

Guía de Desalación: aspectos técnicos y sanitarios en la producción de agua de consumo humano

Guía de Desalación: aspectos técnicos y sanitarios en la producción de agua de consumo humano

Edita y distribuye:
© MINISTERIO DE SANIDAD Y POLÍTICA SOCIAL
Secretaría General Técnica
Centro de Publicaciones
Paseo del Prado, 18. 28014 Madrid

NIPO: 351-09-040-4 Depósito Legal: BI-2436-2009
Maquetación e Impresión: Composiciones Rali, S.A.

Guía de Desalación: aspectos técnicos y sanitarios en la producción de agua de consumo humano



GOBIERNO DE ESPAÑA
MINISTERIO DE SANIDAD Y POLÍTICA SOCIAL

Índice

Equipo de trabajo	9
1. Introducción	15
1.1. La desalación del agua	16
1.2. Datos sobre desalación en España	17
2. Captación y origen de las aguas destinadas a la desalación	21
2.1. Agua de mar	21
2.2. Contaminación de las aguas marinas	23
2.3. Aguas continentales con exceso de algunos iones o contaminantes	26
2.4. Aguas salobres	28
2.5. Aguas residuales depuradas	29
2.6. Captación del agua	29
3. Pretratamiento	31
3.1. Pretratamientos para los procesos de desalación por membranas	31
3.2. Pretratamiento mediante membranas	40
3.3. Pretratamientos para procesos de destilación/evaporación	49
4. Técnicas de desalación	53
4.1. Tecnologías de membrana	54
4.1.1. Ósmosis inversa	54
4.1.2. Nanofiltración	67
4.1.3. Electrodialísis	68
4.2. Otras tecnologías de desalación. Técnicas de destilación	73
5. Postratamiento	83
5.1. Eliminación de CO ₂ o decarbonatación	83
5.2. Intercambio iónico	84
5.3. Acondicionamiento químico	93
6. Mantenimiento, limpieza y conservación	99
6.1. El manual de operación y mantenimiento	99
6.2. Toma de datos de funcionamiento y registro de control	100
6.3. Limpieza de membranas	100

7. Sustancias y materiales	113
7.1. Sustancias o preparados químicos empleados en procesos de desalación y otros tratamientos del agua mediante la utilización de membranas	113
7.2. Productos y materiales de construcción en contacto con el agua	120
7.3. Información adicional	133
8. Controles específicos de la calidad del agua en plantas en producción	137
8.1. Control del proceso	138
8.2. Controles específicos de la calidad del agua producto	149
9. Casos particulares: industria alimentaria y equipos domésticos	155
9.1. Industria alimentaria y afines	155
9.2. Equipos domésticos	159
10. Posibles incidencias en las plantas de desalación	171
10.1. Alteraciones de la calidad del agua bruta	172
10.2. Daño estructural en el módulo de ósmosis inversa	175
10.3. Incidencias debidas a la presencia de agentes químicos de limpieza en el permeado	177
11. Aspectos medioambientales de la desalación	179
11.1. Repercusiones ambientales de las desaladoras	180
11.2. Relación de los permisos principales solicitados en desaladoras	191
12. Definiciones, acrónimos y bibliografía	195
12.1. Definiciones	195
12.2. Índice de acrónimos	201
12.3. Bibliografía	203

Director General de Salud Pública y Sanidad Exterior
Ildefonso Hernandez Aguado

Subdirector General de Sanidad Ambiental y Salud Laboral
Fernando Carreras Vaquer

Equipo de trabajo

Coordinación:

Margarita Palau Miguel

Médico Especialista en Medicina Preventiva y Salud Pública
Ministerio de Sanidad y Política Social

Secretaría:

Jaime Roset Alvarez

Doctor en Ciencias Biológicas
TRAGSATEC

Autores

Por la Asociación Española de Desalación y Reutilización (AEDYR)

Juan María Sánchez

Ingeniero Industrial
ECOAGUA INGENIEROS

Antonio Casañas González

Ingeniero industrial
Dow Chemical Ibérica S.L. División «Dow Water and
Process Solutions»

Manuel Ramón García Sánchez-Colomer

Doctor en Ciencias Biológicas
Área de Ingeniería Ambiental. CEDEX (Ministerio de Fomento)

Antonio José Zarzo Martínez

Licenciado en Ciencias Químicas
Nalco Española S.A.

Por la Asociación Española de Empresas de Tratamiento y Control de Aguas (AQUAESPANA)

Manuel Gonzalo Pérez

Perito Industrial - Ingeniero T. Químico
Consultor Ambiental

Silvia Gallego López

Licenciada en Ciencias Ambientales
Genesys Membrane Products S.L.

Jorge Marcó Gratacós

Ingeniero Químico
CILIT S.A.

Por la Asociación Española de Abastecimiento y Saneamiento (AEAS)

Belén Benito Martínez

Ingeniera de Caminos, Canales y Puertos
Canal de Isabel II

Lorenzo Monforte Monleón

Doctor en Ciencias Químicas
Grupo Aguas de Valencia

Nicolás Urgoiti Moinot

Licenciado en Ciencias Químicas
Empresa Municipal de Aguas de Málaga

María Rocío Pérez Recuerda

Doctora de Ciencias Biológicas
Empresa Municipal de Aguas de Málaga

Rafael Aznar Muñoz

Licenciado en Farmacia
AQUALIA, Gestión Integral del Agua, S.A.

Francisco Luque Montilla

Ingeniero Industrial
Aigües de Barcelona S.A.

Leopoldo Guerrero Gallego

Licenciado en Ciencias químicas

Por TRAGSATEC

Jaime Roset Álvarez

Doctor en Ciencias Biológicas
TRAGSATEC

Revisores

Miguel Torres Corral

Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos
Centro de Estudios Hidrográficos. (CEDEX)
AEDYR

Fernando Valero Cervera

Ldo. en Farmacia y Doctor en Medicina
Aigües Ter Llobregat
AEAS

Lorenzo Monforte Monleón

Doctor en Ciencias Químicas
Grupo de Aguas de Valencia
AEAS

Jose María Oliver

Ingeniero Industrial
DEISA
AQUAESPANA

Colaboradores

Carlos Molina Herrero

Licenciado en Ciencias Químicas
TRAGSATEC

Esperanza Guevara Alemany

Médico Especialista en Medicina Preventiva y Salud Pública
Ministerio de Sanidad y Política Social

Agradecimientos

En este apartado queremos dar las gracias expresas a la Dirección de Normalización de la Asociación Española de Normalización AENOR, en especial a Gonzalo Sotorrío y Sonia Fernández por su ayuda en la búsqueda de normas relacionadas con sustancias para el tratamiento y con materiales en contacto con el agua de consumo.

Presentación

El control sanitario del agua de consumo humano es un objetivo prioritario de la salud pública. Las enfermedades relacionadas con la contaminación del agua de consumo tienen una gran repercusión sobre la salud de las personas. Las medidas destinadas a mejorar la calidad del agua, mejoran significativamente la salud y por ello la finalidad principal de esta guía es la de elevar la protección de la salud pública.

Esta guía describe los requisitos mínimos en el ámbito de la desalación que constituyen prácticas seguras para proteger la salud de los consumidores.

En nuestro país el origen del agua destinada a la producción de agua de consumo humano procede de diversas fuentes: aguas superficiales continentales, aguas subterráneas y aguas costeras. Debido a los efectos del cambio climático está incrementándose el uso, no solo agua de mar para las zonas costeras sino también el uso de aguas salobres continentales. Para este tipo de aguas, es necesario para su potabilización el uso de tecnologías de membranas: Osmosis inversa, Microfiltración, Ultrafiltración, Nanofiltración, Electrodialisis etc.

