DEL AGUA AL FINALIZAR LA ETAPA 1	
Caudal (m ³ /h)	9
Presión (bar)	3.87
pH	7.2
Conductividad (μS/cm)	543
SDI	< 3
Dureza (°f)	22
Cloro total (mg/l)	0,89
Tamaño partícula sólida (μm)	< 20

6.3. Depósito y bombeo.

En esta etapa es donde vamos a conseguir la suficiente presión para vencer las pérdidas de carga de la instalación.

6.3.1. Justificación.

Es necesario un depósito con un grupo de bombeo después de la filtración inicial por dos motivos principalmente:

- Para poder realimentar a la planta con el agua del rechazo de la segunda ósmosis inversa, consiguiendo de este modo ahorrar agua y mejorar la calidad del efluente que se va a tratar.
- Vencer las pérdidas de carga en las etapas posteriores y poder asegurar el caudal necesario para el funcionamiento de la planta.

6.3.2. Descripción.



El depósito se alimentará con el agua proveniente de la primera etapa. La regulación del caudal se consigue con un sencillo mecanismo de válvula y boya. Esta acometida servirá para ir reponiendo el agua que se consume en el funcionamiento normal de la planta.

Habrà como se ha mencionado, otra segunda acometida por la que se irá vertiendo el caudal constante que se rechaza en la segunda OI, por tanto en el depósito será necesario un rebosadero para expulsar el exceso de agua que se produzca cuando se detenga la primera OI. Conectado al depósito habrá un grupo de presión protegido por una sonda de nivel mínimo, que se ocupará de enviar con suficiente presión el agua al resto de la planta. En el caso de que las bombas se detengan por nivel mínimo o por fallo térmico se activará una alarma y se enviará una señal a la primera OI para que se detenga.

6.3.3. Diseño y cálculo.

Para ahorrar la mayor cantidad de agua posible la boya cortará la entrada de agua con una altura de 30 cm, suficiente para que las bombas no caviten. Sin embargo el depósito será más alto para poder almacenar la mayor cantidad posible del rechazo de la segunda OI, durante el tiempo que se detenga la primera OI en su funcionamiento normal. Ese tiempo se puede fijar en 30 minutos (ver apartado 6.6.2.). Lo que no pueda ser almacenado se verterá al desagüe por el rebosadero del depósito. Así pues, el volumen recuperable de agua es **1 m³**.

Si el depósito es cilíndrico de 1 m de diámetro, la altura útil del depósito será de 1,57 m (0,3 + 1,27 m). Se debe sumar al menos otros 20 cm para poder instalar las acometidas de agua mencionadas. Por tanto debería elegirse un depósito cilíndrico con una altura mínima de 1,77 m, bien entendido que la altura del agua como mucho será de 1,57 m, y el peso del



depósito lleno estará alrededor de la tonelada y media, lo cual es un dato importante a la hora de elegir el lugar donde se va a instalar la planta de producción de agua dentro del centro hospitalario.

La conductividad del agua a la salida de esta etapa, será de unos **432 $\mu\text{S/cm}$** , la cual queda definida por las conductividades de los dos aportes de agua y de su proporción según la siguiente ecuación:

$$\Lambda = \frac{Q_a \times \Lambda_a + Q_{r2} \times \Lambda_{r2}}{Q_a + Q_{r2}} \quad [\text{Ec. 6.3}]$$

Donde:

Λ es la conductividad a la salida de la etapa.

Λ_a es la conductividad de la entrada.

Λ_{r2} es la conductividad del rechazo de la segunda OI, igual a $10,25 \mu\text{S/cm}$.

Q_a es el caudal de aporte a la entrada.

Q_{r2} es el caudal del rechazo de la OI2.

De manera análoga, la dureza del agua también habrá disminuido ya que el rechazo de la OI2 está exento de ella, por tanto y aplicando la ecuación [6.4] se obtiene una dureza de **17,42 grados franceses**.

$$f = \frac{Q_a \times f_a}{Q_a + Q_{r2}} \quad [\text{Ec. 6.4}]$$

Donde:

f es la dureza a la salida de la etapa.

f_a es la dureza del agua de red.

En el caso del SDI y cloro libre se puede seguir un procedimiento idéntico.



El caudal nominal del grupo de bombeo será **9,6 m³/h**.

La presión del grupo de bombeo debe de ser la necesaria para vencer todas las pérdidas de carga de la instalación hasta la primera OI, la altura a la que esté la entrada a la primera OI, la presión mínima necesaria para el buen funcionamiento de los cabezales hidráulicos de los botellones, y al menos que sobren **0,5 bar** (h_m) para que la bomba de la OI trabaje en perfectas condiciones.

La acometida de la primera OI puede estar a 1,5 m de altura, lo que traducido a presión es **$h = 0,15$ bar**.

La presión mínima necesaria a la entrada de cada cabezal hidráulico es según el anexo 3, **$h_c = 1,5$ bar**.

6.3.3.1. Pérdidas de carga en la instalación.

Las bombas de esta etapa son las encargadas de vencer todas las pérdidas de carga de la instalación hasta la primera OI, donde hay otra bomba.

Hay tres tipos de pérdida de carga:

- Las debidas al paso de agua por la tubería recta.
- Las debidas a accesorios, como codos, válvulas y los cabezales de los botellones.
- Las debidas a los equipos: los lechos fijos y cartuchos filtrantes.

Perdidas de carga en tuberías

Para elegir el diámetro de la tubería de la planta, basta con fijar la velocidad del agua, siendo normalmente para conducciones interiores de entre 1,5 a 2 m/s. Elijo 2 m/s, entonces aplicando la ecuación [6.5] y con el caudal de 9,6 m³/h, obtengo una sección interna de tubería de 0,0013 m², que a su vez implica un diámetro interno de al menos 41,2 mm.

$$u = \frac{Q}{S} \text{ [Ec. 6.5]}$$

Donde:

u es la velocidad media del agua en la conducción.

Q es el caudal

S es la sección de la tubería.

El material elegido para la tubería de la planta es polipropileno electrosoldado con presión nominal de 16 bar, los motivos de su elección pueden verse en el punto 6.7.1. En la tabla 6.3 vemos una relación de los diámetros comerciales para esta tubería y sus pérdidas de carga por metro de tubería. El diámetro de la tubería, según la tabla, será el diámetro inmediatamente superior al calculado, por tanto es de 45,6 mm, que corresponde al de la tubería de 63 mm, con un espesor de pared de 8,7 mm.

Tabla 6.4 Valores de pérdidas de carga para tubería de polipropileno.

PN 16 k=0,01	Temperatura agua = 10°C													
	16x2,3 mm		20x2,8 mm		25x3,5 mm		32x4,5 mm		40x5,6 mm		50x6,9 mm		63x8,7 mm	
Q 1/s	R kPa/m	v m/s	R kPa/m	v m/s	R kPa/m	v m/s	R kPa/m	v m/s	R kPa/m	v m/s	R kPa/m	v m/s	R kPa/m	v m/s
1,40							5,449	3,4	1,824	2,1	0,604	1,4	0,199	0,9
1,60									2,322	2,5	0,767	1,6	0,253	1,0
1,80									2,874	2,8	0,948	1,7	0,311	1,1
2,00									3,480	3,1	1,145	1,9	0,376	1,2
2,20									4,139	3,4	1,360	2,1	0,446	1,3
2,40											1,591	2,3	0,521	1,5
2,60											1,839	2,5	0,601	1,6
2,80											2,104	2,7	0,686	1,7
3,00											2,385	2,9	0,777	1,8
3,20											2,682	3,1	0,873	2,0
3,40											2,995	3,3	0,974	2,1

La pérdida de carga de esta tubería es de 0,686 kPa/m.

La longitud de la instalación se puede estimar de manera amplia asignando por cada equipo 2 m de tubería, esto nos daría una longitud de 8 m, por tanto en total $\Delta p_t = 0,056$ bar.

Perdidas de carga en elementos singulares

Las pérdidas de carga de forma también se pueden estimar asignando a cada equipo 2 válvulas y 4 codos, a las bombas además hay que instalarlas una válvula antirretorno. Para su estimación se usa la ecuación [Ec. 6.6].

$$\Delta p = K \frac{u^2}{2g} \text{ [Ec. 6.6]}$$

Donde:

Δp es la pérdida de carga.

K es el coeficiente de forma adimensional.

g es la constante de la gravedad.

Tabla 6.5 Valores de pérdidas de carga en las piezas de la instalación.

	K	Δp (bar)	Unidades	Total (bar)
Codo a 90°	0,5	0,01	16	0,16
Te con salida central	1	0,02	1	0,02
Válvula de bola abierta	0,1	0,002	8	0,016
Válvula antirretorno	2,5	0,05	1	0,05
			Total	0,246

Otro elemento que introduce pérdidas de carga son los cabezales hidráulicos de cada botellón. Para su estimación no queda más remedio que acudir a los datos del fabricante, que en este caso como ejemplo he considerado un cabezal V 250 de la casa SIATA, ver anexo 10.3.

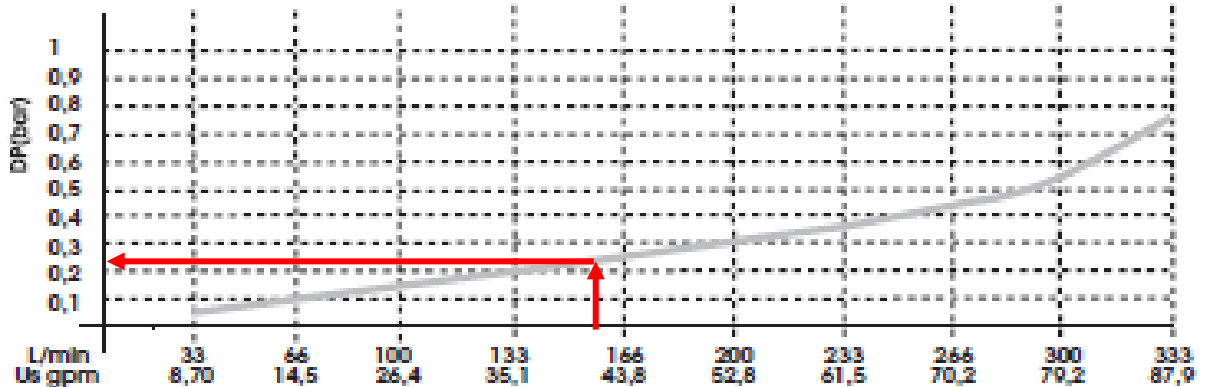


Figura 6.4 Diagrama de pérdida de carga para cabezal V250 SIATA.

La pérdida de carga que produce el cabezal para el caudal de diseño es 0,25 bar, pero más adelante veremos que hay tres cabezales, por tanto 0,75 bar.

Finalmente $\Delta p_f = 1$ bar.

Perdidas de carga en los equipos

Se calculan en las etapas posteriores y son:

Lecho de intercambio iónico $\Delta P_2 = 0,77$ bar.

Doble lecho CAG $\Delta P_3 = 0,24$ bar.

Conjunto de filtros cartucho previos a la OI $\Delta P_4 = 0,25$ bar.

Finalmente $\Delta p_e = 1,26$ bar.

Por tanto las bombas deberán ser capaces de impulsar al agua una presión mínima de $H = h_c + h + \Delta p_t + \Delta p_f + \Delta p_e = 3,97$ bar.

Cada bomba de esta etapa debe tener una potencia de al menos **1,34 kW**, calculado según la ecuación siguiente:

$$P = \frac{HQ\gamma}{\eta} \quad [\text{Ec. 6.7}]$$



Donde:

H es la altura manométrica en metros de columna de agua.

Q es el caudal en metros por segundo.

γ es el peso específico del agua 9800 N/m^3 .

η es el rendimiento de la bomba, típicamente entre 0,75 y 0,85.

Tabla 6.6 Características del flujo de agua.

CARACTERÍSTICAS DEL AGUA AL FINALIZAR LA ETAPA 2	
Caudal red + rechazo de OI2 (m ³ /h)	9,6
Presión (bar)	3,97
pH	7,2
Conductividad (μS/cm)	432
SDI	< 2,4
Dureza (°f)	17,42
Cloro total (mg/l)	0,71

6.4. Descalcificación.

6.4.1. Justificación.

La dureza del agua, aun siendo baja, podría interferir en el funcionamiento normal de las etapas de ósmosis inversa, formando incrustaciones o reduciendo por concentración salina su rendimiento. Así pues se hace absolutamente necesaria una etapa que elimine o reduzca al mínimo la dureza del agua.

La dureza del agua se define como la cantidad de iones Ca^{+2} y Mg^{+2} presentes, pero existen otros muchos cationes que también son retenidos por las resinas de intercambio iónico aunque sólo sea de forma parcial.

6.4.2. Descripción.

Se utilizará un descalcificador tipo dúplex, el cual consiste en dos botellones rellenos con la resina de intercambio iónico, de igual capacidad, conectados y controlados por un cabezal electromecánico como el de la figura 6.4, de modo que siempre haya uno en servicio. El otro botellón estará preparado para entrar en funcionamiento cuando el primero haya agotado su capacidad de intercambio y necesite regenerar sus resinas.



Figura 6.4 Cabezal controlador de los dos botellones.



Figura 6.5 Sistema descalcificador de dos botellones con el depósito de salmuera.

La regeneración viene dada por el volumen de agua que ha atravesado el lecho de resinas ya que la dureza de una fuente de agua suele ser muy constante.



Para conseguir la descalcificación será necesaria una resina de intercambio iónico de ácido fuerte y regeneración por una solución concentrada de sal común.

6.4.3. Cálculos y dimensionamiento.

El agua debe haber sido tratada en una etapa anterior para evitar el ensuciamiento de las resinas por deposición de sólidos en suspensión, ya que de no ser así se reduciría la superficie de intercambio. Si el agua de aporte tiene grandes cantidades de hierro, éste debe ser estabilizado con polifosfatos o eliminado mediante su oxidación y posterior filtrado. De no ser así el Fe^{+3} quedaría adsorbido en las resinas reduciendo su capacidad.

La vida de las resinas podría acortarse si hubiese una presencia de niveles altos de cloro libre, en cuyo caso sería necesario reducirlo mediante la adición de un reductor, en este caso no sería práctico el uso del carbón activo ya que éste se iría ensuciendo y perdiendo efectividad rápidamente con la dureza del agua. Además la presencia de hierro en el agua agrava el problema en las resinas. Sin embargo no es nuestro caso ya que los lechos de resinas descalcificadoras pueden soportar 1 mg/l de cloro libre de forma continua durante 10 años.

El cálculo del lecho puede realizarse de manera práctica a partir de los datos del fabricante, lo cual es mucho más preciso que otro tipo de estimaciones basadas en modelos matemáticos generales. En este caso se va a tomar como referencia la resina DOWEX MARATHON C de la marca DOW CHEMICAL. Es una excelente resina para esta aplicación y sus características pueden verse en el anexo 10.4.

La solubilidad de NaCl es de 36 g/100 g de agua a 20°C, lo que implica una concentración de la disolución regenerante de 360 g/l suponiendo que

se hubiera alcanzado el equilibrio. Como no sé exactamente la concentración de la salmuera en el momento de su uso, adoptaré un factor de seguridad de 2, obteniendo una concentración teórica de 180 mg/l de sal. Haciendo uso de la figura 6.6, obtengo un valor para la capacidad efectiva de intercambio de la resina de unos 1,5 eq/l.

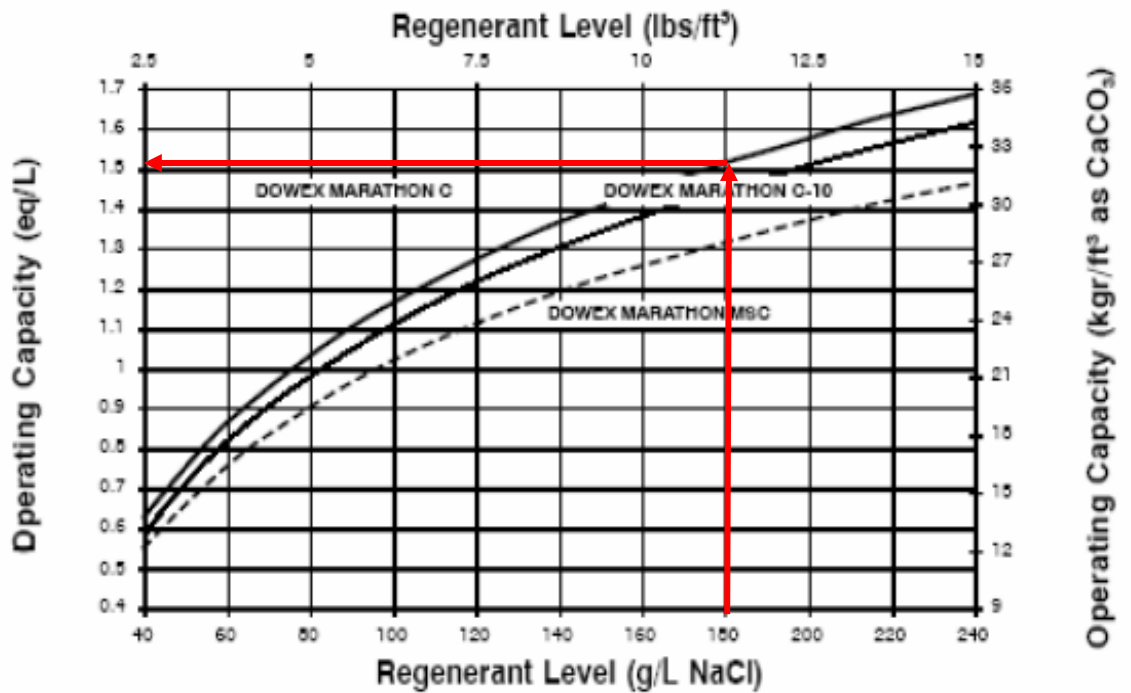


Figura 6.6 Capacidad efectiva de la resina de intercambio frente a la concentración de la solución regenerante.

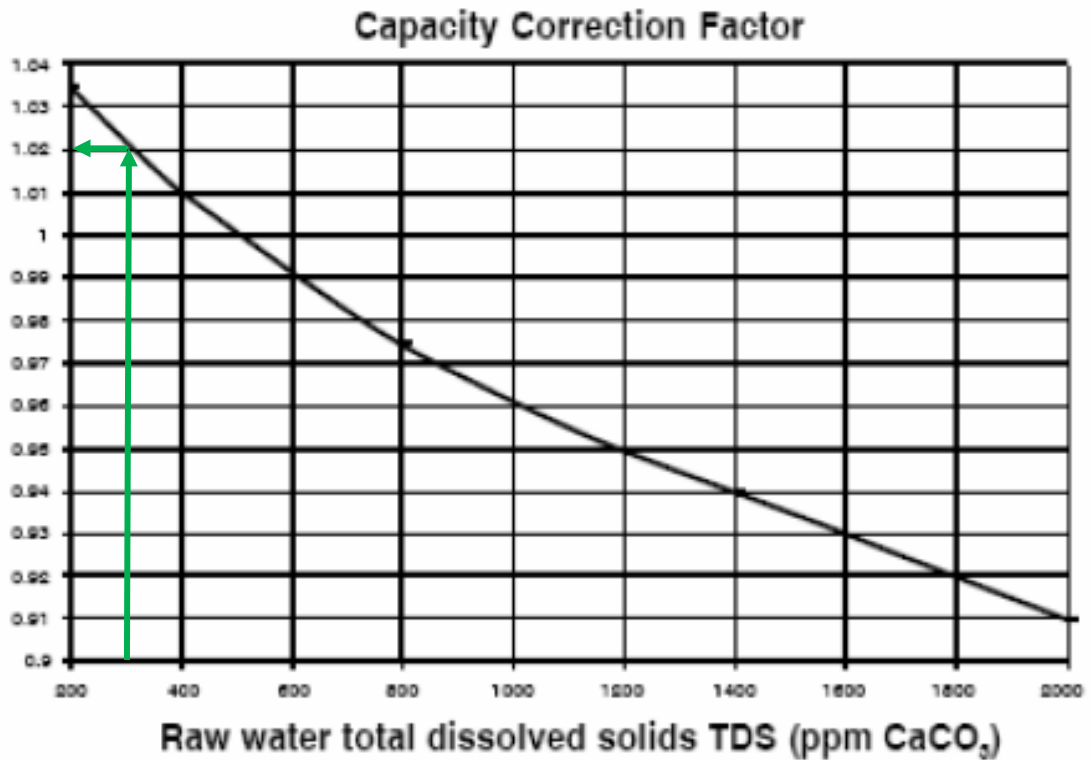


Figura 6.7 Factor de corrección en función del TDS del agua de entrada.

En el caso más desfavorable, por una avería que impidiese la realimentación a la planta con el rechazo de la segunda OI, los TDS del agua de red, aplicando la fórmula (5.1), pueden rondar los 350 mg/l. Por tanto el factor de corrección $f_{TDS}=1,02$.

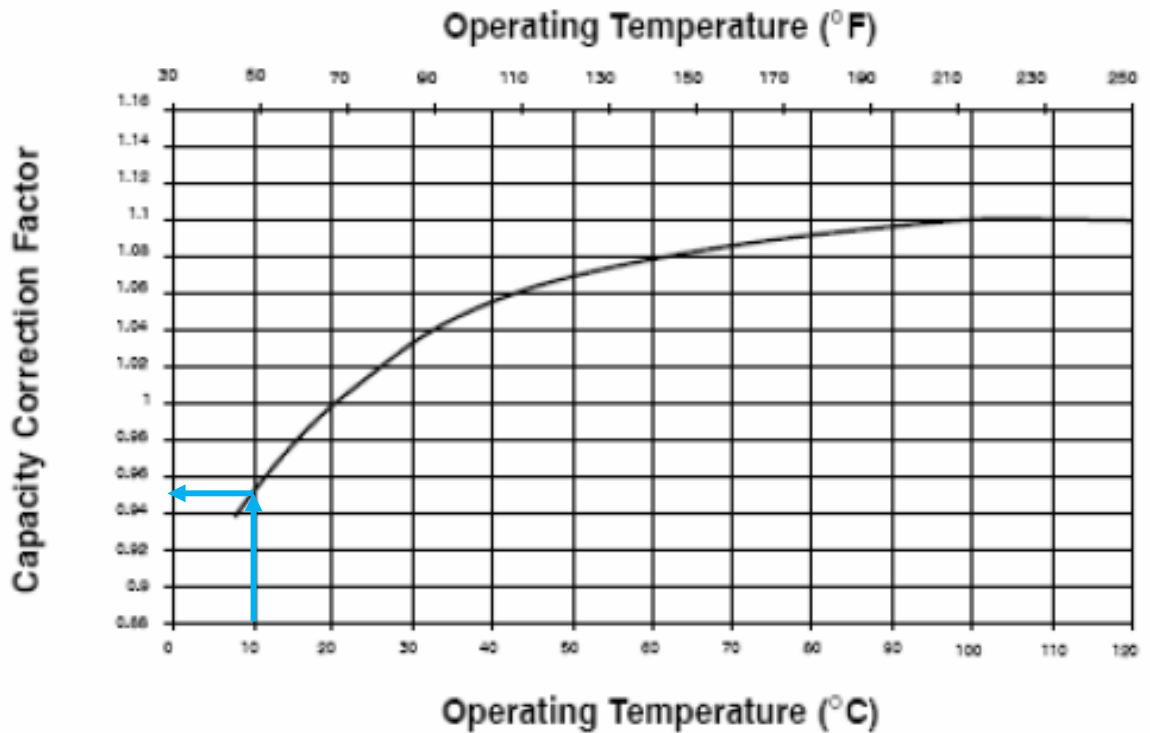


Figura 6.8 Factor de corrección en función de la temperatura del agua de entrada.