Al tener este tipo de tecnología una presencia muy significativa en nuestro país, el Ministerio de Sanidad y Política Social, consciente de la gran importancia que está cobrando la producción de agua destinada al abastecimiento humano por medio de la desalación en España, ha querido aportar mediante el presente trabajo información práctica sobre sus aspectos sanitarios y técnicos. Esta iniciativa enlaza con el propósito del Ministerio de Sanidad y Política Social de destacar la importancia de los efectos que en la salud pública tienen muchas políticas no sanitarias y por ello la necesidad de considerar estos efectos en su diseño y aplicación.

Por estas razones es una satisfacción presentar esta Guía sobre los aspectos sanitarios y técnicos de la desalación del agua destinada a la producción de agua de consumo.

Director General de Salud Pública y Sanidad Exterior

1. Introducción

El presente trabajo no es un manual de desalación ni un libro técnico. Simplemente trata de recoger una introducción práctica de como tienen lugar los procesos de desalación, y de que manera incidir para salvaguardar la salubridad del agua destinada a consumo humano producida mediante estas tecnologías. La motivación principal ha sido desarrollar una guía práctica especialmente dedicada a técnicos sanitarios de las Comunidades Autónomas y a los abastecedores de agua de consumo.

El trabajo ha sido desarrollado durante los últimos tres años gracias a la participación de especialistas del mundo de la desalación, bajo la coordinación del Área de Calidad Sanitaria de las Aguas de la Subdirección general de Sanidad Ambiental y Salud Laboral de este Ministerio.

España obtiene agua a través de desaladoras desde hace más de 30 años, siendo un país puntero en el desarrollo de tecnologías de desalación, y el quinto con mayor número de desaladoras del mundo. En la actualidad existen más de 700 desaladoras funcionando con una capacidad de desalación en torno a 2.033.271 m³/día. En el marco del Programa AGUA del Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino, las actuaciones previstas suponen, para el 2009, un aumento de la capacidad de producción de 1.335.200 m³/día, hasta alcanzar una capacidad total instalada próxima a los 3,4 hm³/día.

Las tecnologías de desalación permiten un mayor ahorro y eficiencia en el uso del agua, la explotación de recursos antes no aprovechables como el agua de mar, así como una mayor garantía de disponibilidad y de calidad en el suministro, en particular en las áreas mediterráneas. En estas zonas suelen confluír diversos factores que favorecen enormemente el empleo de la desalación. En efecto, una población elevada, una gran actividad turística, la escasez del líquido elemento y una gran demanda para regadío agrícola condicionan la disponibilidad y la necesidad de nuevas fuentes de agua de gran calidad. Todo ello hace de la desalación una nueva estrategia de abastecimiento de agua, suponiendo un importante motor de desarrollo en zonas con escasez.

Como es sabido, el agua tiene una enorme importancia económica, social y ambiental; por lo que la desalación del agua es un aspecto trascendente dentro de la política hídrica en España. De igual modo, debe reconocerse la importancia práctica de trabajos como el que ahora se presenta, que servirá sin duda tanto a gestores del agua, como a las autoridades competentes; contribuyendo a que los aspectos sanitarios se integren cada día más dentro de la planificación y la gestión hídrica, y en definitiva se proteja la salud de las personas y la del medio ambiente.

1.1. La desalación del agua

La desalación es el proceso de separación de minerales disueltos (sales) y otras sustancias indeseables contenidas en las aguas salobres o marinas, para convertirlas en agua adecuada para el consumo humano, agua apta para uso industrial o agrícola.

Las tecnologías más utilizadas a nivel mundial, son la desalación mediante plantas de **membranas semipermeables –en particular mediante ósmosis inversa–**, y la **destilación**.

En España, actualmente se utilizan mayoritariamente los sistemas de membranas semipermeables de **ósmosis inversa (OI)**, no así en los países de oriente próximo, donde la técnica más utilizada sigue siendo la destilación (evaporación), mucho más costosa desde el punto energético.

A lo largo de la presente guía se describen detalladamente las principales técnicas de desalación, poniendo especial interés al pretratamiento o el postratamiento, en los que es preciso tratar el agua mediante procedimientos físico químicos modificando sus características y su calidad, con la finalidad de adecuarla al proceso de desalación al que se somete, o para su potabilización y distribución como agua de consumo humano.

Otro aspecto relevante que se trata en la presente guía, está referido a los productos de construcción y a las sustancias químicas empleadas en los procesos de desalación. A fin de orientar tanto a las autoridades competentes, a los gestores de las plantas, como a los productores y suministradores de productos y materiales, se establecen unas recomendaciones y unos criterios básicos para su selección y para que estén correctamente documentados ante una eventual inspección sanitaria.

Otro aspecto de gran relevancia es la limpieza de las membranas. Se ofrecen diversas recomendaciones para llevarlas a cabo de la forma más segura y adecuada posible.

Se dedica un capítulo completo a la prevención de incidencias en las plantas de desalación, otorgando especial importancia a los aspectos sanitarios. Tampoco se dejan de lado los aspectos medioambientales, para los que ya existen textos específicos, pero que se consideran deben formar parte también de una guía como esta.

Por último, parte del texto se dedica a ofrecer recomendaciones prácticas de como conseguir que el agua desalada respete la calidad legalmente establecida en el Real Decreto 140/2003.

1.2. Datos sobre desalación en España

A modo de referencia, se ofrecen los datos oficiales publicados en el anuario de la Asociación Internacional de Desalación. Corresponden a noviembre de 2008.

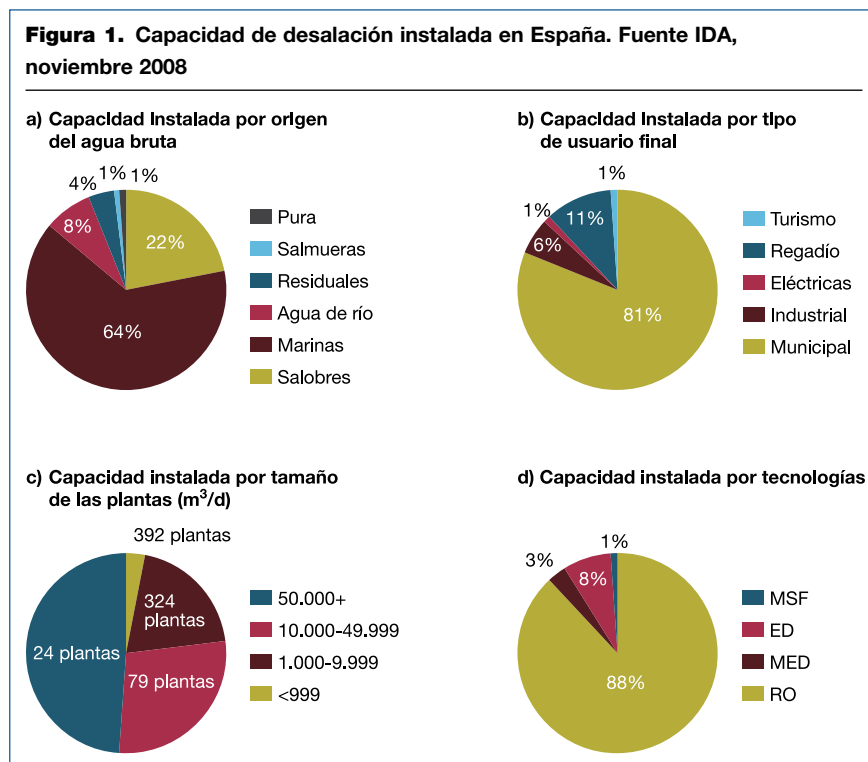


Figura 2. Las mayores desaladoras en España por su capacidad. Fuente IDA, noviembre 2008

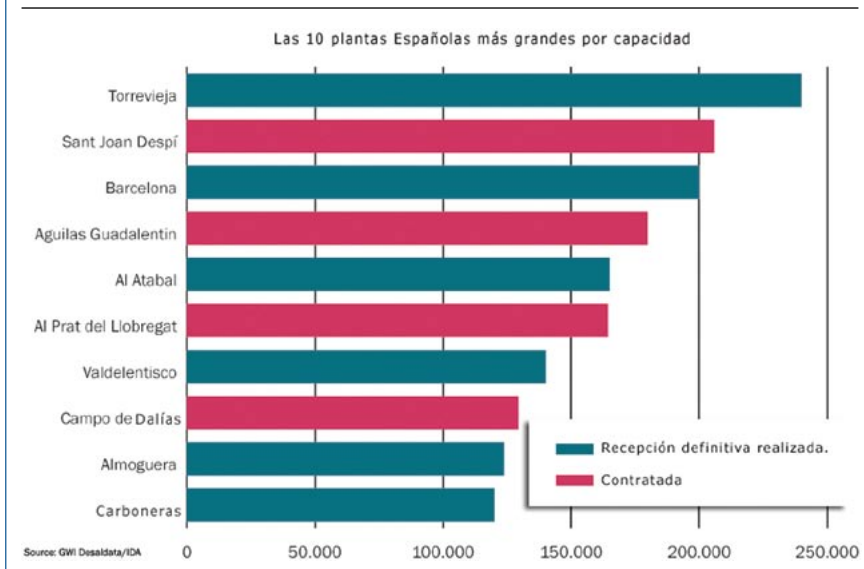
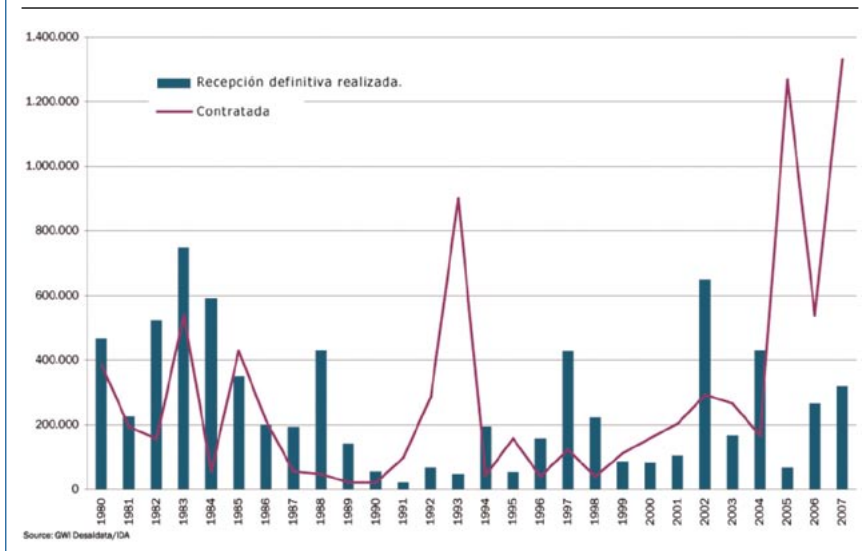


Figura 3. Los 10 mayores abastecedores de agua desalada por capacidad de producción. Fuente IDA, noviembre 2007

1)	Acciona	959,851 m³/d	(72 plants)
2)	Suez	870,676 m³/d	(64 plants)
3)	Ferrovial	581,995 m³/d	(26 plants)
4)	ACS	533,083 m³/d	(88 plants)
5)	Sacyr Vallehermoso	368,800 m³/d	(34 plants)
6)	Abengoa	275,000 m³/d	(3 plants)
7)	GE	267,470 m³/d	(79 plants)
8)	Veolia Environment	252,235 m³/d	(135 plants)
9)	FCC	228,420 m³/d	(27 plants)
10)	OHL	222,540 m³/d	(14 plants)

Figura 4. Evolución de la capacidad de desalación del agua en España.
Fuente IDA, noviembre 2007



La puesta en marcha de grandes desaladoras no se ha detenido desde que a mediados de los años 60 se hiciese la primera en la isla de Lanzarote (Islas Canarias).

En España en los últimos años se han realizado grandes inversiones en plantas de ósmosis inversa. En este sentido, uno de los logros más importantes que ha favorecido tal desarrollo, fue conseguir la normalización de las membranas, favoreciéndose la competencia y la bajada de precios de la tecnología y del agua producida.

2. Captación y origen de las aguas destinadas a la desalación

Diversas regiones de la geografía española, en particular en las zonas costeras del litoral mediterráneo, sufren escasez de precipitaciones, reciben una población turística importante y demandan grandes cantidades de agua para el regadío, para usos recreativos y para consumo humano. Este cúmulo de circunstancias produce un déficit hídrico permanente, que se agrava en épocas de sequía, por lo que en muchos casos se hace necesario recurrir a la desalación.

La desalación se aplica tanto a aguas salobres como a las de mar. El empleo de la tecnología de membranas con aguas continentales tiene una finalidad correctora más que desalinizadora.

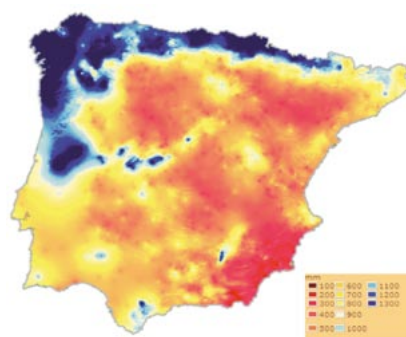
Para producir agua desalada pueden considerarse los siguientes orígenes:

- Agua de mar.
- Aguas continentales con exceso de algunos iones.
- Aguas salobres.
- Aguas procedentes de EDAR urbanas o industriales.

2.1. Agua de mar

La composición del agua del mar varía según su origen o según las características marinas, siendo de mayor concentración de sales en lugares cálidos con poca renovación como en el Mediterráneo, y menor en lugares semi-

Figura 5. Mapa pluviométrico de la Península Ibérica. Valores medios anuales



Fuente: Ninyerola M, Pons X y Roure JM. 2005. Atlas Climático Digital de la Península Ibérica. Metodología y aplicaciones en bioclimatología y geobotánica. ISBN 932860-8-7. Universidad Autónoma de Barcelona, Bellaterra. <http://www.opengis.uab.es/wms/iberia/index.htm>

cerrados con abundantes aportes continentales como el mar Báltico. La variabilidad de las aguas salobres puede ser aún mayor en cuanto a salinidad y otros componentes. La **tabla 1** resume las concentraciones medias de los constituyentes químicos mayoritarios del agua marina, comprobándose que se trata de una solución con una gran cantidad de sales disueltas, pero muy pobre en nutrientes (nitrógeno, fósforo y carbono).

El agua de mar es una solución concentrada de sales inorgánicas, y sirve de hábitat a infinidad de seres vivos. El volumen más importante de biomasa lo compone el **plancton**, constituido fundamentalmente por algas (fitoplancton) y animales microscópicos (zooplancton).