En el caso más desfavorable, en el invierno el agua podría llegar con 10 °C. Por tanto el factor de corrección es $f_c=0,95$.

El siguiente paso es considerar la influencia que tiene en el rendimiento de la resina, la relación de la concentración de sodio sobre la cantidad total de cationes disueltos en el agua. Para poder apoyarnos en la figura 6.9, primero habrá que calcular la concentración de los cationes más significativos presentes en el agua.

Tabla 6.7 Balance catiónico del agua de entrada.

BALANCE CATIONICO				
	Valor (mg/l)	Peso equivalente (mg/meq)	Normalidad (x 10 ⁻³)	Porcentaje %
Calcio	67,40	20	3,37	55,06



Magnesio	12,60	12,15	1,04	16,99
Sodio	30,74	23	1,34	21,90
Potasio	4,30	30,1	0,14	2,29
Bario	0,04	68,67	0,00	0,00
hierro	0,5	18,6	0,03	0,49
Aluminio	1,8	9	0,20	3,27
		TOTAL:	6,12	100

Capacity Correction Factor

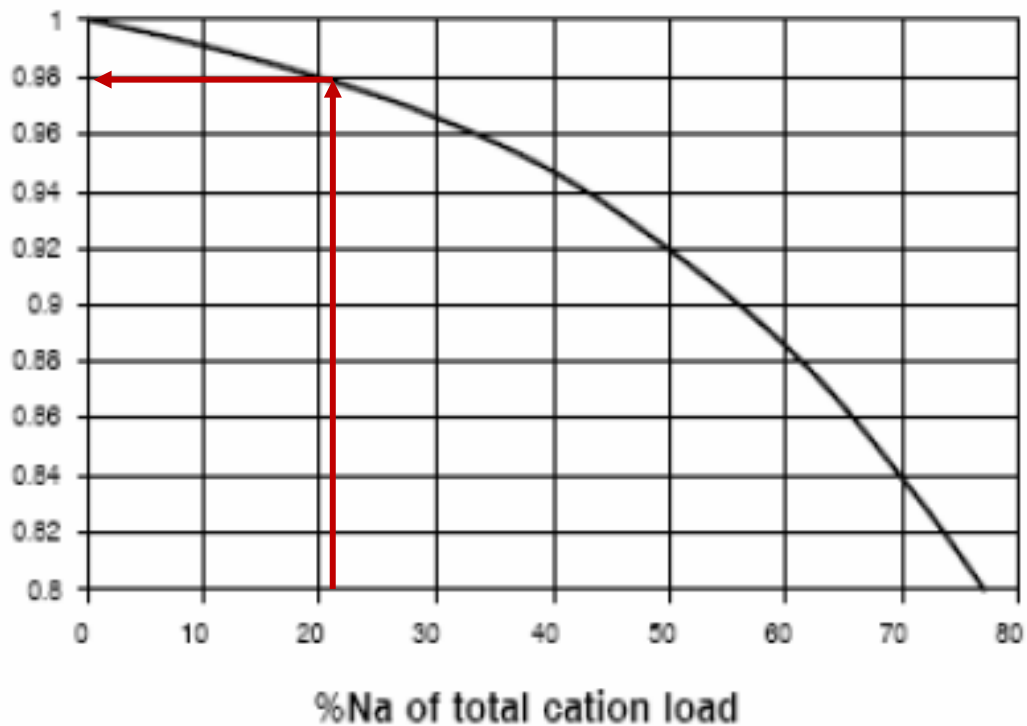


Figura 6.9 Factor de corrección en función del porcentaje de Na^+ sobre la cantidad total de cationes del agua de entrada.

Por tanto para un porcentaje de sodio del 21,9 %, el factor de corrección es $f_{\text{Na}^+}=0,98$.

Capacity Correction Factor

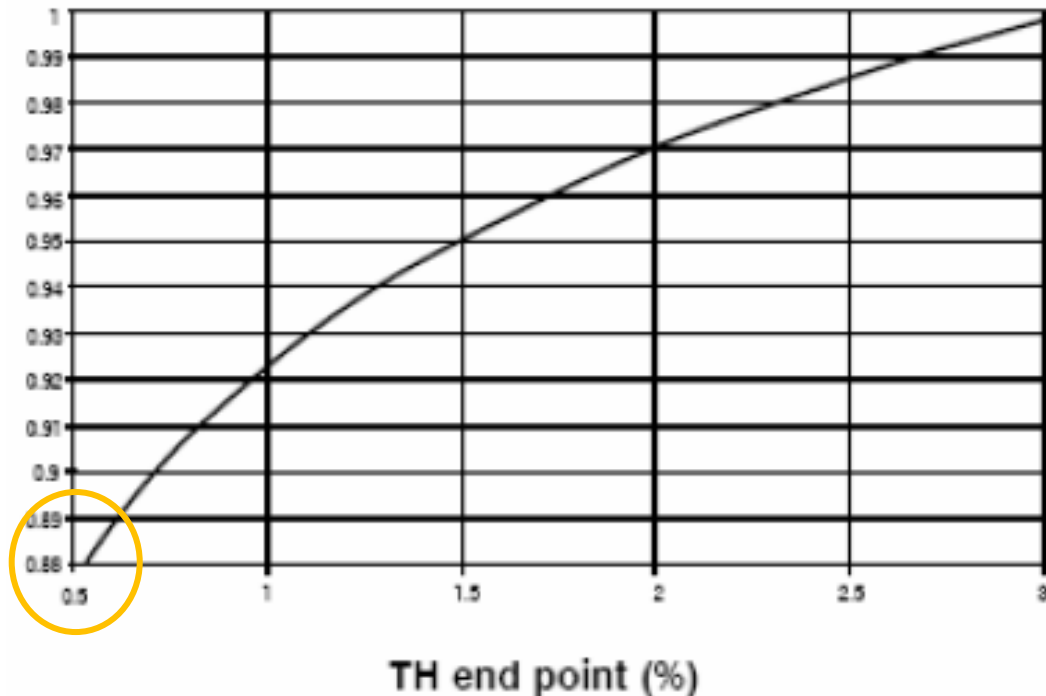


Figura 6.10 Factor de corrección en función del porcentaje de dureza a la salida del lecho.

Sólo se permitirá en el peor de los casos una dureza total final del 0,5%. Por tanto el factor de corrección es $f_{TH}=0,88$.

Finalmente tras aplicar la fórmula [Ec. 6.8] la capacidad efectiva corregida de intercambio de la resina calculada es de **1,25 eq/l**.

$$C_e \times f_{TDS} \times f_c \times f_{Na^+} \times f_{TH} = C_{er}. \text{ [Ec. 6.8]}$$

Donde:

C_e es la capacidad efectiva de la resina.

C_{er} es la capacidad efectiva corregida o real de la resina.

El volumen diario que va a tratar el intercambiador iónico de la planta es 125 m³/d. Fijando una regeneración al día de cada botellón, ya que es un equipo doble. Se pueden realizar los siguientes cálculos:

El agua tiene una dureza de 220,72 mg/l como CaCO_3 , que traducido a normalidad son 4,41 meq/l. Entonces la cantidad de dureza a retirar diariamente será de 551.250 meq/d. Dividiendo ahora esta cantidad por la capacidad efectiva corregida de las resinas se obtiene 441 litros, los cuales habrá que dividir a partes iguales en cada botellón. Por tanto en cada botellón habrá 221 litros de resina.

El fabricante recomienda una profundidad del lecho mínima de 0,75 m y un caudal específico comprendido entre 5 y 50 m/h ($\text{m}^3/\text{m}^2 \text{ h}$). Fijo un valor intermedio que optimice la cantidad de resinas, de 45 m/h.

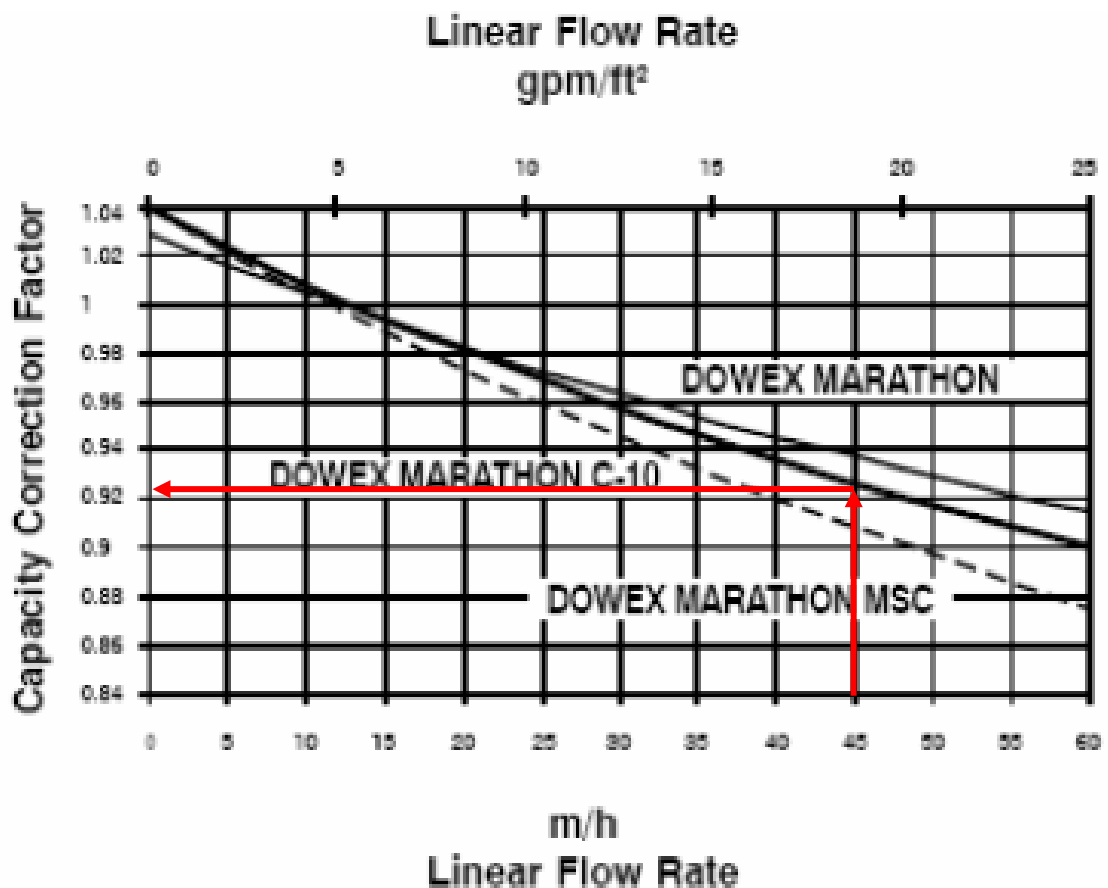


Figura 6.11 Factor de corrección en función del caudal específico que atraviesa el botellón.



En el diagrama de la figura 6.11, una vez introducido el caudal específico vemos que habría que aplicar otro coeficiente de corrección a la capacidad de intercambio de las resinas de 0,93. Por tanto el nuevo volumen de cada botellón será **238 l**.

El área transversal al flujo en cada recipiente será de 0,21 m², lo cual implica un diámetro de 0,52 m. Con este diámetro y el volumen de resinas se obtiene una altura del lecho final de **1,13 m**.

Por último, el fabricante nos proporciona un gráfico para calcular la pérdida de carga que experimenta el flujo de agua al atravesar el lecho en la figura 6.12. Si la temperatura del agua es distinta de 20 °C, debe hacerse una corrección según la fórmula [6.9].

$$\Delta P = \Delta P_{20^{\circ}\text{C}} / (0,026 \times T + 0,48) \text{ [Ec. 6.9]}$$

Donde:

ΔP es la pérdida de carga en bar/m.

$\Delta P_{20^{\circ}\text{C}}$ es la pérdida de carga hallada en la figura 6.12 en bar/m.

T es la temperatura en grados Celsius.

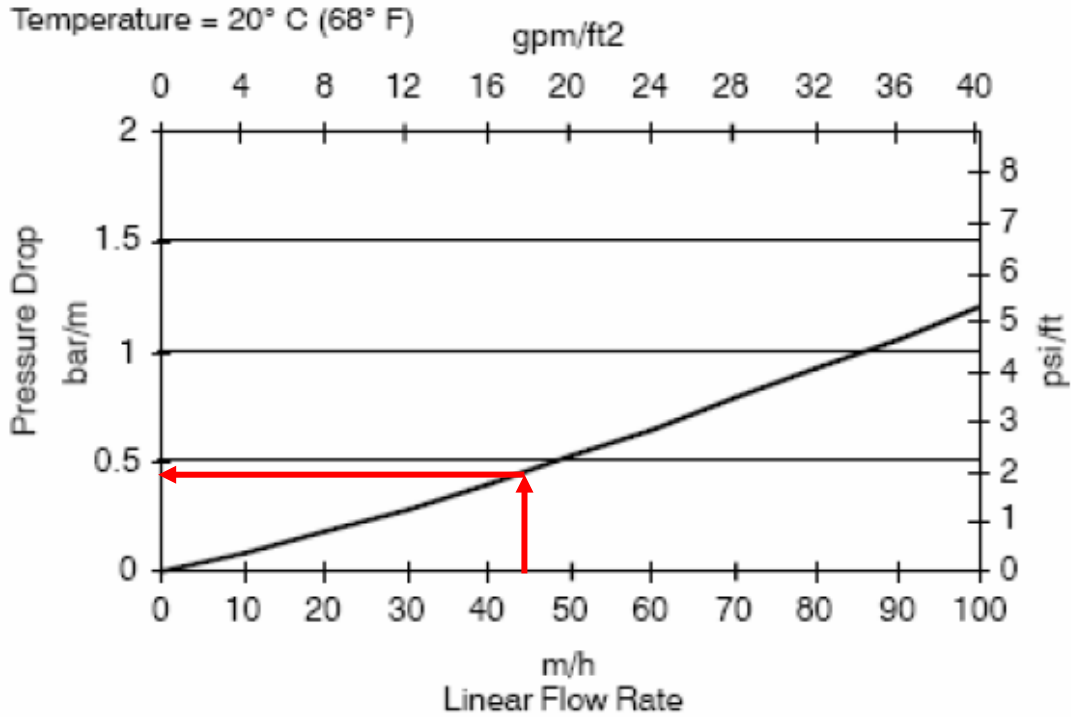


Figura 6.12 Pérdida de carga en el lecho de intercambio iónico.

La pérdida de carga para los 45 m/h será casi de 0,5 bar/m a 20 °C, y en el caso más desfavorable de 10 °C se traduce en 0,68 bar/m. Por tanto en nuestro lecho se producirá una caída de presión de $\Delta P_2 = 0,77$ bar.

Finalmente al lecho durante el proceso de regeneración se le somete a un lavado en contracorriente para expandirlo y eliminar la suciedad que hubiera podido quedar atrapada entre las resinas. De nuevo el fabricante nos proporciona un diagrama para su cálculo práctico en la figura 6.13.

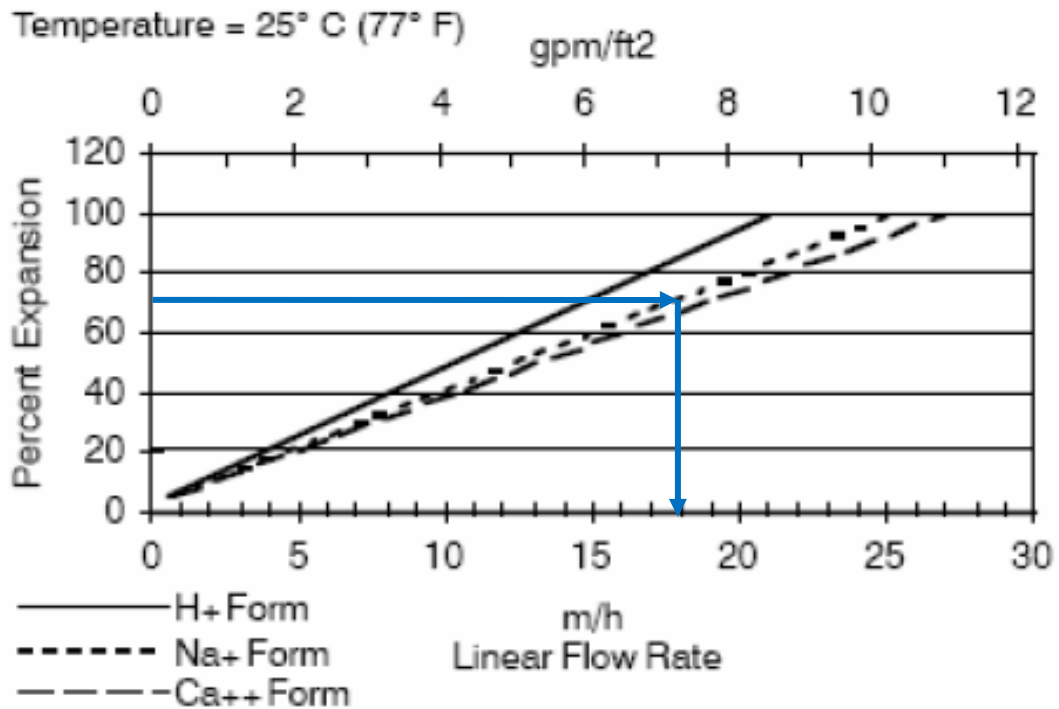


Figura 6.13 Porcentaje de expansión del lecho de intercambio iónico en función del caudal específico de lavado a contracorriente.

La velocidad de lavado en contracorriente máxima según anexo 10.4 es de 24 m/h, y se recomienda una expansión de entre el 60 al 80% del volumen del lecho. Elijo un valor del 70% para la expansión, el cual se consigue con caudal específico de lavado de unos 18 m/h, y el volumen de cada botella deberá ser de **0,41 m³**.

La conductividad en esta etapa no varía ya que durante el proceso de descalcificación se intercambia el mismo número de cargas eléctricas entre los cationes Ca⁺² y Na⁺.

Tabla 6.8 Características del flujo de agua.

CARACTERÍSTICAS DEL AGUA AL FINALIZAR LA ETAPA 3	
Caudal (m ³ /h)	9,6
Presión (bar)	2,87



pH	7.2
Conductividad ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	403
SDI	< 2,4
Dureza ($^{\circ}\text{f}$)	0
Cloro total (mg/l)	0,72

6.5. Decloración en lecho CAG.

6.5.1. Justificación.

En esta etapa se van a eliminar una gran cantidad de sustancias químicas presentes en el agua en concentraciones normalmente bajas. En particular se eliminarán los agentes oxidantes, que pueden dañar las membranas de OI, principalmente el cloro libre residual usado en los procesos habituales de desinfección, por tanto esta etapa debe situarse justo antes de la ósmosis inversa. En esta etapa también se eliminan las cloraminas, que aunque las membranas de OI presentan una mayor resistencia a su degradación, sin embargo, las cloraminas son capaces de atravesarlas, por tanto es una etapa muy importante ya que es la única que las elimina.

Para conseguir el objetivo mencionado, existen varios métodos (ver apartado 3.1.4.), aunque dos son los más usados; la inyección en continuo de un reductor o usar un lecho fijo de carbón activo. Para el objetivo de conseguir un agua suficientemente pura para ser usada en diálisis, claramente la segunda opción es más ventajosa por los siguientes motivos:

- La adición de un reductor no elimina sustancias del agua, sólo las reduce a otras especies químicas que luego deben ser retiradas en la ósmosis inversa.



- El reductor debe ser vigilado constantemente para asegurar un correcto dosificado, pudiendo causar si no se controla bien el ensuciamiento de las membranas.
- El carbón activo correctamente dimensionado no sólo elimina **el cloro libre y cloraminas** para proteger a las membranas de ósmosis de su poder oxidante, también evita que lleguen al paciente, ya que las cloraminas pueden atravesar las membranas de ósmosis.
- El carbón activo elimina también una **multitud de compuestos químicos** orgánicos como por ejemplo el cloroformo, presentes en el agua en niveles muy bajos, pero con reconocida acción carcinogénica y mutagénica, agravada por el efecto acumulativo en el cuerpo de los pacientes dializados.

6.5.2. Doble lecho CAG en serie.

Para garantizar en todo momento la ausencia de cloraminas, pero también de los pesticidas y subproductos de la desinfección, se deben usar dos lechos fijos de carbón activo contenidos en unos botellones, dispuestos en serie, pero de manera que mediante las conducciones y válvulas correspondientes se puedan alternar en el orden en el que reciben el agua. Los controles del nivel de cloro y cloraminas se realizarán entre ambos botellones de forma que cuando se alcance el nivel de seguridad se desechará el carbón del primero, se pasará a funcionar con el segundo, con lo que se convertirá en el primero y en el otro botellón se repondrá carbón activo regenerado y pasará a ocupar el segundo lugar. Esto permitirá tener la máxima seguridad en cuanto a los mencionados contaminantes. Este sistema de doble lecho de carbón activo en serie es obligatorio en los centros de hemodiálisis de California, no así en España.

Por otro lado mediante un sistema electromecánico simple durante el proceso de lavado, se enviará una señal a la primera OI, para que se detenga si estuviese funcionando. Los lavados se programan en horario nocturno

cuando no hay pacientes dializándose. Si se diese el caso de hacer una diálisis de urgencia, podría llevarse a cabo sólo con el agua acumulada y la segunda OI.

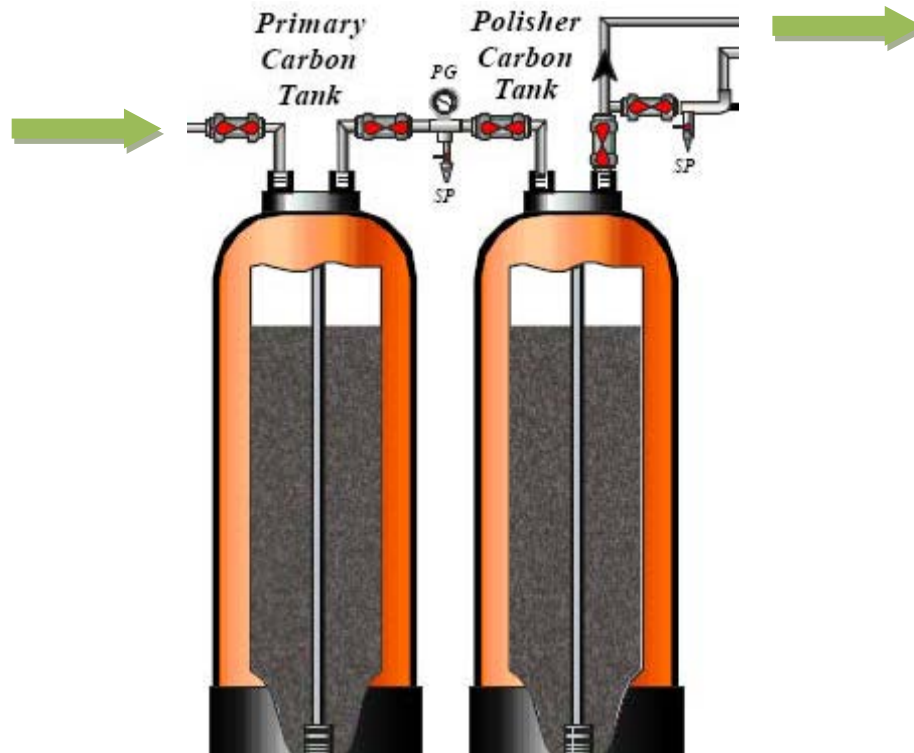


Figura 6.14 Doble lecho de CAG en serie.