Tabla 1. Composición y características típicas del agua de mar¹

Parámetro	Intervalos de referencia
Temperatura, °C	15 – 35
pH	7,9 – 8,1
Sales disueltas, mg/L	30.000 – 45.000
Conductividad, µS/cm (a 20 °C)	44.000 – 58.000
Bicarbonatos, mg/L	120 – 170
Sulfatos, mg/L	2.425 – 3.000
Cloruros, mg/L	17.500 – 21.000
Bromuros, mg/L	59 – 120
Nitratos, mg/L	0,001 – 4,0
Fluoruros, mg/L	1
Boro, mg/L	4 – 6
Amonio, mg/L	0,005 – 0,05
Sodio, mg/L	9.600 – 11.700
Potasio, mg/L	350 – 500
Calcio, mg/L	375 – 525
Magnesio, mg/L	1.025 – 1.400
Estroncio, mg/L	12 – 14
Sílice (SiO ₂), mg/L	0,01 – 7,4
Carbono orgánico total, mg/L	1,2 – 3,0
Nitrógeno orgánico, mg/L	0,005 – 0,03

¹ Datos obtenidos de: Custodio, E.; Llamas, M.R. 1983. «Hidrología Subterránea». Editorial Omega, 2ª edición. Barcelona. y K. Grasshoff, K. Kremling, M. Ehrhardt. 1999. «Methods of Seawater Analysis». WILEY Verlag– VCH, third edition.

Las aguas situadas sobre la plataforma continental son generalmente verdosas debido a la presencia de clorofila y otros fitopigmentos, y por algunas sustancias aportadas por el humus soluble de origen terrestre. En la plataforma continental se encuentran la mayor parte de las algas verdes, pardas y rojas. Es con diferencia, la zona de mayor riqueza y diversidad en especies marinas. Entre la plataforma continental y la región de alta mar, hay una transición de aguas verde-azuladas de acusada actividad fotosintética.

A lo largo de la guía se comprenderá por qué la biomasa de las aguas destinadas a la desalación debe ser completamente eliminada.

2.2. Contaminación de las aguas marinas

Los contaminantes que pueden acceder al medio marino con mayor facilidad son los siguientes:

- Hidrocarburos.
- Materia orgánica, sustancias tensioactivas (detergentes), elementos nutrientes y microorganismos aportados por las aguas residuales urbanas y ganaderas.
- Metales pesados.
- Compuestos organohalogenados.
- Sustancias sólidas.

Por tratarse de casos muy específicos, no se considera la contaminación radioactiva por vertido de radioisótopos, ni la contaminación térmica.

Las principales vías de entrada de la contaminación a la plataforma continental son los aportes fluviales y los emisarios submarinos, pero no debe desdeñarse la vía atmosférica y la procedente de la navegación, especialmente en la contaminación de aguas profundas.

Las captaciones de agua salada para las plantas desaladoras están en la franja litoral o costera que con diferencia, es la que soporta la mayor parte de la contaminación marina y contiene la mayor riqueza biológica.

La contaminación de las aguas marinas puede incidir de manera muy importante en las diversas fases del proceso de desalación, de modo que al elegir un emplazamiento para la captación del agua de mar, es fundamental conocer previamente su calidad y los riesgos de contaminación presentes en la zona.

2.2.1. Contaminación por hidrocarburos

Este tipo de contaminación procede fundamentalmente de:

- Vertidos procedentes de barcos y/o de la actividad portuaria, ya sea por fugas, derrames, o por pérdidas accidentales.

- Vertidos procedentes de plataformas petrolíferas marinas.
- Vertidos que llegan al mar desde los ríos, emisarios submarinos, etc.

Tanto el petróleo crudo como el refinado son perjudiciales para las membranas de ósmosis inversa. Concretamente, el petróleo crudo contiene hidrocarburos alifáticos y aromáticos, así como compuestos heterocíclicos y otros que contienen nitrógeno y azufre.

Muchos de los hidrocarburos alifáticos son ligeramente solubles en agua, y tienen actividad neurotóxica a dosis relativamente bajas. Algunos hidrocarburos aromáticos, como por ejemplo el benceno, pueden ser causantes de leucemia, y el benzo(α)pireno puede originar cáncer de piel entre otras patologías.

De los numerosos compuestos órganosulfurados como los tioles y otros de tipo heterocíclico, se puede derivar sulfuro de hidrógeno, que es muy tóxico y con olor especialmente desagradable a muy bajas concentraciones.

En cuanto a los efectos sinérgicos, cabe destacar que los hidrocarburos tienen un efecto solubilizante de los plaguicidas organohalogenados que por si mismos son muy poco solubles en agua.

Los hidrocarburos, aun los más inocuos, pueden causar importantes trastornos y daños debido a su acción física recubriendo estructuras, así como a la flora y a la fauna bentónicas.

2.2.2. Contaminación por aguas residuales urbanas y ganaderas

Las aguas residuales urbanas y agrícola-ganaderas aportan al medio marino, materia orgánica diversa, sustancias tensioactivas (detergentes), nutrientes (carbono, nitrógeno y fósforo) y microorganismos, siendo estos últimos los que tienen mas probabilidades de estar presentes en el agua de captación de una instalación desaladora. Es correcto suponer que la casi totalidad de los microorganismos patógenos de origen humano y animal que potencialmente podrían estar presentes en las aguas marinas, son transportados hasta el mar por los vertidos de aguas residuales urbanas o ganaderas.

Los tensioactivos o detergentes, tanto por si mismos como por su acción dispersante y emulsionante, son siempre a tener en cuenta a la hora de establecer el punto de captación de agua de mar de la desaladora. También deben tenerse en cuenta los aditivos que suelen incorporar los detergentes como polifosfatos, colorantes, etc. Los detergentes se encuentran especialmente en aguas costeras que son las más importantes para las instalaciones desaladoras.

La entrada de aguas residuales al mar supone el aporte de sales minerales nutritivas que da lugar a una sobreabundancia de N y P, que altera la relación ideal N/P, especialmente en zonas de estuario. La eutrofización tiene un efecto de aumento de poblaciones de fitoplancton en mucha mayor medida que las de zooplancton, al tiempo que ahuyenta a los consumidores de los niveles superiores de la cadena trófica, lo que supone una distorsión en el ecosistema. Por otra parte, se produce un notable aumento del detritus orgánicos sedimentados sobre el fondo, y cuya descomposición consume gran parte del oxígeno disuelto del agua, dando lugar a fenómenos de reducción química, y a una severa limitación de las formas vivas que puede quedar reducida a determinadas especies de microorganismos. Asimismo, el vertido de aguas muy cargadas de nutrientes y a la vez calientes, puede desencadenar un fenómeno de «mareas rojas» debidas a la proliferación de ciertos tipos de dinoflagelados capaces de generar diversos tipos de biotoxinas.

Las bacterias de las aguas residuales están mayoritariamente asociadas a partículas orgánicas o minerales en suspensión, y la dispersión en el medio marino receptor es función de la talla de dichas partículas. La fracción de partículas con mayor talla-peso sedimenta, junto con los microorganismos, relativamente cerca del punto de vertido; sin embargo la fracción de partículas más pequeñas será arrastrada a puntos más alejados. La mayor parte de la carga de microorganismos será la asociada a las partículas ligeras que además se mantendrá en un estrato superior debido a menor densidad del agua dulce respecto a la salada.

Mediante estudios experimentales se ha podido comprobar que el número de microorganismos que inicialmente se encuentran en el agua residual (2-3 millones de microorganismos/litro) disminuye, una vez en el mar, mucho más rápidamente de lo que cabría esperar por la simple dilución. La constatación de este hecho llevó a la conclusión de que el agua de mar poseía una capacidad o poder antiséptico autodepurador. La capacidad autodepuradora, que es máxima en el agua de mar fresca, disminuye mucho si el agua se filtra y desaparece si el agua se esteriliza o si envejece por largo tiempo de almacenamiento. La experiencia demuestra que las bacterias patógenas de organismos terrestres son destruidas tras un tiempo de supervivencia, que puede oscilar de 24 horas a más de una semana. En definitiva, las aguas de mar captadas para desalar pueden contener microorganismos patógenos como bacterias, hongos, protozoos, parásitos y virus que deben ser eliminados durante el proceso.

Bajo determinadas circunstancias y como se desarrolla más adelante, en el pretratamiento puede añadirse un desinfectante (a menudo cloro), para prevenir el ensuciamiento debido al crecimiento de microorganismos en los procesos de desalación, tratamiento que puede resultar incompatible con la composición de determinados tipos de membranas.

2.2.3. Otros contaminantes

La presencia de metales pesados en aguas costeras se debe al drenaje natural, por escorrentía o aportes fluviales, al propio sustrato geológico de la zona, o a vertidos de aguas residuales sobre todo de tipo industrial. Los metales pesados tienden a asociarse a las partículas en suspensión formando complejos con las materias orgánicas, y a ser adsorbidos por crustáceos planctónicos, así como por algas. Unos factores como la existencia de finas partículas en suspensión (turbidez), de detergentes, de agentes quelantes, etc., facilitarán la presencia de los metales en solución y en la superficie, mientras que otros como partículas sólidas gruesas, algas, crustáceos, etc., tenderán a depositarlos en los fondos marinos. La existencia de metales pesados en la superficie de las aguas costeras es la más peligrosa para las plantas de desalación. El mercurio, transformado por ciertas bacterias aerobias en metil-mercurio, puede ser acumulado en grandes cantidades por los seres marinos de los niveles más altos de la cadena trófica, constituyendo un serio peligro para el hombre si llega a consumirlos. En el caso del mercurio el transporte atmosférico es también de importancia.

Bajo la denominación de sustancias organohalogenadas se engloban sustancias tales como plaguicidas organohalogenados, plastificantes como los PCB, monómeros de plásticos como el cloruro de vinilo, etc., que se caracterizan por ser moléculas muy estables y poco biodegradables. El transporte atmosférico es especialmente importante con estas sustancias, lo que hace que, además de en las aguas costeras, puedan encontrarse en puntos muy alejados de su origen.

Al mar pueden llegar una gran diversidad de sustancias sólidas, como escombros, basuras, objetos flotantes, etc., no obstante son los lodos los sólidos de mayor interés ecológico. En efecto, los lodos pueden ser de origen industrial, de origen urbano, o procedentes de tareas de dragado portuario. Aunque de composición diversa, los lodos presentan como característica común incrementar la fracción fina en el conjunto de la granulometría de los fondos. El vertido de los lodos se lleva a cabo casi siempre en superficie por lo que originan un aumento de la turbidez, factor de gran importancia que ha de tenerse en cuenta en las captaciones de agua de mar.

2.3. Aguas continentales con exceso de algunos iones o contaminantes

En las aguas continentales es posible encontrar diversos grados de salinidad y una composición química aún más variable que en el agua de mar.

Por ejemplo, en algunas regiones, existen aguas cuya salinidad global es inferior a 1 g/L, pero que presentan una alta concentración de algunos iones como nitratos, sulfatos, calcio o magnesio, o algunos contaminantes; lo que impide que puedan ser transformadas en agua apta para consumo humano por medio de tratamientos convencionales. En estos casos, la aplicación de la tecnología de desalación permite aprovechar estos recursos hídricos para el abastecimiento humano. Frecuentemente se trata de aguas de origen subterráneo, aunque también pueden ser superficiales.

La **tabla 2** resume las sustancias o especies de origen natural que pueden encontrarse o acompañar a una fuente de agua continental superficial o subterránea, y que pueden plantear problemas respecto al cumplimiento de la legislación vigente.

Tabla 2. Sustancias o factores de origen natural potencialmente presentes en las aguas	
Sustancias o factores	Causa probable o posible
Materia en suspensión (turbidez).	Agotamiento del acuífero por sequía, crecidas de ríos por efecto de las lluvias, escorrentía tras los incendios.
Color, olor, precursores de THM, microcistinas, etc.	Sustancias húmicas, algas y cianobacterias.
Arsénico, mercurio, selenio, estroncio, radiactividad.	Naturaleza y estructura de los suelos.
Hierro, manganeso.	Naturaleza y estructura de los suelos, o ambientes reductores.
Amonio.	Origen fósil o ambientes reductores.
Salinidad (Cl ⁻ , SO ₄ ²⁻ , Na ⁺ , Mg ²⁺ , F ⁻).	Naturaleza y estructura de los suelos y origen fósil.

La **tabla 3** agrupa, los contaminantes que pueden encontrarse en aguas continentales, y que con mayor frecuencia pueden acarrear problemas en el proceso de desalación.

Tabla 3. Contaminantes más frecuentes

Sustancias o contaminantes en el agua	Causa u origen
Materia en suspensión.	Arrastres por agotamiento del acuífero por sobreexplotación.
Sales disueltas.	Intrusión marina en el acuífero por sobreexplotación. Vertidos salinos.
Nitratos y nitritos.	Uso masivo de fertilizantes nitrogenados, o infiltraciones de aguas fecales procedentes de fosas sépticas o de explotaciones ganaderas. Mala gestión de los residuos ganaderos.
Amonio.	Infiltraciones de aguas fecales procedentes de fosas sépticas o de explotaciones ganaderas.
Halogenuros orgánicos (Yodo o bromo orgánico).	Por contaminación difusa debida a antiguas prácticas agrícolas (empleo como herbicidas).
Plaguicidas.	Uso masivo de plaguicidas (herbicidas, insecticidas...) en la agricultura.
Disolventes orgánicos, hidrocarburos, aceites, grasas.	Vertidos industriales y/o urbanos.
Metales pesados, Cromo hexavalente y cianuros.	Vertidos industriales.
Radiactividad.	Contaminación artificial y natural.
Detergentes.	Vertidos de aguas residuales urbanas. Vertidos industriales.
Bacterias, virus, hongos, protozoos.	Infiltraciones de aguas fecales procedentes de fosas sépticas o de explotaciones ganaderas, etc.

2.4. Aguas salobres

Se considera que el agua es salobre cuando su concentración de sales disueltas se encuentra en el intervalo de 1 a 10 g/L. Aunque el agua salobre puede ser de origen superficial, generalmente procede de acuíferos costeros en contacto directo con el mar. Los acuíferos de aguas salobres de origen fósil completamente aislados del mar, son también potencialmente útiles en la desalación.

El tratamiento previo que precisan estas aguas (pretratamiento) es uno de los problemas más importantes a los que se enfrentan las técnicas de desalación; ya que presentan características y composición muy variable. A lo largo de los capítulos siguientes, se ofrecen recomendaciones al respecto.