6.5.3. Cálculo y dimensionamiento de la etapa.

A la hora de dimensionar correctamente un lecho de CAG, primeramente habrá que conocer el tipo de desinfección que se lleva a cabo en la ETAP del municipio donde se va a instalar la planta de producción de agua para diálisis. Si se usa cloro libre, habrá poca concentración de cloraminas, pero quizás, una presencia significativa de THM. Por el contrario, si la compañía utiliza la monocloramina como agente desinfectante, el cloro libre y los THM podrían ser despreciables a la hora de dimensionar el lecho de CAG.



En este caso vamos a suponer que sabemos que la desinfección en la ETAP se realiza mediante cloro libre y en el análisis de agua de referencia según la tabla 5.3, vemos que no hay presencia significativa de cloraminas. Por tanto el lecho GAC tiene que primeramente dimensionarse para eliminar el cloro libre del agua. Por otro lado, es de esperar una presencia notable de THA y quizás de HAA, aunque no tenemos datos.

A continuación se indican los valores máximos para cada tipo de sustancia según la normativa vigente. Estos valores límite deben ser considerados como la concentración de entrada del agua en el lecho de carbón activo a efectos de su diseño. Para cada tipo de sustancia fijaré de modo arbitrario una concentración máxima admisible a la salida del lecho CAG, de un 5% del valor límite anterior, es decir este valor será el punto de ruptura del lecho.

Cloro libre: El agua de consumo humano, según el RD 865/2003, en el caso de que se use cloro para desinfectar, debe mantener una concentración de cloro libre residual de entre 0,2 a 1 mg/l. Por tanto hay que dimensionar la capacidad del carbón activo para tratar agua, en el peor de los casos para 1 mg/l de cloro libre residual.

Cloraminas: Para el cloro combinado residual, el RD 140/2003 establece un límite máximo de 2 mg/l. Así la cantidad de cloraminas que nos podemos encontrar en un agua de consumo humano, será como máximo de 2 mg/l.

Carbono orgánico total: En las fuentes de agua, el COT procede de la materia orgánica natural (MON) en descomposición y de compuestos químicos sintéticos. El ácido húmico, ácido fúlvico, aminas, y urea son algunos tipos de materia orgánica natural.

Para el COT no existe ningún límite, siendo además un parámetro muy variable para cada fuente de abastecimiento primaria de la red pública,

incluso dentro de cada abastecimiento es frecuente una cierta variación estacional. Por tanto será un parámetro muy a tener en cuenta en el diseño de un lecho de GAC. En el presente trabajo, para hacer los cálculos tomaré un valor máximo de referencia de 2 mg/l.

Trihalometanos: Para los trihalometanos totales, según el RD 140 2003, como suma de bromodichlorometano, bromoformo, cloroformo y dibromoclorometano $\leq 100 \mu\text{g/l}$.

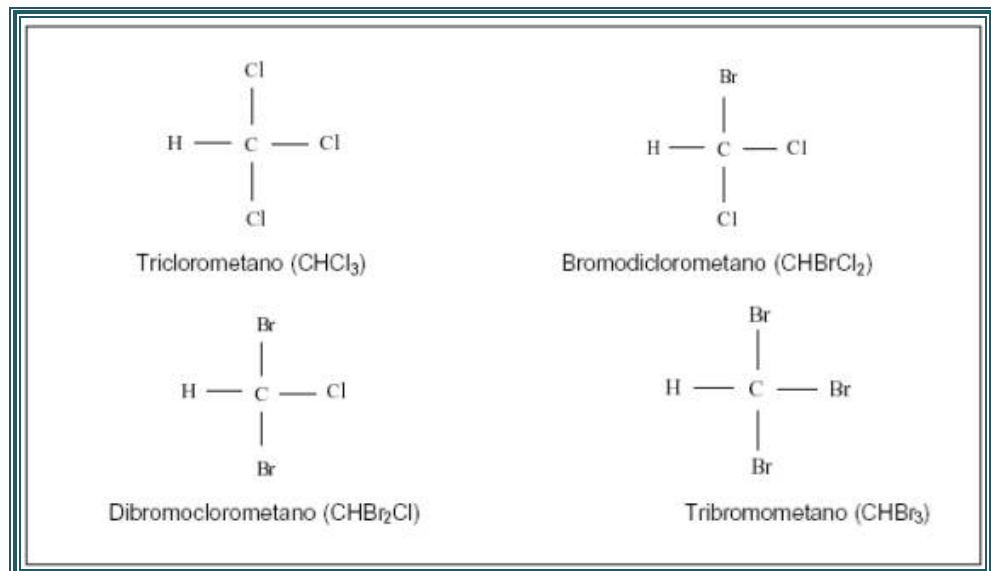


Figura 6.15 Trihalometanos más frecuentes.

Ácidos haloacéticos: Los haloácidos, representados por el ácido tricloroacético y dicloroacético para los que la OMS proporciona un valor guía de 200 y 50 $\mu\text{g/l}$ respectivamente.

Tabla 6.9 Concentraciones para dimensionar un lecho CAG.

SUSTANCIA O GRUPO	CONCENTRACIÓN ENTRADA (mg/l)	CONCENTRACIÓN DE RUPTURA (mg/l)
Cloro libre	1	0,05



Cloraminas	2	0,10
Materia orgánica natural	2 (no legislado)	0,10
Trihalometanos totales	0,1	0,005
Ácido tricloroacético	0,2	0,010
Ácido dicloroacético	0,05	0,0025

El lecho debe dimensionarse para retener una mezcla de componentes, en nuestro caso serán **cloro libre, MON, THM y HAA**.

Es lógico suponer que las sustancias anteriores no van a reaccionar entre sí, ya que al fin y al cabo, llegan tal cual en el agua a la entrada del lecho. Por otro lado, hay que tener en cuenta, que cada sustancia interaccionará con el lecho CAG de forma diferente. Primero para cada sustancia el lecho tendrá una capacidad de adsorción, pudiendo ser muy distintas entre sí, por otro lado la cinética de adsorción también será diferente. Todo lo anterior se traducirá en que el CAG mostrará un comportamiento selectivo para cada especie química, de tal manera que en la corriente de agua que lo atraviese, primero desaparecerá la sustancia más afín al CAG, a continuación la segunda y así continuaría el proceso siempre y cuando siga habiendo CAG.

El caudal a tratar es de **9,6 m³/h**. El caudal específico o velocidad lineal de flujo a través del lecho debe estar entre 1 y 30 m/h [3]. Por tanto el área transversal del lecho y su diámetro pueden ser calculados en este momento fijando un caudal específico de **25 m/h**, área transversal 0,384 m² y el **diámetro del lecho 0,7 m**.

Otra variable muy importante es el tiempo de contacto (EBCT en inglés) entre el flujo de agua y el lecho de CAG. Para la eliminación de cloro libre se requieren tiempos muy pequeños ya que es una reacción casi instantánea, pero para otras sustancias químicas esto no es así. Para la eliminación de cloraminas se han necesitado tiempos de hasta 30 minutos. El tiempo de



contacto en un lecho de CAG, en general puede oscilar entre 1 y 20 minutos [3]. El tiempo de contacto se define según la siguiente ecuación:

$$t_c = \frac{V}{Q} \text{ [Ec. 6.10]}$$

Donde:

t_c es el tiempo de contacto.

V es el volumen aparente del lecho.

Q es el caudal que lo atraviesa.

No tengo datos para los THM, etc.... Así que voy a fijar un tiempo de contacto mínimo de **3 minutos**. Esto implica un volumen del lecho de **0,48 m³**.

A partir de este dato la altura del lecho será de **1,25 m**, y la altura del recipiente que lo contiene de un 50% más para permitir su expansión durante el proceso de lavado en contracorriente, es decir **1,88 m**.

El tiempo de ruptura para el cloro libre se puede estimar a partir de la ecuación [4.12], para la cual, a su vez, es necesario estimar la capacidad de adsorción del CAG para sus condiciones específicas de operación, mediante las isothermas Freundlich. Como la reacción del cloro libre con el CAG, puede considerarse instantánea, la capacidad para retenerlo puede suponerse que es igual a la de equilibrio.

Para otras sustancias no se puede suponer que se haya alcanzado el equilibrio. Este problema puede resolverse multiplicando la capacidad de adsorción en el equilibrio de un CAG para un determinado compuesto químico, por un factor de eficacia que depende del tiempo de contacto. Desgraciadamente este factor sólo puede hallarse experimentalmente. Para poder ilustrar el procedimiento voy a hacer una estimación del factor de eficacia: Primeramente el tiempo máximo de contacto necesario para las



sustancias que estamos considerando son 30 minutos para las cloraminas, las demás requieren tiempos menores. Se ha fijado previamente un tiempo de contacto de 3 minutos en el lecho. Así que el factor podría ser de $F=0,1$ ($=3/30$).

Voy a tomar un valor para la densidad aparente del lecho de CAG, de 500 kg/m^3 . También fijo un tiempo para la regeneración del lecho de 730 días, dos años. Ambos valores son normales para este tipo de CAG.

Para el cloro libre se han tomado los datos de la isoterma de Freundlich de un carbón activo comercial no especificado [3], $K=2,244$ y $n=1,678$.

COLOR LIBRE			
Parámetros funcionamiento			
Q (m^3/h)=	9,6		
horas funcionamiento diarias =	13		
Factor de eficacia=	1		
tiempo regeneración (d)=	730		
Características del GAC			
Densidad (g/l)	500		
Volumen (l)	480		
Constantes de Freundlich para el cloro libre		Resultados	
K ((mg/g)/(mg/l) ^{1/n})=	7,38	Y ₀ (mg/g)=	7,0659
1/n =	0,8479	Y _b (mg/g)=	7,0659
Concentraciones diseño		t _b (días)=	13936,7
C ₀ (mg/l)=	1		
C _b (mg/l)=	0,05	% Utilizado =	5,2

Para la materia orgánica natural se han tomado los datos de la isoterma de Freundlich de un carbón activo comercial [3], $K=22.47$ y $1/n=0.774$.

MON	
Parámetros funcionamiento	
Q (m^3/h)=	9,6
horas funcionamiento diarias =	13
Factor de eficacia=	0,1



tiempo regeneración (d)=	730		
Características del GAC			
Densidad (g/l)	500		
Volumen (l)	480		
		Resultados	
Constantes de Freundlich para la MON		Y_0 (mg/g)=	36,9282
$K ((\text{mg/g})/(\text{mg/l})^{1/n})=$	22,47	Y_b (mg/g)=	3,6928
$1/n =$	0,774	t_b (días)=	3641,8
Concentraciones diseño			
C_0 (mg/l)=	2	% Utilizado =	20,0
C_b (mg/l)=	0,1		

En el caso de los trihalometanos, se elige el cloroformo (CHCl_3) como especie representativa por ser el THM más común en aguas cloradas. Se han tomado los datos de la isoterma de Freundlich de un carbón activo comercial [3], $K=2,6$ y $1/n=0,73$.

TRIHALOMETANOS			
Parámetros funcionamiento			
Q (m^3/h)=	9,6		
horas funcionamiento diarias =	13		
Factor de eficacia=	0,1		
tiempo regeneración (d)=	730		
Características del GAC			
Densidad (g/l)	500		
Volumen (l)	480		
		Resultados	
Constantes de Freundlich para el cloroformo		Y_0 (mg/g)=	0,4663
$K ((\text{mg/g})/(\text{mg/l})^{1/n})=$	2,6	Y_b (mg/g)=	0,0466
$1/n =$	0,73	t_b (días)=	919,8
Concentraciones diseño			
C_0 (mg/l)=	0,1	% Utilizado =	79,4
C_b (mg/l)=	0,005		



Para los ácidos haloacéticos, al haber dos sustancias reguladas hay que hacer el estudio para cada una de ellas. Los datos de la isoterma de Freundlich de un carbón activo comercial no especificado [17], para el ácido tricloroacético $K=166,53$ y $1/n=0,422$ y para el ácido dicloroacético $K=30,14$ y $1/n=0,527$.

ÁCIDO TRICLOROACÉTICO			
Parámetros funcionamiento			
Q (m ³ /h)=	9,6		
horas funcionamiento diarias =	13		
Factor de eficacia=	0,1		
tiempo regeneración (d)=	1095		
Características del GAC			
Densidad (g/l)	500		
Volumen (l)	480		
		Resultados	
Constantes de Freundlich para el A. tricloroacético		Y ₀ (mg/g)=	82,6279
K ((mg/g)/(mg/l) ^{1/n})=	166,53	Y _b (mg/g)=	8,2628
1/n =	0,422		
Concentraciones diseño		t _b (días)=	81487,0
C ₀ (mg/l)=	0,2		
C _b (mg/l)=	0,01	% Utilizado =	1,3

ÁCIDO DIICLOROACÉTICO			
Parámetros funcionamiento			
Q (m ³ /h)=	9,6		
horas funcionamiento diarias =	13		
Factor de eficacia=	0,1		
tiempo regeneración (d)=	730		
Características del GAC			
Densidad (g/l)	500		
Volumen (l)	480		
		Resultados	
Constantes de Freundlich para el A. dicloroacético		Y ₀ (mg/g)=	6,0501
K ((mg/g)/(mg/l) ^{1/n})=	30,14	Y _b (mg/g)=	0,6050
1/n =	0,527		



Concentraciones diseño		t_b (días)=	23866,2
C_0 (mg/l)=	0,05		
C_b (mg/l)=	0,0025	% Utilizado =	3,1

Y_0 es la capacidad de adsorción del CAG para una determinada sustancia cuando se ha alcanzado el equilibrio.

Y_b es la capacidad de adsorción del CAG para una determinada sustancia en las condiciones de operación del lecho, en este caso como ya se ha explicado anteriormente obedece a la ecuación:

$$Y_b = F Y_0 \text{ [Ec. 6.11]}$$

Donde F es el factor de eficacia.

t_b es el tiempo de ruptura calculado según [4.12]

% Utilizado es el porcentaje del lecho agotado por una determinada sustancia al cabo del tiempo de regeneración.

Como se puede comprobar son datos muy dispares, parece que la sustancia que tiene peor comportamiento es el cloroformo, aunque hay que recordar que en realidad está representando a cuatro sustancias distintas. Por otro lado los valores para las isothermas de Freundlich no se han hallado para el mismo tipo de carbón activo, ni seguramente para el resto de condiciones experimentales y muy especialmente la temperatura.

De modo que, teniendo en cuenta las limitaciones mencionadas, si sumamos los porcentajes de lecho agotado para cada sustancia tenemos 109 %, es decir necesitaríamos un 9 % más de CA para poder purificar el agua durante dos años. Por tanto el lecho debe contener **0.524 m³** de CAG. Esto implica una altura del lecho de **1,37 m** y unas dimensiones para cada botellón de $D = 0,7 \text{ m}^2$ y $L = 2 \text{ m}$.

Para calcular las pérdidas de carga me voy a basar en el diagrama que para ello nos ofrece la compañía CALGON, de su producto CAG CENTAUR 12x40 sus características principales pueden consultarse en el anexo 10.4.

La velocidad lineal de flujo a través del lecho era de $25 \text{ m/h} = 0,695 \text{ cm/s}$. Introduciendo este dato en el diagrama de la figura 6.16, vemos que nos salimos fuera de la gráfica, pero esto no es un problema ya que al ser la relación lineal podemos estimar la pérdida de carga para nuestras condiciones de operación, sólo tenemos que conocer dos puntos de la gráfica.

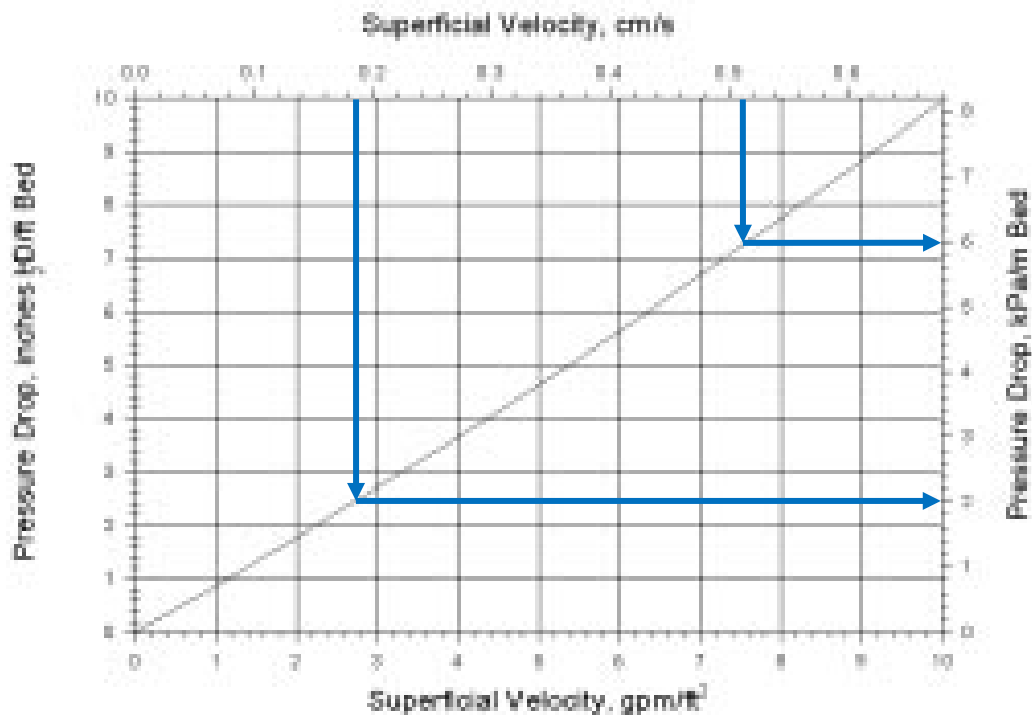


Figura 6.16 Pérdida de carga en lecho CAG CENTAUR 12x40.

Los puntos hallados son $(0,19 \text{ cm/s}, 2 \text{ kPa/m})$ y $(0,51 \text{ cm/s}, 6 \text{ kPa/m})$ entonces la pendiente de la recta es $m=4/0,32=12,5$, la intersección con el eje de ordenadas evidentemente es cero. Por tanto la pérdida de carga para otras velocidades lineales de flujo responde a la ecuación [6.12]

$$\Delta p = 12,5v_0 \text{ [Ec. 6.12]}$$

Donde:

Δp es la pérdida de carga específica en kPa/m.

v_0 es la velocidad lineal de flujo o caudal específico en cm/s.

Finalmente $\Delta p = 8,69$ kPa/m, ahora sólo falta multiplicar este valor por la longitud del lecho CAG, obteniendo una pérdida de carga total de 11,91 kPa, o lo que es lo mismo 0,12 bar en cada lecho de CAG. Pero en la etapa hay dos, por tanto $\Delta P_3 = 0.24$ bar.

Tabla 6.10 Características del flujo de agua.

CARACTERÍSTICAS DEL AGUA AL FINALIZAR LA ETAPA 4	
Caudal (m ³ /h)	9,6
Presión (bar)	2,05
pH	7,2
Conductividad (µS/cm)	403
SDI	< 2,4
Dureza (°f)	0
Cloro total (mg/l)	0

6.6. Doble ósmosis inversa con acumulación intermedia.

6.6.1. Justificación.

Esta etapa consta de una primera ósmosis inversa, cuya producción se recogerá en unos depósitos de acumulación, y desde los cuales se alimentará a otra segunda ósmosis inversa que producirá un agua con una gran calidad, que abastecerá en continuo las necesidades del anillo de distribución.

Mediante un sistema de dos OI en serie, donde cada OI es capaz de trabajar autónomamente con su sistema de bombeo, se consiguen varias ventajas, aunque el coste de inversión en un primer momento sea mayor:

- Se consigue un agua de mayor calidad ya que en cada OI se eliminan del 90 al 99% de sales disueltas.
- El rechazo de la segunda OI se realimenta a la entrada de la planta con lo que se diluye el agua de aporte y mejoran las condiciones de funcionamiento de todos los equipos en general, además de esta manera no aumenta el consumo de agua, a pesar de tener dos equipos de OI.
- En caso de fallo de una de las OI se puede continuar funcionando con la otra, produciendo un agua de calidad suficiente para continuar con la hemodiálisis hasta que se termine la sesión.
- La segunda OI permite tener una acumulación de agua en la planta con una calidad excelente, en previsión de una avería que afectase a las dos OI. Si sólo tuviésemos una OI, no podríamos tener una acumulación a continuación de ésta por el alto riesgo de recontaminación del agua.

6.6.2. Ecuaciones y balances másicos de la etapa.

Una ecuación muy importante que debe cumplirse en todo momento es el balance másico de la OI [6.13].

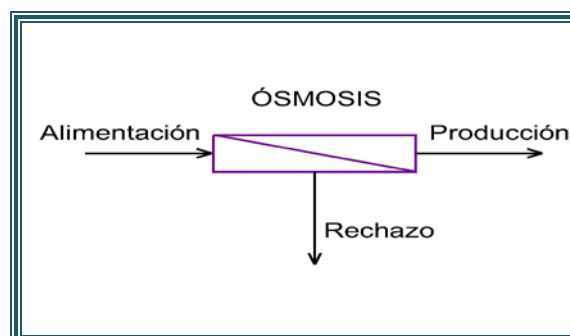


Figura 6.17 Caudales en una OI.

$$Q_{a1} = Q_{r1} + Q_1 \text{ [Ec. 6.13]}$$

Donde:

Q_{a1} es el caudal de alimentación a la OI.

Q_1 es el caudal de permeado o producción.

Q_{r1} es el caudal de rechazo.

El rechazo de la primera OI, es el único flujo de toda la planta, salvo los caudales de lavado de los equipos de las etapas previas, que arrastra las impurezas concentradas que llevaba el agua, y se vierte al desagüe. Recordemos que el rechazo de la segunda OI, se realimenta al comienzo de la planta, por tanto:

$$Q_N = Q_{r2} + Q_E \text{ [Ec. 6.14]}$$

Donde:

Q_N es el caudal de alimentación a la OI, y por tanto a la planta.

Q_{r2} es el caudal de rechazo de la segunda OI.

Q_E es el caudal de aporte desde la red de agua potable.

Otra condición que deben cumplir los caudales de las OI es que la producción de agua de la primera OI debe ser suficiente para cubrir el suministro de la segunda, es decir el caudal de producción de la primera OI debe ser mayor o igual al caudal de permeado y rechazo de la segunda ósmosis.

$$Q_1 \geq Q_{r2} + Q_2 \text{ [Ec. 6.15]}$$

Por otro lado el caudal producido por la segunda OI se distribuirá a través del anillo a cada puesto de hemodiálisis. Sin embargo no todo el caudal es consumido y parte se retornará a la acumulación intermedia:

$$Q_2 - Q_u = Q_s \text{ [Ec. 6.16]}$$



$Q_u = 1 \text{ m}^3/\text{h}$, es el caudal punta útil de la planta, lo que se consume en los puestos con todos los pacientes conectados.