Por definición, las aguas salobres de procedencia subterránea tienen una elevada carga de sales minerales. Adicionalmente, pueden contener otros elementos capaces de ensuciar y atascar las membranas; como sucede con los coloides, el hierro, el manganeso, los compuestos orgánicos volátiles (COVs), bacterias anaerobias del tipo *Clostridium spp.*, etc.

Cuando las aguas son de procedencia superficial, pueden presentar mayor cantidad de sólidos en suspensión, materia orgánica de origen natural, algas, color, flora bacteriana muy variada, etc. Generalmente su composición química es más variable a lo largo del tiempo, lo que representa una dificultad añadida en los procesos de desalación.

En resumen, las aguas salobres pueden presentar tanto problemas propios de las aguas de mar, como los propios de aguas continentales subterráneas o superficiales. Con la finalidad de afrontar con éxito todos estos inconvenientes, el diseño de la fase de pretratamiento debe estar precedido por un estudio analítico y biológico del agua muy completo.

2.5. Aguas residuales depuradas

Hoy por hoy, las aguas residuales depuradas no se contemplan como fuente directa para producir agua potable; pero sí pueden ser regeneradas para otros usos. Sin embargo, la elevada salinidad que en ocasiones presentan, las hace inadecuadas para su reutilización como aguas de riego o para recarga de acuíferos. En estas circunstancias, la aplicación de la desalación constituye un posible tratamiento terciario que facilita su regeneración y su reutilización.

La fase de pretratamiento deberá estar adaptada a las características particulares de este tipo de aguas.

2.6. Captación del agua

Se distinguen dos procedimientos básicos de captación:

- Captación cerrada (pozos profundos, pozos playeros, drenes horizontales, cántaras ...).
- Captación abierta (captación superficial, torres sumergidas, escollera ...).

La **tabla 4** resume las características de ambos procedimientos de captación.

Tabla 4. Tipos de captaciones para desalación	
Captación cerrada	Captación abierta
<ul style="list-style-type: none"> • Agua limpia como consecuencia de la acción filtrante del terreno. • Mínima actividad orgánica o biológica. • Baja concentración de oxígeno disuelto. • Temperaturas estables. • Posible presencia de importantes concentraciones de hierro, manganeso, sílice y aluminio. • Posible contaminación por nitratos y plaguicidas. • Composición química bastante estable aunque sujeta a variaciones temporales o estacionales por contacto con otros acuíferos. 	<ul style="list-style-type: none"> • Contenido en sólidos en suspensión importante y variable. • Importante actividad biológica y presencia de materia orgánica. • Mayor exposición a la contaminación. • Importante concentración de oxígeno disuelto. • Composición química muy variable. • Posible presencia de gran variedad de contaminantes. • Temperaturas más variables.

Analizando la tabla, es fácil llegar a la conclusión de que las captaciones cerradas son preferibles a las abiertas. De hecho, estas últimas sólo se emplean cuando las primeras no son posibles de realizar.



3. Pretratamiento

El objeto del pretratamiento en las plantas de desalación es adecuar las características físico-químicas y biológicas del agua captada a las necesidades del proceso de desalación, para evitar de ese modo, la corrosión, la formación de incrustaciones y, en definitiva, el deterioro prematuro de los equipos.

El pretratamiento es una parte fundamental del proceso de desalación, y su diseño condiciona de una manera muy importante los costes de mantenimiento y de explotación de la planta desaladora.

Como se verá en el capítulo 4, existen varios procesos de desalación y el pretratamiento deberá adecuarse a las características y requerimientos de cada uno de estos procesos.

3.1. Pretratamientos para los procesos de desalación por membranas

En estos procesos de desalación, la misión del pretratamiento consiste en eliminar o reducir al máximo posible el **riesgo de atascamiento** de las membranas por acumulación de sustancias, materiales y microorganismos sobre su superficie. Este tipo de atascamiento reduce la vida y la eficiencia de las membranas, ya que empeora la calidad del agua tratada y produce un incremento de la presión necesaria para su funcionamiento.

Como se describió en el anterior capítulo, la **procedencia del agua** de entrada es muy importante a la hora de diseñar el pretratamiento de una planta de membranas. En general, se indicó que el agua de origen superficial requiere un pretratamiento más complejo que el agua de origen subterráneo.

Para los procesos de membranas los objetivos del pretratamiento son los siguientes:

- Eliminar los sólidos en suspensión.
- Evitar la precipitación de óxidos metálicos.
- Evitar la precipitación de sales minerales.
- Reducir el contenido de materia orgánica del agua.
- Eliminar o reducir la actividad biológica del agua de entrada.

Silt Density Index, Índice de fouling o Índice de atascamiento (SDI - SDI₁₅). Es una medida indirecta de la presencia de materia particulada o coloidal en el agua capaz de colmatar o atascar las membranas. Se obtiene de forma empírica mediante la fórmula:

$$SDI_{15} = \frac{\left[1 - \frac{t_1}{t_2}\right] \times 100}{15}$$

Siendo t_1 y t_2 los tiempos de filtración inicial (t_1) y después de 15 minutos (t_2), para pasar 500 mL de agua a través de un filtro de 0,45 μm a 2,1 bares de presión.

Norma: D4189-95R02 Test Method for Silt Density Index (SDI) of Water.

El SDI es una medida que indica el potencial de atascamiento de un agua, debido a las partículas coloidales mayores de 0,45 μm , y que se correlaciona con el ensuciamiento de las membranas empleadas en desalación, teniendo en cuenta que por cada unidad de incremento del SDI, se corresponde a un incremento geométrico de la masa de materias depositadas capaces de ensuciar las membranas.

El valor máximo del SDI₁₅ generalmente admitido por los fabricantes de las membranas es 5. No obstante, estará condicionado al diseño de la instalación y a las instrucciones concretas del fabricante.

Es decir, para que no haya problemas de atascamiento por coloides en las membranas, este índice ha de ser lo más bajo posible. El SDI del agua subterránea es normalmente más bajo que en el agua superficial.

Sólidos en suspensión

Las partículas en suspensión pueden provocar el atascamiento de las membranas al ser retenidas en su superficie por filtración mecánica.

Para valorar el atascamiento que puede producir las sustancias coloidales del agua, se utiliza el **SDI₁₅** (*Silt Density Index*) o **índice de fouling**. (Véase cuadro adjunto).

Con la misma finalidad, la tendencia futura es a realizar mediciones de **recuento de partículas** en el agua antes de la entrada a las membranas.

Otras causas de atascamiento se deben a la presencia de ciertas materias orgánicas en el agua, o porque contenga aceites o grasas.

Óxidos metálicos

Los óxidos metálicos que se encuentran con más frecuencia en el agua son los óxidos de hierro, manganeso y aluminio.

El hierro puede encontrarse en el agua en las formas ferrosa y férrica, siendo lo más probable que coexistan ambas. El hierro ferroso es soluble y no causará problemas ya que será rechazado por las membranas como cualquier otro catión. El hierro férrico suele proceder de la oxidación de la forma ferrosa o de la corrosión de estructuras metálicas degradadas. Por ser insoluble es susceptible de acumulación que atascaría las membranas, siendo lo más adecuado eliminarlo en el pretratamiento mediante oxidación total con cloro y filtración.

El manganeso puede encontrarse en el agua en los estados de oxidación II y IV. El primero es soluble y será rechazado por las membranas sin causar problemas, sin embargo, el Mg IV es insoluble y causaría problemas de acumulación y atascamiento de membranas, por lo que se deberá eliminar en el pretratamiento.