Q_s es el caudal que sobra en el anillo de distribución.

6.6.3. Primera ósmosis Inversa.

Como seguridad de la OI, delante de ella se instalarán unos filtros de cartucho de polipropileno. Estarán dispuestos en serie de mayor a menor tamaño de poro, es decir el primero será de $20 \mu\text{m}$, el segundo de $10 \mu\text{m}$, el tercero de $5 \mu\text{m}$ y el último de $1 \mu\text{m}$. Su longitud la elegiré de 1016 mm , esto implica una superficie de algo más de cuatro veces la del filtro de 25 cm , estándar para tener un bajo caudal específico y una mejor calidad del filtrado. Así pues entrando en la gráfica de la figura 6.18, con la cuarta parte del caudal $2,4 \text{ m}^3/\text{h}$, se obtiene unas pérdidas de carga respectivamente de 0.05 , 0.06 , 0.06 y 0.08 bar . En total $\Delta p_4 = 0.25 \text{ bar}$.

En este punto hay que comprobar que la presión a la entrada de la OI sea mayor de $0,5 \text{ bar}$. $P = 1,72 > 0,5 \text{ bar}$.

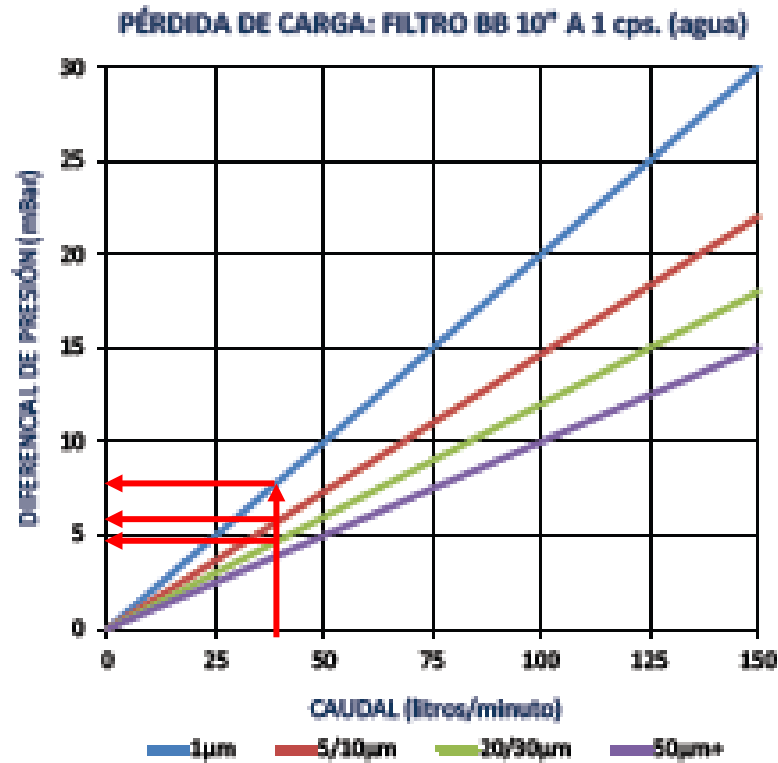


Figura 6.18 Diagrama de pérdidas de carga en cartuchos GESFILTER.

La OI producirá agua para abastecer la acumulación intermedia, por tanto funcionará controlada por un nivel en los depósitos de acumulación, esto implica que habrá momentos en los que permanecerá parada en tanto no se alcance la posición de llenado. Esta forma de trabajar induce una primera ecuación de funcionamiento en [6.17], en la cual he fijado 1 m³ como volumen de accionamiento del nivel.

$$Q_1 \times t_p = 1 + (Q_{a2} - Q_s) \times t_p \quad [\text{Ec. 6.17}]$$

Pero al cumplirse las ecuaciones [6.16] y [6.13] la expresión finalmente queda como:

$$Q_1 \times t_p = 1 + (Q_{r2} + Q_u) \times t_p \quad [\text{Ec. 6.18}]$$

Donde:



Q_1 es el caudal de permeado de la primera OI.

Q_2 es el caudal de permeado de la segunda OI.

Q_{a2} es el caudal de alimentación a la segunda OI.

Q_{r2} es el caudal de rechazo de la segunda OI.

Q_s es el caudal sobrante del anillo de distribución.

Q_u es el caudal punta útil de la planta = 1 m³/h.

t_p es el tiempo de parada.

Fijando el tiempo de parada en 30 minutos se obtiene que:

$$Q_1 = 3 + Q_{r2} \text{ (m}^3\text{/h) [Ec. 6.19]}$$

Para dimensionar esta OI he elegido la membrana RO-390-FF de DOW CHEMICAL, cuyas características pueden verse en el anexo 10.6. Este modelo de MOI está diseñado precisamente para su uso en la industria farmacéutica, hospitales y en general donde se requiera un agua ultrapura de gran calidad. Es una MOI de poliamida para no favorecer la proliferación de bacterias, y de configuración en espiral para facilitar su autolimpieza.

A la hora de calcular un sistema de OI actualmente, no tiene sentido hacerlo sin un programa informático, dada la complejidad de los cálculos. Por otro lado, el fabricante es el más interesado en que su programa de cálculo estime lo más fielmente posible el comportamiento futuro de una OI, por razones obvias para su propio negocio.

Existen numerosos fabricantes de MOI y prácticamente todos tienen un programa de cálculo para sus membranas. He elegido el programa ROSA de la compañía DOW CHEMICAL ya que es de acceso libre y existe mucha información sobre las características de sus MOI.

Como datos al programa ROSA, primeramente hay que elegir el tipo de agua que se va a tratar.

Dentro de las opciones que ofrece el programa la más parecida es Surface Supply $SDI < 5$, es decir, agua superficial con un SDI menor que cinco.

A continuación se introducen los datos del análisis químico, los cuales pueden verse en la tabla 6.14 como entrada en la segunda columna. Pero hay que tener en cuenta que la dureza del agua, es decir, la cantidad de iones Ca^{+2} y Mg^{+2} ha sido eliminada en la etapa de descalcificación y sustituida por Na^{+} , por tanto en lugar del calcio y magnesio se tendrá sodio, el cual contribuirá al cálculo de presión osmótica.

Tabla 6.11 Balance catiónico en la descalcificación.

	Concentración (mg/l)	Peso equivalente (mg/meq)	Concentración (meq/l)
[Ca^{++}]	67,40	20,04	3,36
[Mg^{++}]	12,60	12,15	1,04
[Na^{+}]	30,74	22,99	1,34
		Total [Na^{+}] =	5,74

Entonces la concentración de sodio en el flujo de entrada a a la primera OI es de [Na^{+}] = 5,74 meq/l, lo cual a su vez se corresponde con una concentración de 131,90 mg/l.

Se fija un 50% como valor para la conversión de la primera OI, lo cual es un valor habitual en este tipo de instalaciones.

Como el valor del permeado viene dado por la fórmula [6.19], sé que tiene que ser mayor de 4 m³/h (como en la segunda OI la conversión será también del 50%, el caudal será mayor de 1 m³/h que es el caudal punta útil de la planta). Así pues, elijo una configuración habitual en este tipo de instalaciones y voy probando con caudales de permeado mayores que 4 m³/h, hasta que el programa ofrece una presión y caudal en la entrada normales. En este caso la configuración consiste en cuatro recipientes de



presión con dos membranas cada uno y conectados en serie por el rechazo. Si el programa no da ningún aviso por exceso o defecto de algún parámetro podremos dar por buena la elección de las membranas y la configuración de la OI. Por último el programa genera unas tablas con los datos que pueden verse a continuación.

Tabla 6.12. Datos generales de la primera OI obtenidos del programa ROSA.

Feed Flow to Stage 1	9.60	m ³ /h	Pass 1 Permeate Flow	4.80	m ³ /h
Raw Water Flow to System	9.60	m ³ /h	Pass 1 Recovery	50.00	%
Feed Pressure	11.90	bar	Feed Temperature	10.0	C
Flow Factor	0.85		Feed TDS	464.5	mg/l
Chem. Dose	None		Number of Elements	2	
Total Active Area	289.85	M ²	Average Pass 1 Flux	16.56	lm ² /h
Water Classification: Surface Supply SDI < 5			Average NDP	9.76	bar
			Power	3.97	kW
			Specific Energy	0.83	kWh/m ³

Primeramente hay que saber que “Stage” (etapa), se refiere al primer módulo de presión de los cuatro en serie de que consta la OI, cada uno de los cuales con dos MOI en su interior dispuestas como en la figura 4.28. La palabra “Pass” se refiere a la OI completa. Finalmente “Elements” hace referencia a las unidades de MOI.

En color azul podemos ver los datos introducidos al programa, esto es: El caudal permeado, la reconversión total de la OI, la temperatura del agua, los TDS (que el propio programa calcula a partir de las concentraciones de sustancias químicas del agua de entrada) y el factor de flujo.



Al calcular un sistema de OI siempre será más desfavorable suponer una temperatura baja, ya que la producción en ese caso disminuye. También como dato estamos diciendo al programa que no se usará ningún aditivo químico en la entrada y que el número de unidades de membranas es de 8.

Los resultados de los demás parámetros están de color marrón. Se puede ver un caudal necesario de alimentación de 9,60 m³/h, el cual será usado en el diseño de todas las etapas anteriores. La presión necesaria en la entrada, 11,90 bar para poder conseguir el caudal permeado que hemos fijado como dato (4,80 m³/h). Pero como se ha visto antes, el agua de alimentación a la OI ya llega con una presión de 1,72 bar, por tanto habrá que descontarla de la presión que debe dar la ósmosis, entonces la POI = 11,90 - 1,72 + 0,5 = 10,68 bar. Con estos dos datos ya se podría elegir la bomba de la OI, que aplicando la ecuación [] es 3,6 kW. Por su parte el programa supone que la bomba recibe el agua sin presión y calcula su potencia: 3,97 kW con un rendimiento del 80%. También calcula la energía necesaria por cada metro cúbico de producción, 0,83 kW/m³.

El programa también nos informa de cuál es el área total activa de las membranas; 289.85 m², del flujo específico medio de la OI; 16,56 lm²h litros por metro cuadrado y hora, y de la fuerza impulsora de presión neta media en la OI “NDP”, 9,76 bar.

Tabla 6.13 Valores de algunos parámetros en cada módulo de la primera OI.

Stage	Element	#PV	#Ele	Feed Flow (m ³ /h)	Feed Press (bar)	Conc Flow (m ³ /h)	Conc Press (bar)	Perm Flow (m ³ /h)	Avg Flux (lmh)	Perm TDS (mg/l)
1	RO-390-FF	1	2	9.60	11.56	8.26	11.00	1.34	18.54	1.58
2	RO-390-FF	1	2	8.26	10.66	7.01	10.21	1.24	17.15	1.94
3	RO-390-FF	1	2	7.01	9.87	5.86	9.52	1.15	15.87	2.47
4	RO-390-FF	1	2	5.86	9.17	4.80	8.91	1.06	14.68	3.26



En la tabla 6.13, se puede ver como varían los caudales y presiones de alimentación y rechazo a su paso por cada módulo. Por otro lado, como el permeado se recoge en paralelo, el programa indica el caudal, TDS y el flujo específico medio, en las corrientes de permeado que se generan en cada módulo. Se puede comprobar cómo por cada “PV” recipiente de presión, hay dos unidades de membranas.

Tabla 6.14 Valores de las concentraciones de sustancias químicas y su evolución en la primera OI.

Pass											Streams
(mg/l as Ion)											
Name	Feed	Adjusted Feed	Concentrate				Permeate				Total
			Stage 1	Stage 2	Stage 3	Stage 4	Stage 1	Stage 2	Stage 3	Stage 4	
NH4+ + NH3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
K	4.30	4.30	4.98	5.82	6.91	8.35	0.12	0.16	0.21	0.29	0.19
Na	131.90	131.90	153.32	180.41	215.67	263.25	0.24	0.33	0.46	0.64	0.41
Mg	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Ca	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Sr	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Ba	0.07	0.07	0.08	0.09	0.11	0.14	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
CO3	0.19	0.19	0.27	0.38	0.55	0.84	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
HCO3	243.41	243.41	282.88	332.73	397.56	484.97	0.83	0.93	1.09	1.35	1.04
NO3	9.30	9.30	10.72	12.57	14.89	17.97	0.30	0.39	0.54	0.74	0.48
Cl	19.78	19.78	22.99	27.06	32.35	39.48	0.03	0.04	0.06	0.08	0.05
F	0.17	0.17	0.20	0.23	0.28	0.34	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
SO4	54.48	54.48	63.33	74.54	89.13	108.82	0.06	0.08	0.11	0.15	0.10
SiO2	0.90	0.90	1.05	1.23	1.47	1.80	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00
Boron	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
CO2	26.89	26.89	26.92	26.96	27.04	27.16	26.45	26.53	26.63	26.78	26.59



TDS	464.51	464.52	539.82	635.06	758.92	925.98	1.58	1.94	2.47	3.26	2.26
pH	7.20	7.20	7.26	7.32	7.39	7.47	5.00	5.05	5.12	5.20	5.09

En la tabla 6.14, se pueden ver los valores para cada sustancia química que hemos introducido al programa como dato, en la segunda columna, y su evolución individual tanto en el rechazo como en el permeado en cada módulo de la OI. La tercera columna en este caso es igual que la segunda, ya que el programa puede ajustar automáticamente el valor de alguna especie para equilibrar el balance iónico del agua, pero como hemos partido de un análisis completo el programa no ha hecho ninguna modificación.

Tabla 6.15 Valores de algunos parámetros en cada membrana de la primera OI.

Stage 1	Element	Recovery	Perm Flow (m ³ /h)	Perm TDS (mg/l)	Feed Flow (m ³ /h)	Feed TDS (mg/l)	Feed Press (bar)
	1	0.07	0.68	1.55	9.60	464.52	11.56
	2	0.07	0.66	1.62	8.92	499.80	11.26
Stage 2	Element	Recovery	Perm Flow (m ³ /h)	Perm TDS (mg/l)	Feed Flow (m ³ /h)	Feed TDS (mg/l)	Feed Press (bar)
	1	0.08	0.63	1.81	8.26	539.61	10.66
	2	0.08	0.61	2.07	7.63	584.01	10.42
Stage 3	Element	Recovery	Perm Flow (m ³ /h)	Perm TDS (mg/l)	Feed Flow (m ³ /h)	Feed TDS (mg/l)	Feed Press (bar)
	1	0.08	0.58	2.32	7.01	635.49	9.87
	2	0.09	0.57	2.62	6.43	692.60	9.68
Stage 4	Element	Recovery	Perm Flow (m ³ /h)	Perm TDS (mg/l)	Feed Flow (m ³ /h)	Feed TDS (mg/l)	Feed Press (bar)
	1	0.09	0.54	3.05	5.86	759.72	9.17
	2	0.10	0.53	3.47	5.33	834.95	9.03



En la tabla 6.15, se puede ver la conversión que se consigue en cada membrana. Igualmente vemos cómo varían los caudales y concentraciones de permeado y alimentación (la alimentación de una es el rechazo de la anterior) a su paso por cada unidad de membrana. También da la presión a la entrada de cada membrana.

Tabla 6.16 Valores de algunos parámetros de ROSA relativos al problema de la incrustación de las MOI.

	Raw Water	Concentrate
pH	7.20	7.47
Langelier Saturation Index	-7.33	-6.50
Stiff & Davis Stability Index	-6.49	-5.90
TDS (mg/l)	464.51	925.98
HCO ₃	243.41	484.84
CO ₂	26.89	27.15
CO ₃ ⁻²	0.19	0.84
CaSO ₄ (% Saturation)	0.00	0.00
BaSO ₄ (% Saturation)	123.37	492.38
SrSO ₄ (% Saturation)	0.00	0.00
CaF ₂ (% Saturation)	0.00	0.00
SiO ₂ (% Saturation)	0.95	1.89
Mg(OH) ₂ (% Saturation)	0.00	0.00

En la tabla 6.16, el programa nos da información relativa a la posibilidad de que se formen incrustaciones en las membranas reduciendo su eficacia u obligando a una limpieza más frecuente. “Raw water” es el agua bruta, el agua de alimentación, “Concentrate” es el caudal de rechazo de la OI.

El primer grupo de parámetros se refieren precisamente a índices de incrustación por precipitados, así tenemos el LSI (índice de Langelier) y el S&DSI (índice de Stiff & Davis).

El LSI indica el grado de saturación del agua con respecto al carbonato cálcico (CaCO₃), correlacionándolo con el pH como variable principal. El pH influye en los equilibrios:



A pH bajo, los carbonatos y bicarbonatos pasarán a ácido carbónico, por lo que no habrá riesgo de deposiciones ni precipitaciones de CaCO_3 (o lo que es lo mismo, el agua no presentará propiedades incrustantes). En cambio, la elevada concentración de H_2CO_3 provocará que el agua presente características corrosivas.

Por el contrario, a pH elevados, habrá gran concentración de CO_3^{2-} y muy poco ácido carbónico, por lo que el agua no tendrá propiedades corrosivas. No obstante, los carbonatos tenderán a combinarse con los iones Ca^{2+} para formar CaCO_3 . Este carbonato cálcico podría llegar a precipitar al alcanzar una concentración dada (marcada por su equilibrio de solubilidad), provocando deposiciones y dando al agua lo que se conoce como condiciones incrustantes.

La fórmula para calcular el LSI es la siguiente:

$$\text{LSI} = \text{pH} - \text{pH}_s \quad [\text{Ec. 6.20}]$$

Siendo:

-pH = pH medido en el agua.

-pH_s = pH de saturación en CaCO_3 , que se calcula mediante la fórmula:

$$\text{pH}_s = (9,3 + A + B) - (C + D) \quad [\text{Ec. 6.21}]$$

Donde:

$$A = (\text{Log}_{10} [\text{TDS}] - 1) / 10$$

$$B = -13,12 \cdot \text{Log}_{10} (T(K)) + 34,55$$

$$C = \text{Log}_{10} [\text{Ca}^{++} \text{ en forma de } \text{CaCO}_3] - 0,4$$

$$D = \text{Log}_{10} [\text{Alcalinidad Total Carbonatada}]$$

Todos los parámetros que se encuentran entre corchetes corresponden a concentraciones, medidas en mg/l. La Alcalinidad Total Carbonatada se



refiere a las ppm de carbonatos que se encuentran libres, de forma que actúan como bases, alcalinizando el agua.

Como se observa en las fórmulas anteriores, el LSI se ve afectado por el pH, el TDS, la temperatura y las concentraciones de carbonatos, tanto libres como unidos al catión Ca^{+2} . Así se deduce que:

- Un agua con un LSI de cero corresponderá a un agua en condiciones óptimas de estabilidad: ni corrosiva ni incrustante.
- Un agua con un LSI positivo corresponderá a un agua con propiedades incrustantes, en la que se darán precipitaciones y deposiciones de carbonato cálcico.
- Un agua con un LSI negativo corresponderá a un agua con propiedades corrosivas.

Por ejemplo, un agua con un índice LSI de 1,0 será un agua incrustante a la que una reducción de su pH en una unidad la llevaría a su condición de equilibrio y la haría por lo tanto, no corrosiva ni incrustante. Si por el contrario se tiene un agua con un LSI de -0,85, el índice indicaría que se trata de un agua corrosiva, a la que un aumento de su pH en 0,85 unidades llevaría a su estado óptimo.

No obstante, hay que tener en cuenta que, a efectos prácticos, el LSI puede perfectamente alcanzar valores distintos de cero, siempre y cuando no se alejen en exceso. En aplicaciones de ósmosis inversa, se evitan valores de LSI positivos, y es recomendable que el flujo de rechazo (que es el más concentrado) presente un LSI cercano a -0,2. Esto indica que dicho flujo está a 0,2 unidades de pH por debajo de su estado de equilibrio, por encima del cual comenzaría el riesgo de precipitaciones de carbonato cálcico.



(S&DSI): Es un parámetro que mide el grado de saturación del agua con respecto al carbonato cálcico, al igual que el LSI. Este índice trata de corregir las deficiencias que presenta el LSI a elevados valores de TDS. Generalmente se acepta la siguiente división:

- Utilizar el LSI para valores de TDS < 10000 ppm (generalmente aguas salobres).
- Utilizar el Stiff & Davis Index para valores de TDS > 10000 ppm (normalmente aguas marinas).

Por lo demás, este parámetro funciona de igual forma que el LSI: indica la variación de pH que hay que realizar para llevar al agua a su situación de equilibrio respecto del CaCO_3 . En aplicaciones de ósmosis inversa, el criterio a la hora de escoger un S&DSI apropiado es el mismo que para el LSI: se buscan valores de S&DSI ligeramente negativos en la corriente de rechazo (de aproximadamente -0,2), de forma que se evite la precipitación de carbonato cálcico.

Los siguientes parámetros son la concentración de varias sustancias muy importantes, TDS, bicarbonatos, dióxido de carbono y carbonatos:

HCO_3^- (mg/l): Este parámetro indica la concentración en mg/l de los aniones bicarbonato. Como se avanzó en la descripción del parámetro LSI, el HCO_3^- forma un equilibrio con el CO_2 y el CO_3^{2-} que se ve fuertemente afectado por el pH del medio.

El CO_2 (mg/l): Este parámetro indica la concentración en mg/l de CO_2 disuelto en agua. El CO_2 es un gas relativamente soluble, producto de la hidrólisis del H_2CO_3 . A efectos prácticos, ROSA englobará todo el H_2CO_3 y el CO_2 dentro del parámetro " CO_2 (mg/l)". La presencia de CO_2 en gran cantidad dota al agua de propiedades corrosivas.



CO_3^{2-} (mg/l): Este parámetro indica la concentración en mg/l de los aniones carbonato (CO_3^{2-}). La presencia o ausencia de carbonatos en un agua dependerá del pH al que se encuentre ésta.

Además, los aniones CO_3^{2-} reaccionan con los cationes Ca^{2+} para formar carbonato cálcico, que puede resultar peligroso para la instalación debido a su poca solubilidad.

Finalmente hay una serie de sales de muy baja solubilidad, cuyos valores se expresan como el porcentaje de la concentración de saturación. En este caso vemos como no habría problema con ninguna sal, salvo con el sulfato de bario, para el que nos dice el programa que está presente en un 392,38% por encima de su saturación. Esto nos indica que a pesar de su bajísima concentración en el agua de entrada puede provocar un gran problema en la OI. En realidad, el bario, no va a interferir en esta etapa ya que ha sido eliminado del agua en las resinas de intercambio iónico, dada la alta selectividad que éstas muestran por el bario frente a otros cationes, incluso el propio calcio.

Tabla 6.17 Características del flujo de agua.

CARACTERÍSTICAS DEL AGUA TRAS LA PRIMERA OI	
Caudal permeado (m^3/h)	4,80
Presión (bar)	8,91
pH	5,09
Conductividad ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	5,19
SDI	≈ 0
Dureza (°f)	0
Cloro total (mg/l)	0



6.6.4. Acumulación intermedia.

No es recomendable acumular el agua una vez producida por el alto riesgo de recontaminación existente, ya sea debido al tiempo que permanecería en contacto con los materiales que forman los depósitos y tuberías, los cuales van cediendo lentamente las sustancias químicas que forman sus estructuras, o por la posibilidad de multiplicación de microorganismos en su seno. Sin embargo una vez comenzada una sesión de hemodiálisis sería aún más grave que una avería impidiese el suministro de agua y los enfermos no pudieran terminar su tratamiento.