El aluminio es un metal anfótero¹ cuya solubilidad en el agua es mínima a un pH de 6,6. La presencia del aluminio en el agua puede ser debida a dos causas distintas. La primera es que se encuentre disuelto en el agua de forma natural, y la segunda y más habitual; que proceda del uso de coagulantes de este metal en el pretratamiento de la propia planta, indicando, en tal caso, un funcionamiento incorrecto de la coagulación-filtración. El aluminio puede precipitar como hidróxido si se supera su producto de solubilidad o si se modifica el pH del agua. En combinación con sílice da lugar a aluminosilicatos y también forma una capa impermeable sobre la membrana.

Precipitación de sales

La **precipitación de sales** en las membranas se produce cuando su concentración en el agua de rechazo supera el producto de solubilidad. Las sales que normalmente pueden crear problemas de precipitaciones son los sulfatos de calcio, bario y estroncio, el carbonato de calcio, el fluoruro de calcio y la sílice. Para conocer el riesgo de precipitación de una sal determinada, hay que tener en cuenta su concentración en el agua de entrada, la conversión de la planta de membranas y el producto de solubilidad. En la tabla nº 5 se agrupan las solubilidades y los pK_{ps} de las especies químicas con mayor probabilidad de existencia en las condiciones de trabajo habituales en una planta de ósmosis inversa.

¹ Anfótero: que presenta a la vez propiedades ácidas y básicas.

Tabla 5. Solubilidad en gramos de sal /100 g agua y pK_{ps} ² de las sales de mayor interés en desalación

Sal	Fórmula	Solubilidad a 20°C	Solubilidad a 30°C	pK_{ps} (25°C)
Hidróxido de aluminio	Al(OH) ₃			33,5
Fosfato de aluminio	AlPO ₄	0,00015		20
Carbonato de bario	BaCO ₃	0,0022	0,0024	8,6
Sulfato de bario	BaSO ₄	2,4 x 10 ⁻⁴	2,85 x 10 ⁻⁴	10
Carbonato cálcico	CaCO ₃	0,0014		8,32
Bicarbonato cálcico	Ca(HCO ₃) ₂	16,35	16,60	10,5
Fluoruro cálcico	CaF ₂	0,0016	0,0017	32,7
Fosfato cálcico	Ca ₃ (PO ₄) ₂	0,0020	0,2090	5,0
Sulfato cálcico	CaSO ₄	0,2010		
Hidróxido ferroso	Fe(OH) ₂			16,3
Sulfuro ferroso	FeS			18,1
Hidróxido férrico	Fe(OH) ₃			38,6
Fosfato férrico dihidrato	FePO ₄ ·2H ₂ O			15
Carbonato de plomo	PbCO ₃	0,00011		13,1
Fluoruro de plomo	PbF ₂	0,064	0,068	7,5
Sulfato de plomo	PbSO ₄	0,0041	0,0049	7,6
Fosfato de NH ₄ ⁺ y Mg	MgNH ₄ PO ₄			12,6
Carbonato de magnesio	MgCO ₃			4,58
Fluoruro de magnesio	MgF ₂	insoluble		8,15
Hidróxido de magnesio	Mg(OH) ₂	insoluble		10,9
Fosfato de magnesio	Mg ₃ (PO ₄) ₂			24
Hidróxido de manganeso	Mn(OH) ₂			13,4
Carbonato de estroncio	SrCO ₃	0,001		9,25
Sulfato de estroncio	SrSO ₄	0,0114		6,42
Carbonato de cinc	ZnCO ₃	0,001		9,84

Control por antiincrustantes

Para evitar la precipitación de sales, tales como los sulfatos, carbonatos, fluoruro cálcico, sílice y óxidos metálicos, que pueden precipitar al aumentar su concentración en el interior de las membranas, se utilizan productos antiincrustantes. Este tipo de sustancias actúa sobre la formación de crista-

² $pK_{ps} = -\log K_{ps}$, siendo K_{ps} , la constante del producto de solubilidad.

les limitándolo, al mantener los iones en sobresaturación en el agua concentrada.

Para calcular las dosis de antiincrustante hay que consultar con los fabricantes, que recomendarán el tipo de productos a utilizar y la dosis adecuada.

Materia orgánica

El atascamiento de los elementos de membranas por materia orgánica, ocurre cuando queda adherida en sus diferentes superficies. La materia orgánica que puede provocar este atascamiento puede ser de origen natural procedentes del humus vegetal (lavado de turbas, ácidos húmicos y tánicos, etc.) que suelen transmitir color; o proveniente de la contaminación, como sería el caso de los aceites, grasas y otros compuestos orgánicos. Estas sustancias se deben eliminar en el pretratamiento.

Actividad biológica del agua

Los crecimientos microbiológicos en las membranas ocurren cuando el agua de aportación contiene los microorganismos y los nutrientes necesarios para permitir un rápido desarrollo sobre la superficie del elemento. Si las membranas no son biodegradables, esta proliferación microbiológica produce efectos similares a un atascamiento provocado por sustancias coloidales. Cuando son biodegradables, los microorganismos son capaces de destruir la capa activa de estas membranas, que de este modo pueden llegar a perder sus propiedades.

Presencia de gases disueltos

Otras causas de atascamiento de las membranas, aunque poco frecuentes, son la formación de azufre elemental y sulfuros metálicos. En efecto, como consecuencia de la baja concentración de oxígeno disuelto característica de las aguas subterráneas, pueden contener sulfuro de hidrógeno soluble que pasará a azufre elemental insoluble como consecuencia de procesos de oxidación naturales o aplicados en el pretratamiento. Si el agua que contiene sulfuro de hidrógeno no se oxida en el pretratamiento, no se producirá atascamiento alguno ya que el gas se difunde a través de las membranas, pudiéndose eliminar en el postratamiento.

3.1.1. Pretratamientos físico-químicos

Los pretratamientos físico-químicos de las aguas que alimentan a las plantas de desalación con membranas, son procesos unitarios de tratamiento muy

similares a los empleados en las ETAP, aunque los requerimientos de ciertos valores paramétricos del agua pretratada, son más exigentes que los demandados para el tratamiento convencional de las aguas de consumo humano.

Los **procesos de pretratamiento** más utilizados en las plantas de membranas son los siguientes:

- Acidificación
- Dosificación de inhibidores de la incrustación.
- Oxidación.
- Coagulación-floculación.
- Decantación.
- Flotación.
- Filtración por lecho filtrante.
- Filtración por cartuchos.
- Desinfección.
- Reducción.
- Adsorción.
- Desgasificación.

Acidificación y dosificación de inhibidores de la incrustación

Para evitar la precipitación del carbonato cálcico se puede acidificar el agua, ya que la disminución del pH aumenta la solubilidad de esta sal. Otra alternativa es la **dosificación de antiincrustantes**, especialmente en las instalaciones de tratamiento de aguas salobres. Además de evitar la precipitación de carbonatos, estos productos son también efectivos en la prevención de otras incrustaciones, como son las debidas al sulfato cálcico, sulfato de bario, sulfato de estroncio y sílice. Así mismo, son efectivos para evitar la formación y acumulación de óxidos metálicos (hierro y manganeso, fundamentalmente) en la superficie de las membranas.