Para solventar este problema, en este trabajo se propone mantener una acumulación de agua antes de la última ósmosis, con una desinfección final por UV. Además el agua de retorno que no se ha aprovechado en los monitores puede recogerse precisamente en este depósito de acumulación y no desperdiciarse por el desagüe.

6.6.4.1. Diseño.

La acumulación necesaria para cubrir el peor de los casos, debería ser suficiente para poder terminar una sesión de hemodiálisis con todos los puestos ocupados y suponiendo una avería al poco tiempo de haber empezado.

Para calcular el volumen de acumulación hay que multiplicar el tiempo que dura una sesión de hemodiálisis 4h, por el caudal nominal de cada monitor de hemodiálisis 0.04 m³/h, y por el número de monitores 25, así obtenemos que es de 4 m³.



Dependiendo de cómo sea el depósito habrá que aumentar al anterior volumen calculado dependiendo del NPSH de la bomba de la ósmosis 2, para asegurar que no cavite. Normalmente es suficiente con una altura de agua de 20 cm por encima de la aspiración de las bombas, de modo que si el depósito tiene forma de prisma recto con una base de $S \text{ m}^2$, el volumen total del depósito debería ser de $(4+S \times 0.2) \text{ m}^3$.

Por razones de seguridad podría dividirse el volumen calculado en dos depósitos iguales, unidos por un colector común de aspiración conectado con la bomba de la segunda OI. Los depósitos deben tener a la salida una válvula cada uno para independizarlos en caso de avería o desinfección.

Durante el funcionamiento normal de la planta el volumen de agua en la acumulación se va renovando. El tiempo de residencia estimado para una utilización de la planta del 60% (15 puestos), en dos turnos de 4 h cada uno, es de 6.7 h. Este valor asegura la renovación diaria del agua acumulada y así se minimiza el riesgo de contaminación.

Es necesario que durante el funcionamiento normal no se creen depresiones o sobrepresiones en el interior de los depósitos, para ello será necesario permitir la entrada y salida de aire pero al mismo tiempo se debe impedir que penetren partículas de polvo o microorganismos presentes siempre en el aire. Para ello debe usarse un venteo individual para cada depósito, dotado con un filtro de aire que sea capaz al menos de retener partículas de $0,4 \mu\text{m}$, y permitir un flujo de aire en ambas direcciones igual al caudal de agua en el proceso de llenado.

A pesar de la filtración en el venteo, como puede verse en la figura [], algunos tipos de microorganismos podrían llegar hasta el agua acumulada, por tanto se hace necesario algún sistema que garantice la no proliferación de microorganismos en los tanques de acumulación. Para ello se propone la



instalación de un juego de lámparas UV, encapsuladas en unos tubos de cuarzo y sumergidos en los tanques, próximos a las bocas de salida.

Como ya se ha indicado una de las funciones de la acumulación es recoger el agua sobrante del anillo de distribución, por tanto cada depósito tendrá una acometida de retorno unida a través de una llave a la tubería general de retorno, de modo que también aquí se pueda aislar cada depósito. El agua del retorno llega mediante la diferencia de presión existente entre el anillo y el interior de los depósitos, donde el venteo proporciona prácticamente la presión atmosférica. Por tanto el sistema de retorno se comporta como un grifo abierto.

6.6.5. Segunda ósmosis inversa.

El funcionamiento de esta OI estará gestionado por un autómata, el cual dará orden de arrancar o parar en función de si hay demanda de agua en los puestos de HD. El autómata se basará en las señales de dos caudalímetros cuyo funcionamiento se explica en el punto 6.7.2.

Esta segunda OI puede ser un poco más pequeña ya que debe servir una producción de sólo 2 m³. Estará constituida por solamente tres módulos con dos membranas cada uno, puesto que es el diseño mínimo para conseguir la producción mencionada a partir del agua de alimentación de la primera OI. Esto es así, ya que una de las razones de optar por un diseño en la planta de dos OI en serie, es para poder usar ésta en el caso de que la primera sufriese una avería. Por tanto a continuación vamos a ver los valores que nos ofrece ROSA para todos los parámetros que ya se han explicado en los cálculos de la primera OI, pero con el agua de la salida de la etapa del doble lecho de carbón activo.

Tabla 6.18. Datos generales de la segunda OI funcionando como única OI, obtenidos del programa ROSA.

Feed Flow to Stage 1	4.00	m ³ /h	Pass 1 Permeate Flow	2.00	m ³ /h
Raw Water Flow to System	4.00	m ³ /h	Pass 1 Recovery	50.00	%
Feed Pressure	6.48	bar	Feed Temperature	10.0	C
Flow Factor	0.85		Feed TDS	464.51	mg/l
Chem. Dose (100% H2SO4)	0.00	mg/l	Number of Elements	6	
Total Active Area	217.39	M ²	Average Pass 1 Flux	9.20	lmh
Water Classification: Surface Supply SDI < 5			Average NDP	5.24	bar
			Power	0.90	kW
			Specific Energy	0.45	kWh/m ³

Vemos en la tabla 6.18 como la nueva OI, sólo con tres módulos y seis membranas, puede servir un caudal de 2 m³/h de permeado con una conductividad de aproximadamente 8 µS/cm. Esta conductividad es mayor que la exigida por la norma UNE 111-301-90 (anexo 1), pero hay que recordar que este funcionamiento sólo tendría lugar en caso de avería en la primera OI, por tanto no es el funcionamiento habitual, además los depósitos de acumulación aún tendrían 4 m³ de agua de menos de 10 µS/cm, por lo que durante un tiempo el agua de producción seguiría estando por debajo de 4,3 µS/cm.

Tabla 6.19. Valores de algunos parámetros en cada módulo de la primera OI, funcionando como la única OI.

Stage	Element	#PV	#Ele	Feed Flow (m ³ /h)	Feed Press (bar)	Conc Flow (m ³ /h)	Conc Press (bar)	Perm Flow (m ³ /h)	Avg Flux (lmh)	Perm TDS (mg/l)
1	RO-390-FF	1	2	4.00	6.13	3.26	5.98	0.74	10.15	1.89
2	RO-390-FF	1	2	3.26	5.64	2.60	5.52	0.67	9.20	2.61
3	RO-390-FF	1	2	2.60	5.18	2.00	5.10	0.60	8.25	3.88

Tabla 6.20 Valores de las concentraciones de sustancias químicas y su evolución en la segunda OI, funcionando como única.



Pass			Streams						
(mg/l as Ion)									
Name	Feed	Adjusted Feed	Concentrate			Permeate			
			Stage 1	Stage 2	Stage 3	Stage 1	Stage 2	Stage 3	Total
NH4+ + NH3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
K	4.30	4.30	5.22	6.45	8.19	0.16	0.23	0.35	0.24
Na	131.90	131.90	161.49	202.70	262.89	0.35	0.51	0.81	0.54
Mg	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Ca	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Sr	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Ba	0.07	0.07	0.09	0.11	0.14	0.00	0.00	0.00	0.00
CO3	0.19	0.19	0.30	0.48	0.84	0.00	0.00	0.00	0.00
HCO3	243.41	243.41	297.93	373.76	484.36	0.84	1.07	1.52	1.12
NO3	9.30	9.30	11.27	13.88	17.55	0.41	0.60	0.90	0.62
Cl	19.78	19.78	24.22	30.40	39.44	0.05	0.07	0.10	0.07
F	0.17	0.17	0.21	0.26	0.34	0.00	0.00	0.00	0.00
SO4	54.48	54.48	66.72	83.79	108.74	0.08	0.12	0.19	0.13
SiO2	0.90	0.90	1.10	1.38	1.79	0.00	0.01	0.01	0.01
Boron	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
CO2	26.89	26.89	26.93	27.01	27.16	26.56	26.68	26.84	26.69
TDS	464.51	464.51	568.49	713.05	923.89	1.89	2.61	3.88	2.73
pH	7.20	7.20	7.28	7.37	7.47	5.12	5.22	5.37	5.24

Tabla 6.21 Valores de algunos parámetros en cada membrana de la segunda OI, funcionando como única.

Stage 1	Element	Recovery	Perm Flow (m³/h)	Perm TDS (mg/l)	Feed Flow (m³/h)	Feed TDS (mg/l)	Feed Press (bar)
1		0.09	0.37	1.65	4.00	464.51	6.13
2		0.10	0.36	2.13	3.63	511.69	6.05

Stage 2	Element	Recovery	Perm Flow (m ³ /h)	Perm TDS (mg/l)	Feed Flow (m ³ /h)	Feed TDS (mg/l)	Feed Press (bar)
	1	0.10	0.34	2.26	3.26	569.53	5.64
	2	0.11	0.33	2.97	2.93	633.41	5.57
Stage 3	Element	Recovery	Perm Flow (m ³ /h)	Perm TDS (mg/l)	Feed Flow (m ³ /h)	Feed TDS (mg/l)	Feed Press (bar)
	1	0.12	0.30	3.33	2.60	713.43	5.18
	2	0.13	0.30	4.43	2.30	806.05	5.13

Tabla 6.22 Valores de algunos parámetros de ROSA relativos al problema de la incrustación de las MOI, en la segunda OI funcionando como única.

	Raw Water	Concentrate
pH	7.20	7.47
Langelier Saturation Index	-9.33	-8.33
Stiff & Davis Stability Index	-8.49	-7.90
TDS (mg/l)	464.51	923.95
HCO ₃	243.41	484.12
CO ₂	26.89	27.15
CO ₃	0.19	0.84
CaSO ₄ (% Saturation)	0.00	0.00
BaSO ₄ (% Saturation)	125.76	501.22
SrSO ₄ (% Saturation)	0.00	0.00
CaF ₂ (% Saturation)	0.00	0.00
SiO ₂ (% Saturation)	0.95	1.89
Mg(OH) ₂ (% Saturation)	0.00	0.00

A continuación vamos a ver los valores de la segunda OI en funcionamiento normal, es decir, en serie con la primera.

Tabla 6.23 Datos generales de la segunda OI obtenidos del programa ROSA.

Feed Flow to Stage 1	4.00	m ³ /h	Pass 1 Permeate Flow	2.00	m ³ /h
Raw Water Flow to System	4.00	m ³ /h	Pass 1 Recovery	49.99	%
Feed Pressure	6.05	bar	Feed Temperature	10.0	C



Flow Factor	0.85	Feed TDS	3.49 mg/l
Chem. Dose (100% H2SO4)	0.00 mg/l	Number of Elements	6
Total Active Area	217.39 M ²	Average Pass 1 Flux	9.20 lmh
Water Classification: RO Permeate SDI < 1		Average NDP	5.16 bar
		Power	0.84 kW
		Specific Energy	0.42 kWh/m ³

Tabla 6.24. Valores de algunos parámetros en cada módulo de la segunda OI

Stage	Element	#PV	#Ele	Feed Flow (m ³ /h)	Feed Press (bar)	Conc Flow (m ³ /h)	Conc Press (bar)	Perm Flow (m ³ /h)	Avg Flux (lmh)	Perm TDS (mg/l)
1	RO-390-FF	1	2	4.00	5.71	3.28	5.55	0.72	9.99	0.73
2	RO-390-FF	1	2	3.28	5.21	2.61	5.09	0.67	9.18	0.79
3	RO-390-FF	1	2	2.61	4.75	2.00	4.67	0.61	8.42	0.85

Tabla 6.25 Valores de las concentraciones de sustancias químicas y su evolución en la segunda OI.

Name	Pass (mg/l as Ion) Streams								
	Feed	Adjusted Feed	Concentrate			Permeate			
			Stage 1	Stage 2	Stage 3	Stage 1	Stage 2	Stage 3	Total
NH4+ + NH3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
K	0.28	0.28	0.34	0.41	0.53	0.03	0.03	0.04	0.03
Na	0.78	0.78	0.95	1.19	1.55	0.01	0.01	0.02	0.01
Mg	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Ca	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Sr	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Ba	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
CO3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
HCO3	1.51	1.51	1.77	2.14	2.71	0.64	0.67	0.70	0.67
NO3	0.70	0.70	0.84	1.04	1.33	0.06	0.07	0.09	0.07



Cl	0.08	0.08	0.10	0.12	0.16	0.00	0.00	0.00	0.00
F	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
SO4	0.14	0.14	0.17	0.21	0.28	0.00	0.00	0.00	0.00
SiO2	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Boron	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
CO2	26.57	26.57	26.62	26.67	26.73	26.12	26.16	26.19	26.15
TDS	3.49	3.49	4.17	5.12	6.56	0.73	0.79	0.85	0.79
pH	5.09	5.09	5.16	5.24	5.34	4.74	4.76	4.77	4.75

Tabla 6.26 Valores de algunos parámetros en cada membrana de la segunda OI.

Stage 1	Element	Recovery	Perm Flow (m ³ /h)	Perm TDS (mg/l)	Feed Flow (m ³ /h)	Feed TDS (mg/l)	Feed Press (bar)
	1	0.09	0.36	0.72	4.00	3.49	5.71
	2	0.10	0.36	0.74	3.64	3.80	5.62
Stage 2	Element	Recovery	Perm Flow (m ³ /h)	Perm TDS (mg/l)	Feed Flow (m ³ /h)	Feed TDS (mg/l)	Feed Press (bar)
	1	0.10	0.33	0.77	3.28	4.17	5.21
	2	0.11	0.33	0.80	2.94	4.59	5.15
Stage 3	Element	Recovery	Perm Flow (m ³ /h)	Perm TDS (mg/l)	Feed Flow (m ³ /h)	Feed TDS (mg/l)	Feed Press (bar)
	1	0.12	0.31	0.83	2.61	5.12	4.75
	2	0.13	0.30	0.86	2.30	5.75	4.70

Tabla 6.27 Valores de algunos parámetros de ROSA relativos al problema de la incrustación de las MOI, en la segunda OI.

	Raw Water	Concentrate
pH	5.09	5.34
Langelier Saturation Index	-13.51	-12.88
Stiff & Davis Stability Index	-10.79	-10.25
TDS (mg/l)	3.49	6.56



HCO3	1.51	2.71
CO2	26.57	26.72
CO3	0.00	0.00
CaSO4 (% Saturation)	0.00	0.00
BaSO4 (% Saturation)	0.00	0.00
SrSO4 (% Saturation)	0.00	0.00
CaF2 (% Saturation)	0.00	0.00
SiO2 (% Saturation)	0.00	0.00
Mg(OH)2 (% Saturation)	0.00	0.00

La conductividad del agua de rechazo es de 10,25 $\mu\text{S}/\text{cm}$ calculado a partir del dato de TDS de 6,56.

Tabla 6.28 Características del flujo de agua.

CARACTERÍSTICAS DEL AGUA TRAS LA SEGUNDA OI	
Caudal permeado (m^3/h)	2
Presión (bar)	0,89
pH	4,75
Conductividad ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	1,23
SDI	0
Dureza ($^\circ\text{f}$)	0
Cloro total (mg/l)	0

6.7. Sistema de distribución de agua a cada puesto de HD.

Finalmente para que el agua llegue a cada puesto de diálisis con la garantía de máxima pureza, y en las condiciones de caudal y presión necesarias para el correcto funcionamiento de los monitores de hemodiálisis, es necesario un cuidadoso diseño.

El sistema estará formado por una tubería de diámetro suficiente para suministrar consecutivamente un caudal constante de agua a veinticinco



monitores, con una presión adecuada. Deberá devolver el agua sobrante a la acumulación intermedia y cuando no exista consumo, deberá funcionar como un circuito cerrado para dificultar el crecimiento bacteriano.

Se intercalarán dos bombas circuladoras en paralelo de modo que en cada momento sólo funcione una y roten entre ellas. Estas bombas aportarán la presión suficiente para vencer las pérdidas de carga del anillo. Después de las bombas, el agua pasará por un esterilizador de luz UV, que minimizará la entrada de microorganismos viables al sistema de distribución de agua. A continuación unos filtros de agua ultrapura se encargarán de retener todas las bacterias, y la mayoría de las endotoxinas.

6.7.1. Materiales y especificaciones constructivas.

El agua obtenida de las etapas anteriores, es un agua de gran pureza con una tendencia muy fuerte a disolver sustancias o gases, baste recordar que el pH es de 4,75. Por tanto, es extremadamente fácil su contaminación por sustancias presentes en las tuberías o piezas que estén en contacto con ella. Así pues, la red de distribución debe ser perfectamente estanca y estar realizada con materiales que no interaccionen químicamente, ni faciliten el crecimiento microbiano en el agua. Esto se traduce en las siguientes prohibiciones constructivas:

- El uso de conductos o piezas de metal, salvo el acero inoxidable de alta calidad.
- La presencia de fondos de saco, o figuras de difícil limpieza o vaciado.
- Los empalmes e intersecciones susceptibles de acumular suciedad y facilitar la formación de biofilm.
- Los filtros e incluso las membranas de ósmosis deberán ser de algún material sintético que no facilite el crecimiento microbiológico ni sea degradable por la acción de estos y, además debe admitir tratamientos de desinfección o limpieza química.



- Usar conducciones de materiales traslucidos que puedan favorecer el crecimiento de algas microscópicas.

El material que puede ser utilizado en las tuberías y accesorios, no debe transmitir ninguna impureza al agua. Los materiales más aptos son plásticos como el polipropileno y polietileno, y el acero inoxidable. Las uniones en los materiales plásticos deben ser tales que minimicen la formación de irregularidades y recovecos en el interior de la conducción. Actualmente la mejor técnica de unión en este sentido es la electrofusión, frente a la termofusión, la cual siempre deja una rebaba interior de un tamaño de un par de milímetros. La desinfección de las tuberías plásticas sólo puede ser química y no térmica por razones obvias.

Si la opción es el acero inoxidable, presenta las ventajas de que se pueden utilizar sistemas de desinfección térmica o química, además de su resistencia a los golpes o tracciones que se puedan ejercer accidentalmente. Las uniones en este material son la soldadura y la unión por presión. En el caso de soldar, el acero deberá ser bajo en carbono como por ejemplo el AISI 316L, es necesario hacerlo al TIG con la tubería llena de argón, para que las soldaduras no sufran oxidación más adelante en la cara interna de las tuberías.

6.7.2. Anillo y retorno a la acumulación intermedia.

El agua una vez purificada, en la tubería de distribución, no debe quedarse estancada cuando no hay pacientes dializándose, para evitar la proliferación de microorganismos. Una solución adecuada consiste en mantener el agua en movimiento en un circuito cerrado llamado anillo, mediante una bomba recirculadora. La velocidad con la que debe moverse el agua tiene que ser lo suficientemente alta para entorpecer la formación de biofilm sobre las tuberías, pero no demasiado alta, ya que tendríamos problemas de ruidos y un derroche energético. Así pues una velocidad adecuada podría estar entre 1 y 1,5 m/s.



Para poder cerrar el circuito de agua y funcionar como un anillo, existirá una válvula de tres vías que, en función de si hay demanda de agua o no, dirigirá el agua a la acumulación intermedia, o hacia las bombas recirculadoras respectivamente. Se puede saber cuando hay demanda en el circuito, instalando dos caudalímetros gestionados por un autómata. Uno estará instalado a la salida de las bombas recirculadoras pero antes del primer puesto de HD, y el segundo después del último puesto. Si la diferencia de sus lecturas es positiva es que en algún puesto de HD se está consumiendo agua y la válvula permanecerá abierta dirigiendo el agua sobrante a la acumulación intermedia. Si los caudalímetros tienen la misma lectura, es que no hay consumo y la válvula es accionada para crear el circuito, en este caso además el autómata detendrá el funcionamiento de la segunda OI.

Es importante la vigilancia de las tuberías para detectar cualquier fuga o defecto que pueda poner en peligro la calidad del agua en la distribución. Para ello lo mejor es mantener la instalación vista y accesible para facilitar su reparación, y a una cierta altura para evitar golpes.

Para alimentar a los puestos, la mejor solución sería con una figura de la tubería en forma de U, de modo que la conducción al monitor estuviese conectada en su parte inferior a través de una válvula. De esta forma, durante el uso habitual de los monitores de hemodiálisis se impediría la acumulación de residuos en la tubería, además en caso de limpieza y desinfección se podría vaciar completamente la instalación.

Los monitores de hemodiálisis para funcionar correctamente necesitan un rango de presiones en su suministro de agua. Este es normalmente de 1 a 8 bares.

Para conocer el diámetro de la tubería del anillo y que la presión en cada puesto sea la correcta se ha realizado la tabla xx el estudio siguiente:



Cada fila desde la 1 a la 25 se corresponden con los puntos donde se van a conectar los monitores de hemodiálisis. En la última columna se puede leer la presión después de la válvula de conexión en el momento en que todos están funcionando y recibiendo 40 l/h. El punto 0 se corresponde con la aspiración de la bomba recirculadora del anillo, y el punto 26 con el desagüe al depósito de acumulación.

Se ha considerado que la tubería es de polipropileno electrosoldado, con una rugosidad de 0.002 mm. Los factores de pérdida de carga en cada pieza son $\zeta = 2$ para los codos a 90°, $\zeta = 1,5$ en las tes con salida lateral del agua, y $\zeta=0,05$ para las válvulas de bola completamente abiertas.

Como resultado podemos ver que, con una tubería de DN 32 (una pulgada), con el caudal de 2 m³ de la etapa anterior, y aportando una presión de 3,06 bares al agua en el circuito, todos los puestos de hemodiálisis tendrán un caudal y presión adecuados.

Pero en realidad no hemos tenido en cuenta las pérdidas de carga producidas en la lámpara UV y en los filtros de agua ultrapura. Para estos últimos podemos recurrir a la figura 6.22, donde el fabricante nos informa de la pérdida de carga en función del caudal que los atraviese, para un cartucho de diez pulgadas. Pero vemos que nos salimos de la gráfica, así pues habrá que montar un filtro mayor que disminuya el caudal específico. Por ejemplo, si se pone uno de 20 pulgadas, el caudal por unidad de superficie se disminuye a la mitad, y ahora se observa la nueva pérdida de carga, en la gráfica, para un caudal de un metro cúbico por hora, que tendrá un valor aproximado **0,24 bares**.



Anillo	l (m)	Desnivel (m)	q (m³/h)	Di (mm)	DN (mm)	v (m/s)	Re	f	hf (mca)	Codos 90°	Hf	T 90°	Hf	Válvula	Hf	P (mca)	P (bar)
0	12	1	2,00	25	32	1,13	28098	0,0238	0,748	5	0,654		0,000	3	0,010	16,59	1,69
1	3	0	1,96	25	32	1,11	27536	0,0240	0,180	4	0,502	1	0,094	1	0,003	19,00	1,94
2	3	0	1,92	25	32	1,09	26974	0,0241	0,174	4	0,482	1	0,090	1	0,003	19,78	2,02
3	3	0	1,88	25	32	1,06	26412	0,0242	0,168	4	0,462	1	0,087	1	0,003	20,53	2,09
4	3	0	1,84	25	32	1,04	25850	0,0243	0,161	4	0,443	1	0,083	1	0,003	21,25	2,17
5	3	0	1,80	25	32	1,02	25288	0,0244	0,155	4	0,423	1	0,079	1	0,003	21,94	2,24
6	3	0	1,76	25	32	1,00	24726	0,0246	0,149	4	0,405	1	0,076	1	0,003	22,60	2,31
7	3	0	1,72	25	32	0,97	24164	0,0247	0,143	4	0,387	1	0,073	1	0,002	23,23	2,37
8	3	0	1,68	25	32	0,95	23602	0,0248	0,137	4	0,369	1	0,069	1	0,002	23,84	2,43
9	3	0	1,64	25	32	0,93	23040	0,0250	0,132	4	0,352	1	0,066	1	0,002	24,42	2,49
10	3	0	1,60	25	32	0,91	22478	0,0251	0,126	4	0,335	1	0,063	1	0,002	24,97	2,55
11	3	0	1,56	25	32	0,88	21916	0,0253	0,121	4	0,318	1	0,060	1	0,002	25,49	2,60
12	3	0	1,52	25	32	0,86	21354	0,0255	0,115	4	0,302	1	0,057	1	0,002	25,99	2,65
13	3	0	1,48	25	32	0,84	20792	0,0256	0,110	4	0,286	1	0,054	1	0,002	26,47	2,70
14	3	0	1,44	25	32	0,81	20230	0,0258	0,105	4	0,271	1	0,051	1	0,002	26,92	2,75
15	3	0	1,40	25	32	0,79	19668	0,0260	0,100	4	0,256	1	0,048	1	0,002	27,35	2,79
16	3	0	1,36	25	32	0,77	19106	0,0262	0,095	4	0,242	1	0,045	1	0,002	27,75	2,83
17	3	0	1,32	25	32	0,75	18544	0,0264	0,090	4	0,228	1	0,043	1	0,001	28,14	2,87
18	3	0	1,28	25	32	0,72	17982	0,0266	0,085	4	0,214	1	0,040	1	0,001	28,50	2,91



19	3	0	1,24	25	32	0,70	17420	0,0268	0,081	4	0,201	1	0,038	1	0,001	28,84	2,94
20	3	0	1,20	25	32	0,68	16859	0,0270	0,076	4	0,188	1	0,035	1	0,001	29,16	2,97
21	3	0	1,16	25	32	0,66	16297	0,0272	0,072	4	0,176	1	0,033	1	0,001	29,46	3,01
22	3	0	1,12	25	32	0,63	15735	0,0275	0,068	4	0,164	1	0,031	1	0,001	29,74	3,03
23	3	0	1,08	25	32	0,61	15173	0,0277	0,063	4	0,152	1	0,029	1	0,001	30,01	3,06
24	3	0	1,04	25	32	0,59	14611	0,0280	0,059	4	0,141	1	0,027	1	0,001	30,25	3,09
25	3	0	1,00	25	32	0,57	14049	0,0283	0,055	4	0,131	1	0,025	1	0,001	30,48	3,11
26	6	1	0,96	25	32	0,54	13487	0,0286	0,103	6	0,181	1	0,023	1	0,001	30,69	3,13
																30,00	3,06



6.7.3. Bombas recirculadoras.

Van a ser las encargadas de mantener el agua dentro del anillo en permanente circulación cuando no haya ningún paciente dializándose. También proporcionarán una presión extra a cada puesto durante el funcionamiento normal.

Deberán estar construidas en acero inoxidable y estar concebidas para su uso en circuitos de agua ultrapura, de modo que no contaminen el agua al pasar por ellas. Por razones de seguridad deben montarse dos unidades en paralelo, aunque en cada momento sólo funcione una. Por tanto tendrán alternancia en su funcionamiento y entrada en automático cuando la otra falle.

En cuanto a sus características de funcionamiento, deberán mover un caudal de $2 \text{ m}^3/\text{h}$ y vencer una pérdida de carga de $0,06+0,24+3,06= 3,36$ bar. Así pues, aplicando la ecuación [6.7] deberán tener una potencia de $0,23$ kW.

6.7.4. Desinfección con luz ultravioleta.

Antes de enviar el agua a los pacientes, se hará pasar a través de una lámpara UV. La lámpara UV se utiliza para destruir los microorganismos que pudieran llegar desde la etapa anterior, pero también los que estuvieran en suspensión durante el funcionamiento como circuito cerrado del anillo de distribución. Por tanto, la lámpara debe funcionar constantemente las veinticuatro horas del día.

En algunos casos puede originar una presencia masiva de endotoxinas con la repercusión correspondiente de los pacientes, por lo que debe contar siempre con un filtro de agua ultrapura aguas abajo, capaz de retenerlas.



La lámpara debe estar muy bien diseñada de acuerdo a la velocidad del agua que circula por ella para asegurar un tiempo de radiación mínimo a los microorganismos. Si el agua contuviera partículas o sustancias disueltas, restarían a la lámpara gran parte de su eficacia. En ese sentido no vamos a tener ningún problema ya que es un agua doblemente osmotizada.



Tabla 6.30 Dosis de UV en mWs/cm² para inactivar una población microbiana en 1 log (90%) y 2 log (99%).

MICROORGANISMOS	REDUCCIÓN LOGARITMICA		MICROORGANISMOS	REDUCCIÓN LOGARITMICA	
	1	2		1	2
BACTERIAS			Coliformes fecales ¹⁰	3.4	6.8
Bacillus anthracis	4.5	8.7	Salmonella enteritidis	4	7.6
Bacillus subtilis, esporas	12	22	Salmonella paratyphi ³	3.2	---
Bacillus subtilis	7.1	11	Salmonella typhi ⁵	2.1	---
Campylobacter jejuni ⁵	1.1	---	Salmonella typhimurium ¹⁰	3	---
Clostridium tetani ¹	12	22	Shigella dysenteriae	2.2	4.2
Corynebacterium diphtheriae ¹	3.4	6.5	Shigella flexneri (paradysenteriae)	1.7	3.4
Escherichia coli	3	6.6	Shigella sonnei ⁵	3	5
Klebsiella terrigena ⁵	2.6	---	Staphylococcus aureus	5	6.6
Legionella pneumophila ⁴	0.9	2.8	Streptococcus faecalis ⁵	4.4	---
Sarcina lutea	20	26.4	Streptococcus pyogenes	2.2	---
Mycobacterium tuberculosis	6	10	Vibrio cholerae (V.comma) ⁶	---	6.5
Pseudomonas aeruginosa ⁵	5.5	10.5	Yersinia enterocolitica ⁵	1.1	---
VIRUS					
MS-2 Coliphage ⁵	18.6	---	Virus de la influenza ²	3.6	6.6
F-specific bacteriophage ²	6.9	---	Virus de la poliomeilitis ^{5,6,9}	5 – 8	14
Hepatitis A ^{5,6}	7.3	---	Rotavirus ^{5,6,9,11}	6 – 15	15-40
PROTOZOARIOS			ALGAS		
Giardia lamblia ^{6,7}	82	---	Verde-Azul ^{1,3}	300	600
Cryptosporidium parvum ⁸	80	120	Chlorella vulgaris ^{1,2}	12	22
LEVADURAS					
Saccharomyces cerevisiae ¹	7.3	13.2			

Referencias: 1. Legan (1980) 2. Jevons (1982) 3. Grocock (1984) 4. Antopol (1979) 5. Wilson et al. (1993) 6. Wolfe (1990) 7. Rice and Hoff (1981) 8. Ransome et al. (1993) 9. Harris et al. (1987) 10. Trojan Technologies Ltd. 11. Battigelli et al. (1993)

Para hallar la dosis adecuada de radiación UV. La normativa para el tratamiento de aguas superficiales para consumo humano de la EPA (Agencia



de Protección del Medio Ambiente de los Estados Unidos) requiere una dosis UV de 21 a 36 mWs/cm² para brindar una reducción de 2 a 3 unidades logarítmicas, respectivamente, del virus de la hepatitis A. La AWW recomienda una dosis de 40 mWs/cm² para sistemas municipales pequeños. Mientras que en las legislaciones de algunos estados de los EEUU exigen una dosis de 16 mWs/cm². En Europa, Noruega, Austria y Francia exigen dosis de 16, 30 y 25 mWs/cm² respectivamente.

Con la información del párrafo anterior y tras la observación de los datos de la tabla 6.3, la dosis ideal para mantener un flujo de agua seguro podría ser de 40 mWs/cm².

La dosis que se va a irradiar a los microorganismos viene determinada por la siguiente ecuación:

$$D = It_r \text{ [Ec. 6.22]}$$

Donde:

I es la intensidad promedio de la radiación.

t_r es el tiempo de residencia en la lámpara UV.

A su vez el tiempo de residencia se calcula según:

$$t_r = \frac{V}{Q} \text{ [Ec. 6.23]}$$

Donde:

V es el volumen que ocupa el agua dentro de la envoltura de la lámpara.

Q es el caudal que se trata.

Una lámpara habitual para la desinfección del agua, sería de arco de mercurio del anexo 10.7, La lámpara propiamente dicha permanece en el interior de un tubo de cuarzo perfectamente transparente a la radiación UVC, cuyas dimensiones deben ser mayores que las de la lámpara.

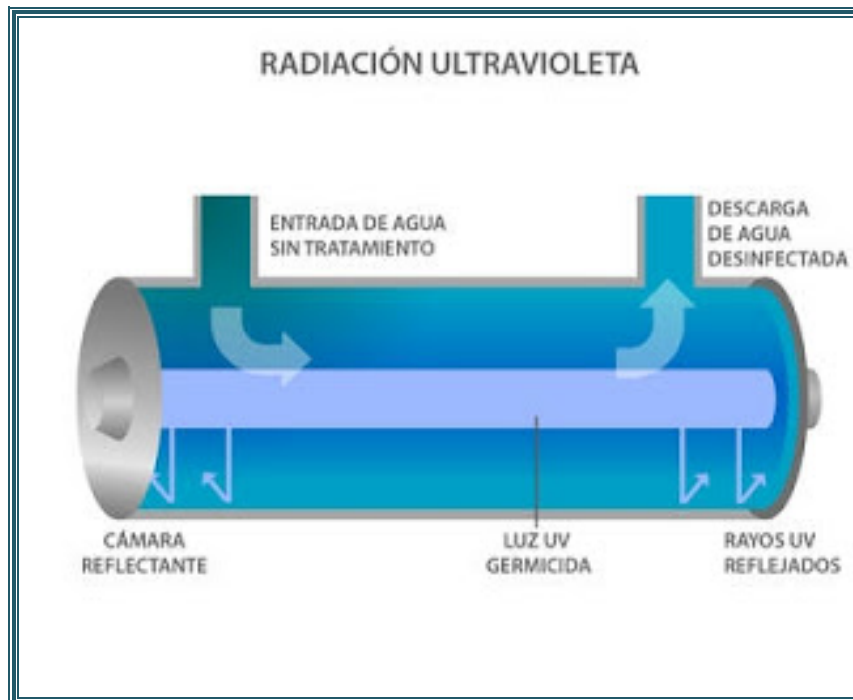


Figura 6.19 Esquema básico de un esterilizador de radiación UV.

Voy a suponer que tiene un diámetro externo de 2,5 cm. La longitud del arco eléctrico según las especificaciones de la lámpara es de 76,2 cm. De aquí se puede deducir que la potencia radiada al agua es 25 mW/cm^2 , ya que la superficie útil del tubo de cuarzo es de $A = 598.47 \text{ cm}^2$ y la potencia de la lámpara en UVC son 15 W.

Ahora se puede calcular con la fórmula [6.22] el tiempo de residencia necesario para conseguir la dosis de 40 mWs/cm^2 . Entonces $t_r = 1,6 \text{ s}$.

Con la fórmula [6.23] y sabiendo que el caudal de agua es de $2 \text{ m}^3/\text{h}$, el volumen por el que pasa el agua debe ser mayor de 889 cm^3 .

Como la longitud útil es la misma que la del tubo de cuarzo, finalmente llegamos a que el diámetro interno de la envolvente de la lámpara debe ser al menos de 3,7 cm. Habiendo una distancia entre el tubo de cuarzo y el de la carcasa de 0,6 cm.

Por tanto, la pérdida de carga es de $\Delta h = 2 \times 0,23 + 0,15 = 0,61$ mca (0,06 bar)

6.7.5. Filtración bacteriana.

Después de la lámpara ultravioleta como última barrera de protección, se instalarán dos filtros para agua ultrapura en paralelo, capaces de retener partículas de $0.03 \mu\text{m}$. Con estos filtros se pretende retener las bacterias en el caso de que apareciesen en el agua. Otra misión, y muy importante, sería retener las endotoxinas.

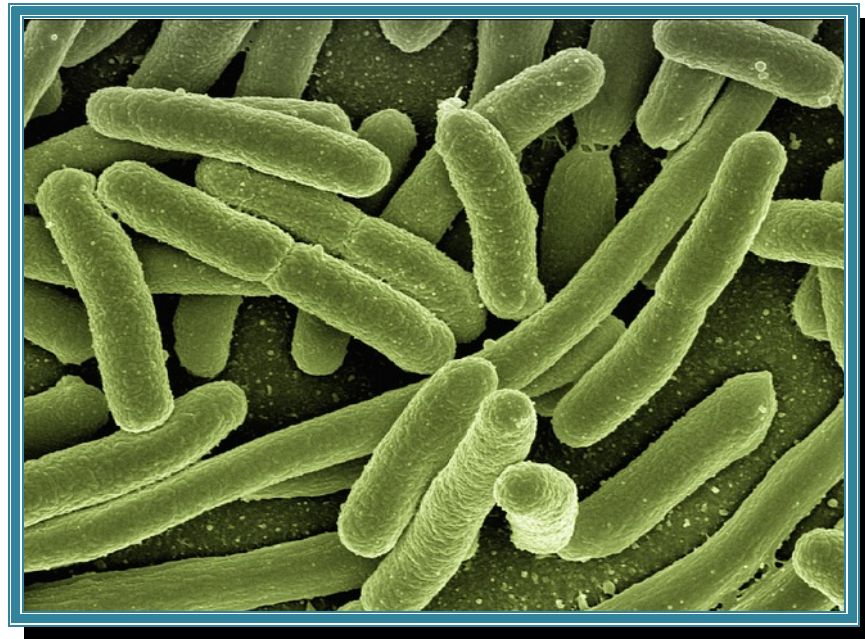


Figura 6.20 Fotografía de un grupo de bacterias *Escherichia Coli*.

El tamaño de las bacterias es muy variable, puede oscilar entre $0,1 \mu\text{m}$ a 1mm . La *Escherichia coli*, por ejemplo, como puede verse en la figura [], tiene forma cilíndrica y su longitud mayor es de $2 \mu\text{m}$. Para la mayoría de las bacterias bastaría un filtro de $0,4 \mu\text{m}$. No obstante se ha descubierto que algunas son capaces de atravesar filtros de $0,1 \mu\text{m}$.

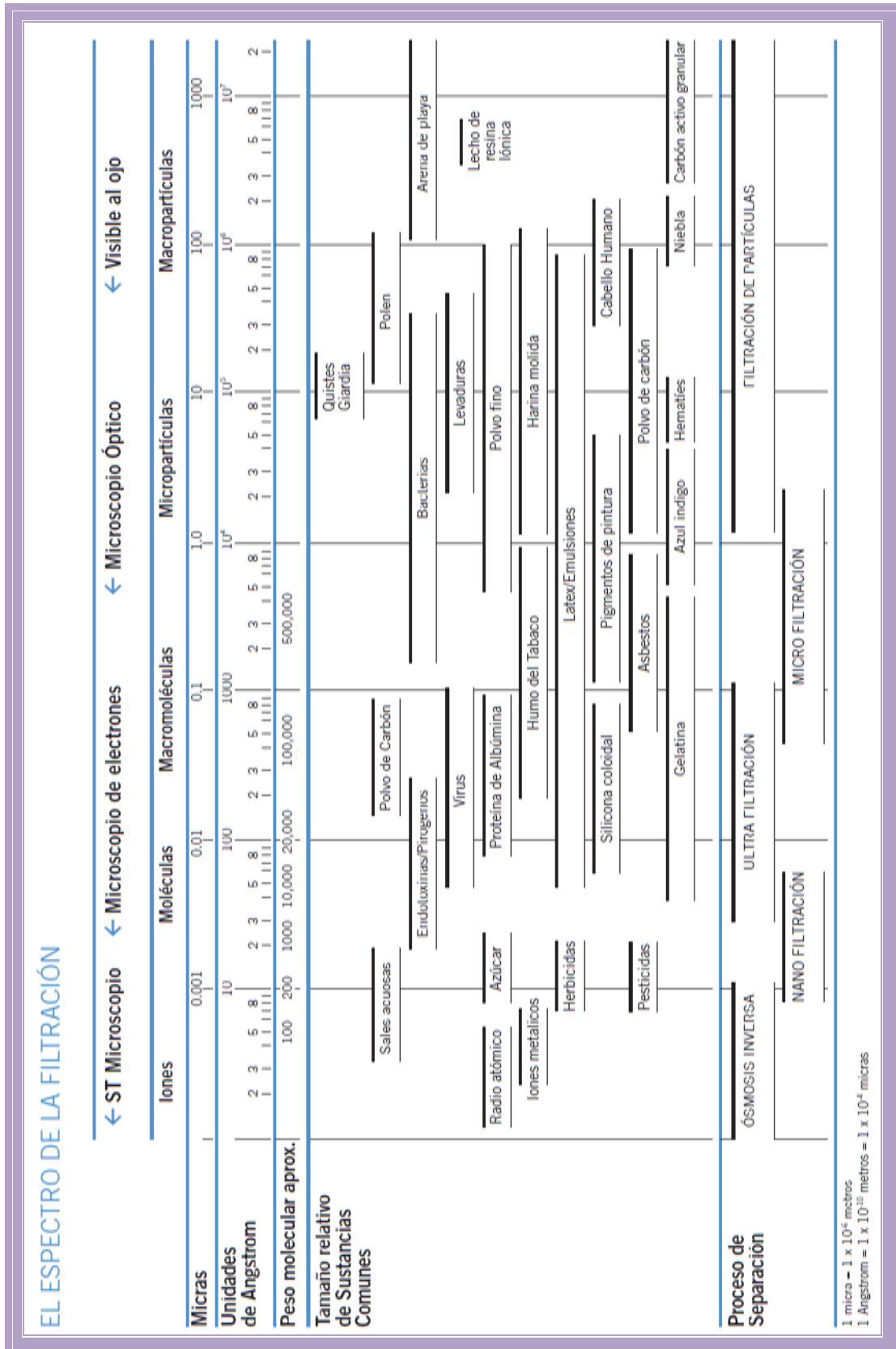


Figura 6.21 Tamaños de partículas y técnicas de filtración.

Para ilustrar con un ejemplo práctico esta etapa, he seleccionado un filtro de excelentes características, el ZTEC E de 0.03 μm , de la marca GRAVER TECHNOLOGIES, cuyas características pueden verse en el anexo xx.

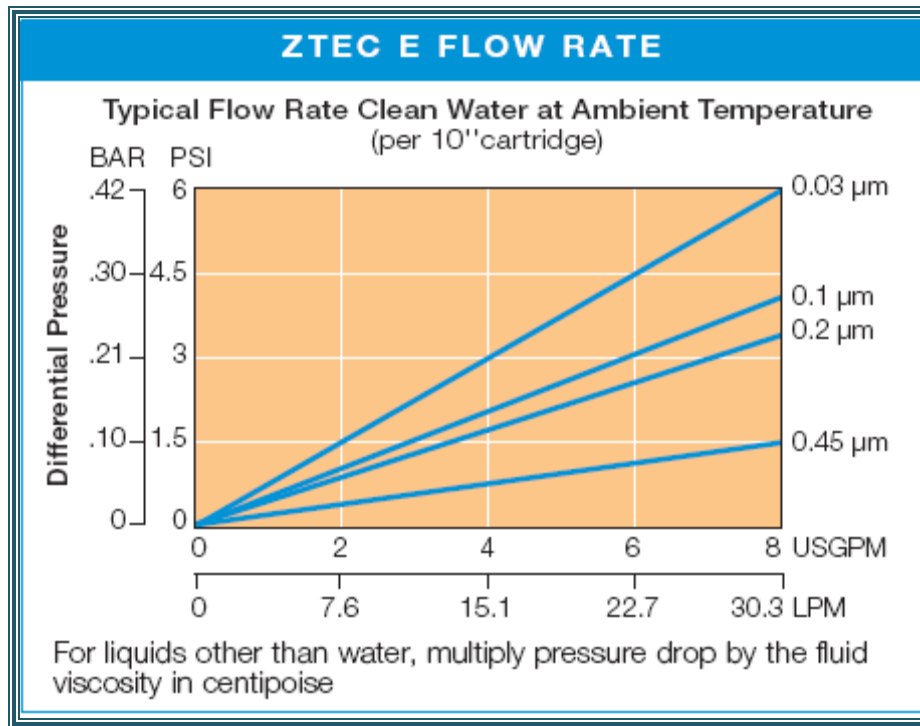


Figura 6.22. Diagrama de la pérdida de carga para los filtros de agua ultrapura.



Universidad de Valladolid

DISEÑO DE UNA PLANTA DE
PRODUCCIÓN DE AGUA PARA LÍQUIDO
DE DIÁLISIS.



ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES



7- CONCLUSIONES.



Universidad de Valladolid

DISEÑO DE UNA PLANTA DE
PRODUCCIÓN DE AGUA PARA LÍQUIDO
DE DIÁLISIS.



ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES



En este trabajo se ha conseguido:

- Seleccionar los tratamientos de agua más eficaces para el volumen y tipo de agua a tratar.
- Dimensionar un lecho de CAG de forma que sirva para retener otras sustancias que pueden atravesar las MOI.
- Dimensionar los equipos de forma optima.
- Dar solución al problema de la continuidad de suministro de agua.
- Definir a grandes rasgos el funcionamiento de una planta de agua para HD.



8- DESARROLLOS FUTUROS PROPUESTOS.



Universidad de Valladolid

DISEÑO DE UNA PLANTA DE
PRODUCCIÓN DE AGUA PARA LÍQUIDO
DE DIÁLISIS.



ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES



Desarrollos futuros propuestos:

- Habría que definir los tratamientos de agua específicos más adecuados para cada tipo de agua.
- Sería conveniente clasificar los distintos tipos de aguas en función del coste de producción del agua ultrapura.
- En la medida en que se vaya incorporando la desinfección por cloraminas en las ETAP, habría que revisar la idoneidad de los lechos de CAG que ya están instalados para su tratamiento.
- Igualmente sería necesario diseñar en un futuro los lechos de CAG normal o catalítico para retener la mayor cantidad posible de moléculas apolares y de bajo peso molecular que pueden atravesar las membranas de ósmosis inversa.
- Habría que estudiar la técnica de destrucción de cloraminas mediante luz UV, y quizás intentar aplicarla justo antes de la entrada de agua al monitor de HD.



Universidad de Valladolid

DISEÑO DE UNA PLANTA DE
PRODUCCIÓN DE AGUA PARA LÍQUIDO
DE DIÁLISIS.



ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES



9- BIBLIOGRAFÍA.



Universidad de Valladolid

DISEÑO DE UNA PLANTA DE
PRODUCCIÓN DE AGUA PARA LÍQUIDO
DE DIÁLISIS.



**ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES**

Bibliografía:

[1] Dow Water & Process Solutions, Filmtec reverse osmosis membranes technical manual.

[2] T. L. Champlin, R. A. Velasco, J. L. Karlskint, L. P. Furland, M. N. K., A. Glenn Greer, D. W. Yowell, and B. E. Kennedy, "Removal of chloramines by granular activated carbon", Florida water resources journal, July 2002.