Oxidación

La oxidación es un proceso que se utiliza para eliminar los elementos y compuestos reductores que pueden estar presentes en el agua, sobre todo si es de origen subterráneo. En particular se emplea para eliminar sustancias orgánicas, hierro ferroso y manganeso divalente y el sulfuro de hidrógeno. Los oxidantes comúnmente más utilizados son el hipoclorito sódico y el permanganato potásico. Tras este proceso de oxidación siempre se realiza una filtración para eliminar las formas insolubles oxidadas. Por último, y en el caso de utilizar membranas sensibles a los oxidantes, se añade un agente **reductor** como el metabisulfito sódico y disulfito sódico

al agua para eliminar la concentración de oxidante residual presente en la misma.

Coagulación-floculación. (CF)

La coagulación-floculación es un proceso que sirve, conjuntamente con la decantación (D) y la filtración (F), para la eliminación de sustancias coloidales tanto inorgánicas como orgánicas que podrían llegar a atascar las membranas. Se basa en la neutralización de la carga asociada a las partículas coloidales mediante la adición al agua de una sal metálica o coagulante. Como coagulante se emplean generalmente sales de aluminio o de hierro.

Existen diversos tipos de floculantes y coagulantes que deberán ser aconsejados por el diseñador y siempre de acuerdo con lo admitido por la legislación vigente.

En ocasiones es aconsejable realizar ensayos de coagulación-floculación previos a la selección de los aditivos.

Decantación

Cuando tras la coagulación-floculación el agua presente una concentración de materia floculada superior a 30-50 mg/L se deberá decantar el agua. Esta etapa se podría omitir y filtrar directamente, si el contenido en materia floculada fuese inferior a 20-30 mg/L.

Los decantadores eliminan materia en suspensión y la materia floculada por sedimentación gravitatoria.

Existen muchos tipos de decantadores. Los más avanzados están dotados de un sistema de recirculación de fangos y lamelas (placas). También existen floculadores-decantadores que en ocasiones se emplean con adición de hidróxido cálcico o hidróxido sódico para regular el pH y/o incrementar carga, como por ejemplo en los procesos de descarbonatación con la adición de cal por vía húmeda.

En cada caso se instala el más conveniente en razón de la carga y tipo de materia a eliminar, así como en función de las condiciones de espacio disponibles.

Flotación

Esta técnica se emplea para la eliminación de determinado tipo de sólidos capaces de flotar mediante la inyección de microburbujas de aire. La flotación puede considerarse como un procedimiento alternativo a la decantación que, en su caso, estará emplazado siempre antes de la filtración.

Filtración

La etapa de filtración es obligatoria en el pretratamiento del agua bruta, salvo en casos muy especiales cuando el agua captada tiene un SDI_{15} inferior a 3, y se mantiene constante a lo largo del año y durante la vida de la planta.

Cuando se trate de un agua floculada pero no decantada se deberá mantener una velocidad de filtración de $5-10 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m}^2$ y será preferible usar filtros de lechos o capas múltiples, con el fin de evitar la sobrecarga y rápida saturación de los filtros y mejorar su rendimiento. En cualquier caso, y en lo que a velocidad de filtración respecta, siempre se deberán seguir las instrucciones del fabricante.

Los filtros deberán estar dotados de un sistema de reparto de flujo que garantice un régimen de circulación lo más laminar posible, así como con un sistema de aire a baja presión a contracorriente que facilite el lavado del material filtrante.

En ocasiones, se emplea el agua de rechazo de osmosis para hacer retrolavados con el fin de ahorrar agua en este servicio.

En general, para conocer las necesidades y composición del pretratamiento es aconsejable conocer cual es el recuento de partículas y su distribución porcentual.

Figura 8. Sistema de filtración de desbaste



Figura 9. Filtración de seguridad.
Ambas imágenes por cortesía de AQUAESPÑA



Filtración por cartucho (filtración de seguridad)

La filtración por cartucho es el mínimo pretratamiento necesario para una planta de membranas. El poro nominal de los cartuchos habitualmente está comprendido entre 1 y 5 μm nominales (equivalente a unos 20 μm absolutos) para asegurar la protección de las membranas ante la posibilidad de que el agua arrastre macropartículas en suspensión.

Los filtros de cartucho son elementos de seguridad inmediatamente anteriores a las membranas y no deben utilizarse para una eliminación sistemática de partículas en suspensión. Por tanto, a la salida de procesos físico-químicos previos a la filtración por cartuchos, las aguas deben presentar una turbidez inferior a 1 UNF; y los valores de SDI_{15} obtenidos deben ser adecuados para las membranas usadas en desalación.

Desinfección

La desinfección del agua es un proceso destinado a reducir al máximo el posible atascamiento de las membranas por crecimientos microbiológicos. La desinfección se puede llevar a cabo por dosificación de un oxidante-desinfectante químico (cloro o sus derivados normalmente) o mediante procedimientos físicos como puede ser la radiación ultravioleta. Este último sistema se puede utilizar cuando se desea evitar la adición de oxidantes al agua.

Como se indicó anteriormente, cuando se emplean desinfectantes en el agua en sistemas con membranas sensibles a los oxidantes, se añade un agente **reductor** como el bisulfito sódico al agua, para evitar que el agente oxidante alcance las membranas. En estos casos, puede ser necesario repetir la desinfección en el postratamiento.

Adsorción

En el caso de que el agua contenga una concentración importante de materia orgánica, ya sea de origen natural o por contaminación, se puede reducir por adsorción utilizando filtros de carbón activo. Debe tenerse presente que los lechos de carbón activo, que también elimina eficazmente el cloro libre, son susceptibles de albergar colonias de microorganismos (de difícil desarraigo) que provocarán problemas de bioensuciamiento en las membranas de OI. El diseño del procedimiento de desinfección deberá considerar este extremo.

Desgasificación

Cuando existen gases en el agua bruta capaces de perjudicar el funcionamiento de la planta, el pretratamiento puede incluir un proceso de desgasifi-

ficación que podrá ser atmosférica con arrastre por aire, o a vacío con arrastre por vapor, dependiendo de la calidad del agua que se desea obtener tras la desgasificación, del tipo de gas, etc.

3.2. Pretratamiento mediante membranas

La aplicación de tecnologías de membrana, tales como **microfiltración** (MF), **ultrafiltración** (UF) y la **nanofiltración** (NF), introducen nuevas posibilidades en las técnicas de pretratamiento en el campo de la desalación por osmosis inversa, en particular cuando las aguas tienen un alto poder de atascamiento. Estas tecnologías han sido intensivamente empleadas en el tratamiento de las aguas superficiales destinadas a consumo humano, así como en tratamiento terciario de aguas residuales urbanas.

El rendimiento de estas membranas es tan alto que partiendo de aguas 500 UNT de turbidez y 200 mg/L de sólidos en suspensión, se podría llegar a obtener un agua de 0,05-1,0 UNT y SDI₁₅ de 0,5-3.

Desde el punto de vista teórico-práctico, el flujo J de agua a través de membranas de MF y UF, está definido por la siguiente ecuación fundamental:

$$J = \frac{\Delta P}{\eta \times R_{totm}}$$

Donde J = Flujo de agua ($m^3/m^2 \cdot s$).

ΔP = presión diferencial o presión transmembrana aplicada (PTM) en N/m^2 .

η = viscosidad dinámica ($N \cdot s/m^2$).

R_{totm} = resistencia total de la membrana ($1/m$).

El flujo de agua a través de la membrana es proporcional a la presión neta aplicada o **presión transmembrana**; e inversamente proporcional a la viscosidad, y por lo tanto a la temperatura, y a la resistencia total de la membrana. Esta resistencia está provocada por fenómenos de ensuciamiento, tales como absorción interna de poros, bloqueo de poros, concentración por polarización (más