[3] S. D. Faust, O. M. Aly, "Chemistry of water treatment", 2nd edition, Lewis publishers, ISBN: 1-57504-011-5.

[4] J. Kucera, "Reverse osmosis", Industrial applications and processes, Scrivener Wiley, ISBN: 978-0-470-618431.

[5] M. J. McGuire, J. H. Suffet, Treatment of water by granular activated carbon, advances in chemistry series 202, American chemical society 1983, ISBN: 0-8412-0665-1.

[6] W. L. McCabe, "Operaciones básicas de ingeniería química", Ed. Reverté, s.a. 1981, ISBN: 84-2917361-7 tomo I.

[7] W. L. McCabe, "Operaciones básicas de ingeniería química" volumen II, Ed. Reverté, s.a., 1968-1973-1975, ISBN: 84-291-7362-5 tomo II.

[8] Y. Mohammed I., Ariahu, C. C., Nkpa, N. N. and Igbabul, "Chlorine adsorption kinetics of activated carbon from selected local raw materials", b. d. journal of chemical engineering and materials science, vol. 3(2), pp. 23-29, March 2012.



[9] Á. Muelas Expósito, “Manual de utilización del software ”Rosa” para simulación de unidades de ósmosis inversa”, diciembre 2011, Escuela de Ingeniería y Arquitectura. Universidad Zaragoza.

[10] O. Levenspiel, “Flujo de fluidos, intercambio de calor”, Ed. Reverté, s.a. c.v., octubre 2004, ISBN: 978-84-291-7968-2.

[11] L. López Andrés, “Manual de hidráulica”, Publicaciones de la Universidad de Alicante, ISBN: 84-7908-320-4.

[12] F. Ramírez Quirós, “Desinfección del agua con cloro y cloraminas”, Técnica industrial 260, diciembre 2005.

[13] A. Rivera Ortiz, R. M. Ramírez Zamora, A. Durán Moreno “Pruebas rrsct con minicolumnas de carbon activado para remover materia organica natural (mon) presente en aguas naturales”, instituto de ingeniería, Unam, Mexico, D.F.

[14] M. Rigola Lapeña, “Tratamiento de aguas industriales: aguas de proceso y residuals”, Alfaomega marcombo boixareu editores, ISBN:84-267-0740-8.

[15] J. M. Rodríguez Mellado, “Problemas resueltos de química de aguas”, Servicio de publicaciones de la Universidad de Córdoba, 2014, ISBN: 978-84-9927-159-0.

[16] M. J. Rodríguez, G. Rodríguez, J. Serodes y R. Sadiq “Subproductos de la desinfección del agua potable: formación, aspectos sanitarios y reglamentación ”, interciencia, nov 2007, vol. 32 nº 11.

[9] J. Saldarriaga, “Hidráulica de tuberías”, Alfaomega Bogotá, D.C. 2007, ISBN: 978-958-682-680-8.



[17] H. Tung, R. F. Unz, and Y. F. Xie Haa, “Removal by gas adsorption”, journal awwa, june 2006.

[18] W. J. Weber, JR, “Control de la calidad del agua. procesos fisicoquímicos”, Ed reverté, s.a. 1979. ISBN: 978-84-291-7522-6.

[19] F. Zeinali, A. A. Ghoreyshi, and G. D. Najafpour, “Adsorption of dichloromethane from aqueous phase using granular activated carbon: isotherm and breakthrough curve measurements”, Middle-east journal of scientific research 5 (4): 191-198, 2010.

Páginas web:

Fecha de consulta 12/2/2015 <http://www.lenntech.es>

Fecha de consulta 20/12/2014 http://dardel.info/IX/water_ES.html

Fecha de consulta 19/1/2015 <http://www.dow.com/iberica/es>

Fecha de consulta 12/8/2015 www.philips.es

Fecha de consulta 16/7/2015 www.gravertech.com



Universidad de Valladolid

DISEÑO DE UNA PLANTA DE
PRODUCCIÓN DE AGUA PARA LÍQUIDO
DE DIÁLISIS.



ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES

10- ANEXOS.



Universidad de Valladolid

DISEÑO DE UNA PLANTA DE
PRODUCCIÓN DE AGUA PARA LÍQUIDO
DE DIÁLISIS.



ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES

Anexo 10.1

Norma UNE 111-301-90. Características del agua utilizada en hemodiálisis

Comité Técnico AENOR

1. Objeto y campo de aplicación

Esta norma tiene por objeto establecer los requisitos que debe cumplir el agua para ser empleada en hemodiálisis en el punto de consumo, para la obtención del líquido de diálisis, así como los ensayos y la frecuencia que permitan la verificación de los mismos.

Queda excluido del contenido técnico de esta norma todo lo referente al agua empleada en el proceso de fabricación industrial de los concentrados de hemodiálisis, los líquidos empleados en diálisis peritoneal y el líquido de reposición para hemofiltración.

Asimismo, quedan excluidos los sistemas para la obtención de este agua, su almacenamiento y distribución.

2. Características de calidad del agua

2.1. Componentes químicos

Los niveles máximos recomendados deberán ser:

Calcio	2	mg/l como calcio
Magnesio	4	mg/l como magnesio
Sodio	70	mg/l como sodio
Potasio	8	mg/l como potasio
Cloro	0,5	mg/l como cloro
Cloraminas	0,1	mg/l como cloro
Flúor	0,2	mg/l como flúor
Nitratos	2	mg/l como nitrógeno
Sulfatos	100	mg/l como sulfato
Aluminio	0,01	mg/l como aluminio
Cobre	0,1	mg/l como cobre
Bario	0,1	mg/l como bario
Cinc	0,1	mg/l como cinc
Arsénico	0,005	mg/l como arsénico
Plomo	0,005	mg/l como plomo
Cromo	0,014	mg/l como cromo
Cadmio	0,001	mg/l como cadmio
Selenio	0,09	mg/l como selenio
Plata	0,005	mg/l como plata
Mercurio	0,0002	mg/l como mercurio

La determinación analítica de estos niveles recomendados como máximos se realizará por los métodos que

puedan ofrecer mayor precisión y exactitud y con una repetitividad suficientemente probada.

2.2. Componentes bacteriológicos

El contaje de colonias debe ser inferior a 200 colonias por mililitro.

3. Controles

La vigilancia de la calidad del agua debe fijarse por la periodicidad en los controles.

Debe existir un resistivímetro que controle en continuo la resistividad del agua que se utiliza.

Se recomienda que la resistividad¹ sea igual o superior a:

– 10.000 $\Omega \times \text{cm}^2/\text{cm}^1$ cuando el agua proceda de un tratamiento de desmineralización por ósmosis inversa.

– 400.000 $\Omega \times \text{cm}^2/\text{cm}^1$ cuando el agua proceda de un tratamiento de desmineralización por resinas de intercambio iónico.

Las resistividades¹ que se recomiendan son para el control de los equipos de producción de agua. En la puesta en marcha de las instalaciones se debe comprobar que los niveles máximos recomendados de componentes químicos no se rebasen y a su vez se debe medir la resistividad¹ del agua producida. Esta resistividad¹ será la pauta para la vigilancia de la instalación.

Además del control en continuo de la resistividad¹, es conveniente establecer los controles que a continuación se citan, para la vigilancia permanente del agua que se utiliza:

- Control diario de la dureza.
- Control diario del contenido en cloro.
- Control diario del contenido en cloraminas.
- Control mensual del contaje bacteriano.
- Control semestral del contenido en aluminio.

Al ponerse en marcha la instalación es conveniente realizar las comprobaciones citadas con mayor frecuencia, a fin de verificar la eficacia de los equipos y determinar una secuencia en las posibles desinfecciones.

¹ O su equivalente en conductividad.



COMITE TECNICO AENOR

Bibliografía

Directivas del Consejo: 65/65/EEC (OJ N.º 229, 2, 1965, pp. 365-369); 75/318/EEC OJ N.º L147, 9.6.1975, p. 1); 75/319/EEC (OJ N.º L147, 9.6.1975, p. 13).

American National Standard for Hemodialysis Systems. Approved 14 May 1982 by American National Standards Institute, Inc.

AAMI Standards for Hemodialysis Systems. ANSI/AAMI. RD5. 1981.

Canadian Standards Association. Z364.2.2 Water Treatment Equipment and Water Quality Requirement for Hemodialysis. Second draft July, 1984; Oct., Revisions Resulting from Meeting 13, 1984; Feb., Revisions Resulting from Public Review, 1985.

Diario oficial de las Comunidades Europeas N.º C150/6, pp. 6-15, 20.6.85.

Measuring picogram amounts of aluminium in biological tissue by flameless atomic absorption analysis of a chelate. Le Gendre, GR and Alfrey AC, *Clin Chem*, 22:53, 1976 (a).

Methods for Chemical Analysis of Water and Wastes (PB84-128677). Cincinnati, OH.: Environmental Monitoring and Support Laboratory, 1983 (b).

Standard methods for the Examination of Water and Wastewater (16thed.) (APHA N.º 038). Washington, D.C.: American Public Health Association, 1985 (c).

Test Methods for Evaluation of Solid Waste, Physical/Chemical Methods Technical. Update (PB82-172156). Washington, D.C.: U.S. Environmental Protection Agency (EPA), 1982 (d).

Anexo 10.2

SUPAGARD

Características

Filtro de profundidad fabricado con la última tecnología en el desarrollo de microfibras sinterizadas. Fabricado 100% de polipropileno sobre núcleo que lo refuerza para soportar altos diferenciales de presión.

Mínima pérdida de carga y una excelente capacidad de retención de suciedad.

Filtro ideal para la prefiltración en la protección de membranas de Osmosis Inversa.

Producto con Guía de Validación.



Especificaciones

Producto		SUPAGARD										
Micraje (μm)		0.5	1	5	10	20	30	50	75	100	150	200
Grado eficiencia		Nominal										
Dimensiones	Longitud (mm)	125 / 251 / 508 / 762 / 1016 *consultar otras medidas										
	\varnothing Exterior (mm)	64 y 116 para B-Blue										
	\varnothing Interior (mm)	28										
Materiales	Medio filtrante	Polipropileno										
	Núcleo	Polipropileno										
	Extremos	Polipropileno										
	Juntas	Silicona / EPDM / Viton / FEP Encapsulado silicona										
Máximo Δp (Bar)		4 Bar a 20°C - 1.5 Bar a 50°C - 0.25 Bar a 80°C										
Máx. temperatura trabajo (°C)		80°C										
Fabricado por		Amazon Filters Ltd. - Reino Unido										

Aplicaciones

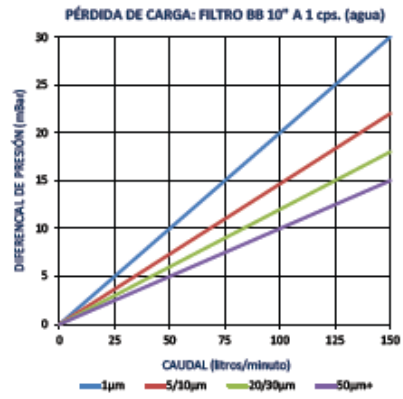
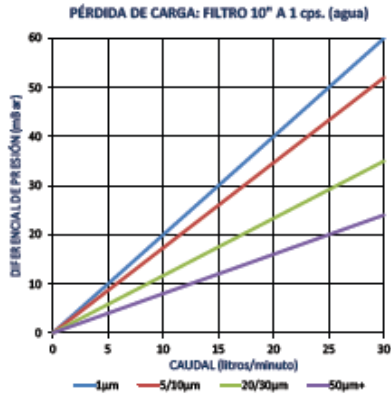
Aceites industriales
Alcoholes
Baños galbánicos
Circuitos refrigeración
Emuls. fotográficas

Fertilizantes líquidos
Hidrocarburos
Lejías
Quelatos
Tensoactivos

Ácidos
Bases
Disolventes
Agua mineral
Licores

Zumos
Aguas de proceso
Aceites esenciales
Lociones
Pretfiltración Osmosis Inversa

Caudales



IMPORTANTE: Esta información ha sido obtenida mediante la traducción del catálogo del fabricante, el cual se reserva el derecho de cambiar características del producto sin previo aviso
 VS01-XH-RVAH0113



EMPRESA CON EL SISTEMA DE CALIDAD CERTIFICADO POR DNV GL
 = ISO 9001 =

Av. Cerdanyola, 92-94 Local B4 - 08173 Sant Cugat del Vallès | BARCELONA | Tel.: 93 592 15 54 - Fax.: 93 691 45 18 | www.gesfilter.com

Anexo 10.3

Siata

V250



V250

V250

PRESSIONE

- Pressione di esercizio: _____ da 1.5 a 6 bar
- Resistenza statica alla pressione: _____ 22 bar

PORTATA

- Portata di esercizio (Delta P = 1 bar): _____ 21 mc/h
- Portata di lavaggio in controcorrente: _____ max 12 mc/h
- Portata del lavaggio lento: _____ da 300 a 1000 lt/h
- Portata lavaggio veloce in equicorrente: _____ max 14 mc/h

QUANTITATIVO MAX DI RESINA RIGENERABILE: _____ 500 lt

TEMPERATURA DI ESERCIZIO: _____ da 5 a 40° C

MATERIALE CORPO VALVOLA: _____ ABS + FV

RIGENERAZIONE IN EQUI-CORRENTE

- Cicli regolabili: _____ a seconda del timer
- Durata Massima disponibile: _____ a seconda del timer

POTENZA ELETTRICA _____ vedi timer

CICLI DELLA RIGENERAZIONE

- 1) Controlavaggio _____ contro-corrente
- 2) Aspirazione _____ equi-corrente
- 3) Lavaggio Lento _____ equi-corrente
- 4) Lavaggio Rapido + Salamoia _____ equi-corrente
- 5) Servizio _____ equi-corrente

DIMENSIONI

- Attacco Bombola: _____ 4" 8UN
- Tubo distributore: _____ Ø 50 mm
- Conduffura allo scarico: _____ ISO Ø 40 mm maschio
- Conduffura alla salamoia: _____ ISO Ø 16 mm

RACCORDI INGRESSO/USITA DISPONIBILI

- raccordo pvc 2 1/4" - ISO d. 50 femmina/femmina incollaggio
- raccordo pvc 2 1/4" - 1 1/2" femmina/maschio
- raccordo ottone 2 1/4" - 1 1/2" femmina/maschio
- raccordo ottone 2 1/4" - 2" femmina/maschio

ACCESSORI/OPZIONI

- Valvola filtro
- Valvola per impianti di Demineralizzazione
- Valvola Salamoia TD0145 o TD0145-A
- By-Pass acqua grezza in servizio (valvola instabile)
- No By-Pass Acqua grezza in servizio (valvola controlavaggio)
- No By-Pass Acqua grezza in rigenerazione (a seconda del timer e in abbinamento a valvola idropneumatica)

CERTIFICATI

- Conformità al DM 174 del 06/04/2004
- 2002/95/EC (RoHS)

PRESSIONE

- Operating Pressure: _____ from 1.5 to 6 bar
- Static resistance to pressure: _____ 22 bar

FLOW RATE

- Service Flow rate (1 bar drop): _____ 21 mc/h
- Backwash: _____ max 12 mc/h
- Slow rinse: _____ from 300 to 1000 lt/h
- Fast rinse: _____ max 14 mc/h

MAXIMUM QUANTITY OF REGENERATIVE RESIN: _____ 500 lt

OPERATING TEMPERATURE: _____ from 5 to 40° C

VALVE MATERIAL: _____ ABS + FV

DOWNFLOW REGENERATION

- Adjustable cycles: _____ depend on the timer
- Time available: _____ depend on the timer

ELECTRICAL RATE _____ see timers

REGENERATION CYCLE

- 1) Backwash _____ Upflow
- 2) Brine _____ Downflow
- 3) Slow Rinse _____ Downflow
- 4) Rapid Rinse + Brine Refill _____ Downflow
- 5) Servizio _____ Downflow

DIMENSIONS

- Mounting base: _____ 4" 8UN
- Distributor pilot: _____ Ø 50 mm
- Drain line: _____ ISO Ø 40 mm male
- Brine line: _____ ISO Ø 16 mm

PIPING FITTING IN/OUT AVAILABLE (BAYONET)

- pvc fitting 2 1/4" - ISO d. 50 female/female to be glue
- pvc fitting 2 1/4" - 1 1/2" female/male
- brass fitting 2 1/4" - 1 1/2" female/male
- brass fitting 2 1/4" - 2" female/male

ACCESSORIES/OPTIONS

- Filter Valve
- Demineralization Valve
- Brine Valve TD0145 o TD0145-A
- By-Pass raw water in service (instabil valve)
- No By-Pass raw water in service (manifold valve)
- No By-Pass raw water in regeneration (depend on the timer and with idropneumatic valve)

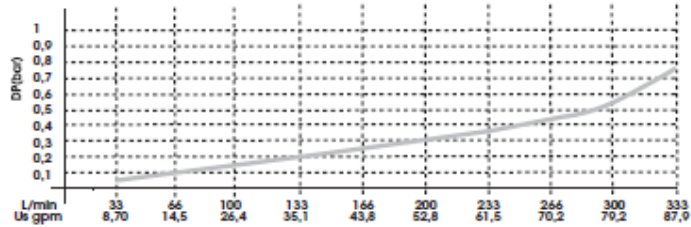
CERTIFICATES

- DM 174 DD April 06, 2004 compliance
- 2002/95/EC (RoHS)

V250

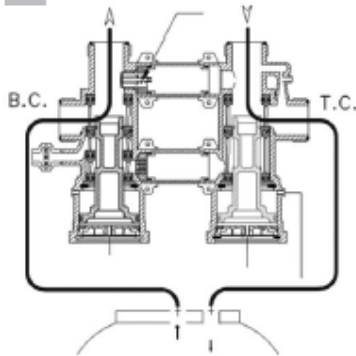
Siata

PORTATA DI SERVIZIO/SERVICE FLOW RATE

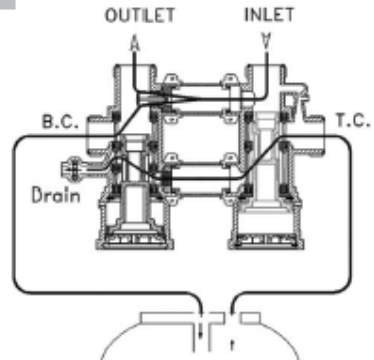


SCHEMI DI FLUSSO/FLOW DIAGRAMS

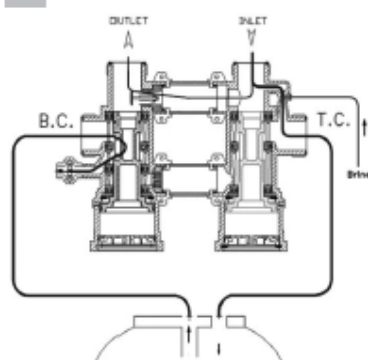
1 SERVIZIO/SERVICE



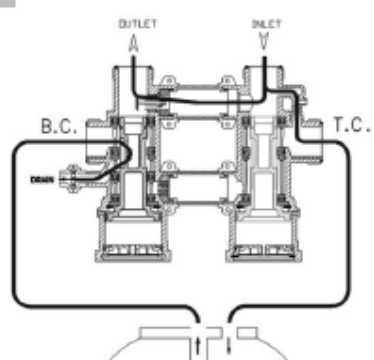
2 CONTROLAVAGGIO/BACHWASH



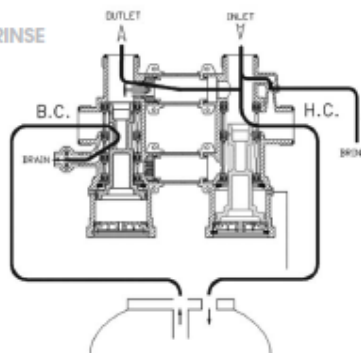
3 ASPIRAZIONE/SUCTION



4 LAVAGGIO LENTO/SLOW RINSE



5 LAVAGGIO RAPIDO/FAST RINSE





Anexo 10.4

Product Data Sheet



DOWEX™ MARATHON™ C Resin

Uniform Particle Size, High Capacity Cation Exchange Resin

For Softening (Industrial and Residential) and Demineralization Applications

Description

DOWEX™ MARATHON™ C Strong Acid Cation Exchange Resin is a uniform particle size resin designed for use in industrial and residential softening and demineralization applications. The small uniform beads exhibit faster kinetics than conventionally sized resins. The improved kinetics typically results in improved regeneration efficiency, higher operating capacity, reduced regenerant usage and less waste water.

DOWEX MARATHON C Resin also shows exceptional stability to compressive and osmotic stress.

Typical Physical and Chemical Properties

Physical Form		Amber translucent spherical beads	
Matrix		Styrene-DVB, gel	
Functional group		Sulfonic acid	
Ionic form as shipped		Na⁺ form	H⁺ form
Total volume capacity, min.	eq/L kg/ft ³ as CaCO ₃	2.0 43.7	1.8 39.3
Moisture retention capacity	%	42–48	50–56
Particle size†			
Uniformity coefficient, max.		1.1	1.1
Harmonic mean diameter		μm	600 ± 50
Whole uncracked beads		%	95–100
Total swelling (Na ⁺ → H ⁺)		%	8
Particle density		g/mL	1.20
Shipping density**		g/L lbs/ft ³	820 51
			800 50

† For additional particle size information, please refer to Particle Size Distribution Cross Reference Chart (Form No. 177-01775).

**As per the backwashed and settled density of the resin, determined by ASTM D-2187

Suggested Operating Conditions

Maximum operating temperature	120°C (250°F)
pH range	0–14
Bed depth, min.	800 mm (2.6 ft)
Flow rates:	
Service/fast rinse	5–60 m/h (2–24 gpm/ft ²)
Backwash	See Figure 1
Co-current regeneration/displacement rinse	1–10 m/h (0.4–4 gpm/ft ²)
Counter-current regeneration/displacement rinse	5–20 m/h (2–8 gpm/ft ²)
Total rinse requirement	2–5 BV*
Regenerant	1–8% H ₂ SO ₄ , 4–8% HCl or 8–12% NaCl

*1 BV (Bed Volume) = 1 m³ solution per m³ resin or 7.5 gals per ft³ resin



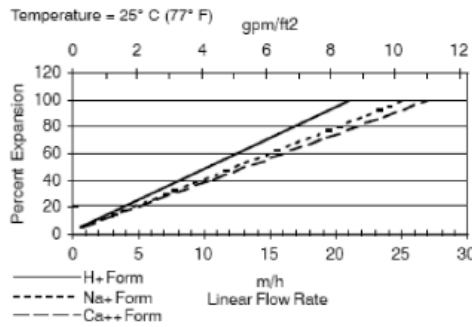
Packaging

25 liter bags or 5 cubic feet fiber drums

Hydraulic Characteristics

Figure 1 shows the bed expansion of DOWEX™ MARATHON™ C Resin as a function of backwash flowrate and water temperature. Figure 2 shows the pressure drop data for DOWEX MARATHON C Resin as a function of service flow rate and water temperature. Pressure drop data are valid at the start of the service run with clear water and a correctly classified bed.

Figure 1. Backwash Expansion Data

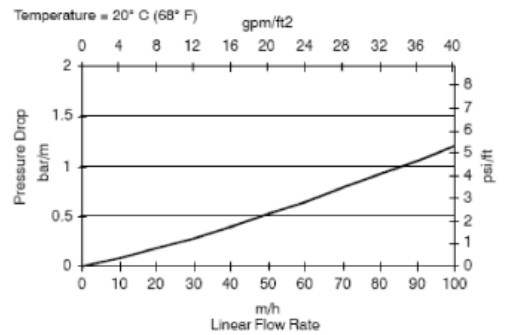


For other temperatures use:

$$F_T = F_{77°F} [1 + 0.008 (T_F - 77)], \text{ where } F \equiv \text{gpm/ft}^2$$

$$F_T = F_{25°C} [1 + 0.008 (1.8T_C - 45)], \text{ where } F \equiv \text{m/h}$$

Figure 2. Pressure Drop Data



For other temperatures use:

$$P_T = P_{20°C} / (0.026 T_C + 0.48), \text{ where } P = \text{bar/m}$$

$$P_T = P_{68°F} / (0.014 T_F + 0.05), \text{ where } P = \text{psi/ft}$$



Product Stewardship

Dow has a fundamental concern for all who make, distribute, and use its products, and for the environment in which we live. This concern is the basis for our product stewardship philosophy by which we assess the safety, health, and environmental information on our products and then take appropriate steps to protect employee and public health and our environment. The success of our product stewardship program rests with each and every individual involved with Dow products - from the initial concept and research, to manufacture, use, sale, disposal, and recycle of each product.

Customer Notice

Dow strongly encourages its customers to review both their manufacturing processes and their applications of Dow products from the standpoint of human health and environmental quality to ensure that Dow products are not used in ways for which they are not intended or tested. Dow personnel are available to answer your questions and to provide reasonable technical support. Dow product literature, including safety data sheets, should be consulted prior to use of Dow products. Current safety data sheets are available from Dow.

DOW™ Ion Exchange Resins
For more information about DOW™ resins, call the Dow Water & Process Solutions business:

North America: 1-800-447-4369
Latin America: (+55) 11-5188-9222
Europe: (+32) 3-450-2240
Pacific: +60 3 7958 3392
Japan: +813 5460 2100
China: +86 21 2301 1000
<http://www.dowwaterandprocess.com>

Warning: Oxidizing agents such as nitric acid attack organic ion exchange resins under certain conditions. This could lead to anything from slight resin degradation to a violent exothermic reaction (explosion). Before using strong oxidizing agents, consult sources knowledgeable in handling such materials.

NOTICE: No freedom from infringement of any patent owned by Dow or others is to be inferred. Because use conditions and applicable laws may differ from one location to another and may change with time, Customer is responsible for determining whether products and the information in this document are appropriate for Customer's use and for ensuring that Customer's workplace and disposal practices are in compliance with applicable laws and other government enactments. The product shown in this literature may not be available for sale and/or available in all geographies where Dow is represented. The claims made may not have been approved for use in all countries. Dow assumes no obligation or liability for the information in this document. References to "Dow" or the "Company" mean the Dow legal entity selling the products to Customer unless otherwise expressly noted. NO WARRANTIES ARE GIVEN; ALL IMPLIED WARRANTIES OF MERCHANTABILITY OR FITNESS FOR A PARTICULAR PURPOSE ARE EXPRESSLY EXCLUDED.





Anexo 10.5



PRODUCT BULLETIN CENTAUR® 12x40 GRANULAR ACTIVATED CARBON

DESCRIPTION

CENTAUR® 12x40 is a liquid phase virgin activated carbon that has been manufactured to develop catalytic functionality.† The product is unique in that it concentrates reactants via adsorption and then promotes their reaction on the surface of the pores. CENTAUR 12x40 is produced from bituminous coal using a patented process. Although it is not impregnated with metals or alkali, it displays the catalytic functionality of these materials. In most cases, it can be reactivated and does not present the disposal concerns associated with impregnated carbons.

APPLICATIONS

CENTAUR 12x40 can be utilized in the liquid phase for the promotion of oxidation, reduction, decomposition, substitution, and elimination reactions. Specific applications include chloramine, hydrogen sulfide, and iron removal from drinking water. This product is particularly suited for use in residential and commercial water filters, for treatment of process water in the bottling and soft drink industries, and for aquarium water treatment. CENTAUR 12x40 combines a fine pore structure for enhanced adsorption of trace contaminants with high catalytic activity for their elimination. Thermal reactivation is an option for recycle and reuse of this product to minimize operating costs and eliminate disposal concerns.

DESIGN CONSIDERATIONS

CENTAUR 12x40 is intended primarily for use in liquid phase systems to promote catalytic reactions. Depending on the reactant concentrations, the required contact times are usually less than five minutes. The backwashed and drained density of the product is typically 33 lb/ft³. For additional information, please contact the Calgon Carbon sales office in your region.

PACKAGING

33 lb (15.0 kg) Kraft bags

† Purchase of this product from Calgon Carbon Corporation includes a licence under the following U.S. Patents: Numbers 5356849 and 5494869

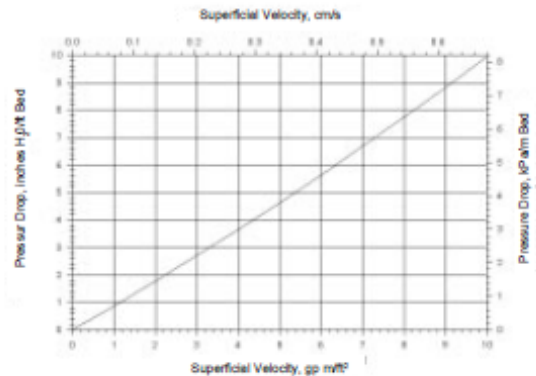
PROPERTIES

Table with 2 columns: Property and Value. Properties include Peroxide No., Iodine No., Ash, Moisture, Abrasion No., and Apparent Density.

*Peroxide number utilizes the rate of decomposition of hydrogen peroxide by the carbon and is an indicator of the amount of catalytic activity.

PRESSURE DROP CURVE

NOMINAL PRESSURE DROP LIQUID DOWNFLOW THROUGH CENTAUR 12x40



MANUFACTURING

Catlettsburg, KY





FEATURES

BENEFITS

- | | |
|-----------------------------------|---|
| • Catalytic Activity | • Smaller system size; lower capital requirements |
| • Not Impregnated | • No safety concerns with exotherms or toxicity |
| • Improved Trace Organic Capacity | • More capacity per unit volume; lower use rates |
| • High Hardness | • Reduced fines and handling losses |
| • Works at Low Oxidant Levels | • Wide applicability; can eliminate chemical addition |
| • Simple Equipment Design | • Reliable; handles spikes in concentration; no metering of chemicals |
| • Reduced Carbon Requirements | • Reduces operating costs |
| • Enhanced Performance | • Achieves greater degree of contaminant removal at reduced costs |

SAFETY MESSAGE

Wet activated carbon preferentially removes oxygen from air. In closed or partially closed containers and vessels, oxygen depletion may reach hazardous levels. If workers are to enter a vessel containing carbon, appropriate sampling and work procedures for potentially low oxygen spaces should be followed, including all applicable federal and state requirements.

1-800-4-CARBON

Domestic Sales Offices

Region I

Bridgewater, NJ
Tel (908) 526-4646
Fax (908) 526-2467

Region II

Pittsburgh, PA
Tel (412) 787-6700
1-800-4-CARBON
Fax (412) 787-6676

Region III

Richmond, CA
Tel (510) 412-1010
Fax (510) 412-5660

Region IV

Houston, TX
Tel (713) 690-2000
Fax (713) 690-7909

International Sales Offices

Australasia/Philippines/ Southeast Asia

Calgon Carbon Asia
Singapore Office
Tel (65) 221-3500
Fax (65) 221-3554

Canada

Calgon Carbon Canada, Inc.
Bolton, Ontario
Tel (905) 857-9915
Fax (905) 857-9984

China/Korea/Taiwan

Calgon Carbon Asia
Tokyo Office
Tel 81 3 3560 7505
Fax 81 3 3584 7202

Europe

Chemviron Carbon
B-1200 Brussels, Belgium
Tel 32 2 773 02 11
Fax 32 2 770 93 94

Japan

Calgon Far East
Tokyo Office
Tel 81 3 3582 1861
Fax 81 3 3586 9266

Latin America

Pittsburgh, PA
Tel (412) 787-4519
Fax (412) 787-4523

Calgon Carbon Corporation's activated carbon products are continuously being improved and changes may have taken place since this publication went to press.



CALGON CARBON CORPORATION

Anexo 10.6

Product Information



DOW FILMTEC Membranes

RO Elements for Sanitary Applications

Features

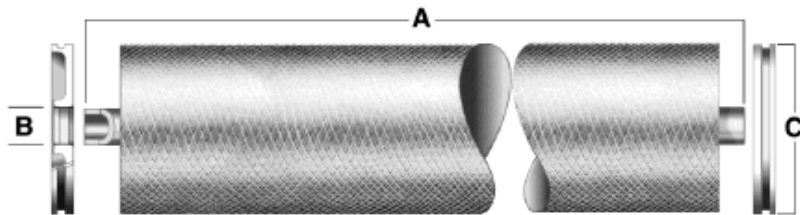
DOW FILMTEC™ RO reverse osmosis membrane elements deliver high flux and outstanding quality water for applications requiring sanitary grade membrane elements. The full-fit configuration minimizes stagnant areas and is optimal for applications requiring a sanitary design. All components comply with FDA standards.

Product Specifications

Product	Part Number	Active Surface Area ft ² (m ²)	Stabilized Permeate Flow Rate gpd (m ³ /d)	Typical Stabilized Salt Rejection (%)
RO-4040-FF	84286		2,400 (9.1)	99.5
RO-390-FF	116314 / 100608	390 (36)	10,800 (40.9)	99.5

1. RO-4040-FF was previously named BW30-4040-LW.
2. RO-390-FF replaces BW30-380-LW and BW30-8040-LW.
3. Permeate flow and salt rejection based on standard conditions: 2,000 ppm NaCl, 225 psi (16 bar), 77°F (25°C), pH 8 and 15% recovery.
4. Minimum stabilized salt rejection is 98.0%.

Figure 1



Product	Dimensions – Inches (mm)		
	A	B	C
RO-4040-FF	40.0 (1,016)	0.75 OD (19)	3.9 (99)
RO-390-FF	40.0 (1,016)	1.125 ID (28.58)	7.9 (200)

1 inch = 25.4 mm

Operating Limits

- | | |
|--|-------------------------|
| • Membrane Type | Thin-Film Composite |
| • Maximum Operating Temperature | 113°F (45°C) |
| • Maximum Operating Pressure | 600 psi (41 bar) |
| • Maximum Differential Pressure | 15 psi (1.0 bar) |
| • Maximum Feed Turbidity | 1 NTU |
| • Free Chlorine Tolerance | Below Detectable Limits |
| • pH Range, Continuous Operation | 3 – 10 |
| • pH Range, Short-Term Cleaning (30 min.)* | 1 – 12 |
| • Maximum Feed Silt Density Index (SDI) | 5 |

* Refer to Cleaning Guidelines in specification sheet 609-23010.



Important Information

Proper start-up of reverse osmosis water treatment systems is essential to prepare the membranes for operating service and to prevent membrane damage due to overfeeding or hydraulic shock. Following the proper start-up sequence also helps ensure that system operating parameters conform to design specifications so that system water quality and productivity goals can be achieved.

Before initiating system start-up procedures, membrane pretreatment, loading of the membrane elements, instrument calibration and other system checks should be completed.

Please refer to the application information literature entitled "Start-Up Sequence" (Form No. 609-00298) for more information.

Operation Guidelines

Avoid any abrupt pressure or cross-flow variations on the spiral elements during start-up, shutdown, cleaning or other sequences to prevent possible membrane damage. During start-up, a gradual change from a standstill to operating state is recommended as follows:

- Feed pressure should be increased gradually over a 30-60 second time frame.
- Cross-flow velocity at set operating point should be achieved gradually over 15-20 seconds.
- Permeate obtained from first hour of operation should be discarded.

General Information

- Keep elements moist at all times after initial wetting.
- If operating limits and guidelines given in this bulletin are not strictly followed, the limited warranty will be null and void.
- To prevent biological growth during prolonged system shutdowns, it is recommended that membrane elements be immersed in a preservative solution.
- The customer is fully responsible for the effects of incompatible chemicals and lubricants on elements.
- Maximum pressure drop across an entire pressure vessel (housing) is 60 psi (4.1 bar).
- Avoid permeate-side backpressure at all times.



Certified to NSF/ANSI 61

These products are listed to NSF/ANSI 61. For more information visit: <http://www.nsf.org/Certified/PwsComponents/Listings.asp?Company=0N280&Standard=061>

DOW FILMTEC™ Membranes
For more information about DOW FILMTEC membranes, call the Dow Water & Process Solutions business:
North America: 1-800-447-4369
Latin America: (+55) 11-5188-9222
Europe: (+32) 3-450-2240
Pacific: +60 3 7958 3392
Japan: +813 5460 2100
China: +86 21 2301 1000
www.dowwaterandprocess.com

Notice: The use of this product in and of itself does not necessarily guarantee the removal of cysts and pathogens from water. Effective cyst and pathogen reduction is dependent on the complete system design and on the operation and maintenance of the system.

Notice: No freedom from any patent owned by Dow or others is to be inferred. Because use conditions and applicable laws may differ from one location to another and may change with time, Customer is responsible for determining whether products and the information in this document are appropriate for Customer's use and for ensuring that Customer's workplace and disposal practices are in compliance with applicable laws and other government enactments. Dow assumes no obligation or liability for the information in this document. NO WARRANTIES ARE GIVEN; ALL IMPLIED WARRANTIES OF MERCHANTABILITY OR FITNESS FOR A PARTICULAR PURPOSE ARE EXPRESSLY EXCLUDED.



Anexo 10.7



TUV T5

TUV 36T5 SP UNP

Lámparas de descarga de vapor de mercurio a baja presión con ampolla tubular de cristal en el formato pequeño T5

Datos del producto

• Características Generales

Descripción del Sistema	High Efficiency
Base/Casquillo	Una patilla
Información Base/Casquillo	Una patilla
Forma de la lámpara	T16
Aplicación Principal	Desinfección
Vida útil	9000 hr

• Características de la Fuente de Luz

Código de Color	-
Designación de Color	-

• Características Eléctricas

Pot. de la Lámpara Estimada	40 W
Potencia Técnica de la Lámpara	40 W
Voltaje de la Lámpara	94 V
Corriente de la Lámpara	0.425 A

• Características relativas a UV

Radiación UVC	15 W
---------------	------

• Características de Dimensiones

Longitud de la Referencia A	845.4 (max) mm
Longitud Total C	863.9 (max) mm
Diámetro D	19 (max) mm
Longitud de Arco O	762 mm

• Datos Producto

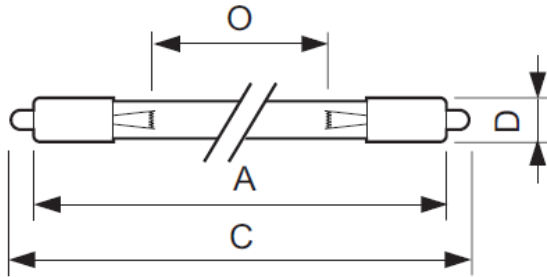
Código de pedido	640369 99
Código de producto	871150064036999
Nombre de Producto	TUV 36T5 SP UNP
Nombre de pedido del producto	TUV 36T5 SP UNP/32
Piezas por caja	1
Configuración de embalaje	32
Cajas por caja exterior	32
Código de barras del producto	8711500640369
Código de barras de la caja exterior	8711500640376
Código logístico - 12NC	927970004099
Peso neto por pieza	87.000 gr

PHILIPS



TUV T5

Plano de dimensiones



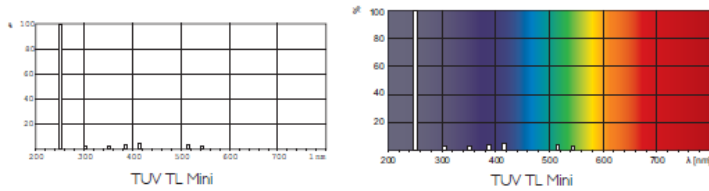
TUV 36T5 SP UNP

Product	A (Min)	A (Norm)	A (Max)	B (Min)	B (Norm)	B (Max)	C (Min)	C (Norm)	C (Max)	D (Max)	O (Norm)
TUV 36T5 HE SP	-	-	845.4	-	-	-	-	-	863.9	18.6	762



TUV T5

Datos fotométricos



© 2014 Koninklijke Philips N.V. (Royal Philips)
Todos los derechos reservados.

Las especificaciones están sujetas a cambios sin previo aviso. Las marcas registradas son propiedad de Koninklijke Philips N.V. (Royal Philips) o de sus respectivos propietarios.

www.philips.com/lighting

2014, Noviembre 6
Datos sujetos a cambios

Anexo 10.8



Graver Technologies

Filtration | Separation | Purification

ZTEC™ E Series Filter Cartridges

Pleated Polyethersulfone (PES) Membrane for Final Filtration of Ultrapure Water

ZTEC E microelectronics grade cartridges represent Graver's latest development in ultrapure water filtration technology. The filters are inherently hydrophilic and contain no added surfactants or wetting agents that could contaminate pure and ultrapure water streams. The PES membrane offers superior flow characteristics, high contaminant capacity and consistent removal of sub-micron particles. The cartridges exhibit rapid rinse-up to 18 MΩ-cm resistivity and single digit ppb levels of TOC.

Features–Benefits

- Manufactured, flushed, tested and packaged, in an ISO Class 7 Cleanroom Environment.
- Filters are 100% flushed with 18 MΩ-cm DI water and integrity tested.
- Resistivity rinse-up to 18 MΩ-cm and single digit ppb TOC levels with minimal throughput.
- Available in a variety of end cap/adaptor configurations to fit all industry-standard housings.
- Pore size, lot and serial number are stamped on each filter element for identification and traceability.
- Complete qualification guide available.

Product Specifications

Media:	Asymmetric Polyethersulfone membrane
Inner core, end caps, cage:	Polypropylene
Support layers:	Spunbonded Polypropylene
Gaskets/O-Rings:	Buna-N, EPDM, Silicone, Viton, Teflon Encapsulated Viton (O-Rings only)
Micron ratings:	0.03, 0.1, 0.2, 0.45 μm

Dimensions

Nominal lengths:	5", 9.75", 10", 20", 30", 40" (12.7, 24.7, 25.4, 50.8, 76.2, 101.6 cm)
Outside diameter:	2.7" (6.9 cm)
Inside diameter:	1.0" (2.54 cm)
Surface area:	7.6 ft ² . (0.7 m ²) per 10" element

Operating Parameters

Maximum sustained operating temperature:	176°F (80°C) at 20 psid (1.38 bar)
Maximum differential pressure:	60 psid @ 80°F (4.14 bar @ 27°C) 30 psid @ 160°F (2.07 bar @ 71°C) 15 psid @ 200°F (1.03 bar @ 93.3°C)
Maximum reverse differential pressure:	40 psid @ 70°F (2.8 bar @ 21°C)
Recommended change-out pressure:	35 psid (2.4 bar)



Certifications

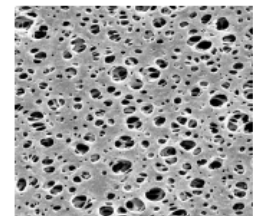
ZTEC E filters were tested by outside laboratory, CT Associates in November, 2011 for the following:

- TOC Rinse-up to 0.5 ppb
- Resistivity Rinse-up to 18 MΩ-cm
- Non-Volatile Residue
- Particle Rinse-up
- Trace Metal Extractables
- Anion and Cation Extractables

Please request Graver ZTEC E Qualification Guide for details and complete test reports.

Typical Applications

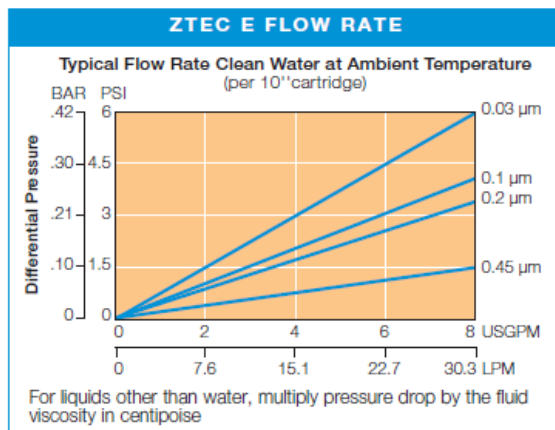
- DI water
- High purity chemicals





ZTEC E Nomenclature Information				
ZTEC E	0.45	-30	P8	T
Filter Type ZTEC E Series Filters		Nominal Length (inches)	End Configuration	Gasket or O-Ring
Retention Rating (microns)		-5	P Double Open End	S Silicone
0.03		-9.75	P2 226/Flat Single Open End	B Buna-N
0.1		-10	P3 222/Flat Single Open End	E EPDM
0.2		-20	P7 226/Fin Single Open End	V Viton
0.45		-30	P8 222/Fin Single Open End	T Teflon endcap, Viton (O-Rings only)
		-40	AM Single open end, internal O-Ring	
			NPC Double open end, internal O-Ring	

Example: ZTECE 0.45-30P8T



Performance Specifications

Hot DI Water

Filter cartridge will withstand temperatures of 185°F (85°C) for up to 30 consecutive minutes.

Cleaning/Sanitization

Compatible with most common chemical cleaning, sanitizing and sterilizing agents and with pH range from 1-14. Consult factory for specific compatibility information.

Rinse-Up Volumes

- Resistivity rinse-up to 18 MΩ-cm: <30 minutes at a flow of 3 gpm per 10-inch element.
- Rinse-up to single digit ppb TOC in <120 minutes at a flow of 3 gpm per 10-inch element.

Integrity Test Specifications

Minimum Bubble Point values and maximum Diffusive Air Flow (per 10-inch cartridge) values for ZTEC-E filters wet with water:

Pore Size	Diffusive Air Flow
0.03 µm:	≤ 50 cc/min @ 50 psig (3.1 bar)
0.1 µm:	≤ 50 cc/min @ 40 psig (2.8 bar)
0.2 µm:	≤ 35 cc/min @ 30 psig (2.1 bar)
0.45 µm:	≤ 35 cc/min @ 20 psig (1.4 bar)

For more information

Graver Technologies Customer Service: 1-888-353-0303

Technical Support: 1-888-353-0303

E-mail us at info@gravertech.com

Graver Technologies Europe (UK): +44-1424-777791

All information and recommendations appearing in this bulletin concerning the use of products described herein are based on tests believed to be reliable. However, it is the user's responsibility to determine the suitability for his own use of such products. Since the actual use by others is beyond our control, no guarantee, expressed or implied, is made by Graver Technologies as to the effects of such use or the results to be obtained. Graver Technologies assumes no liability arising out of the use by others of such products. Nor is the information herein to be construed as absolutely complete, since additional information may be necessary or desirable when particular or exceptional conditions or circumstances exist or because of applicable laws or government regulations.

ZTEC is a trademark of Graver Technologies, LLC.



200 Lake Drive
Glasgow,
DE 19702 U.S.A.

302-731-1700
800-249-1990
Fax: 302-369-0938

e-mail: info@gravertech.com
web site: www.gravertech.com



A Marmon Water/Berkshire Hathaway Company

GTX- 302 5-13



Universidad de Valladolid

DISEÑO DE UNA PLANTA DE
PRODUCCIÓN DE AGUA PARA LÍQUIDO
DE DIÁLISIS.



**ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES**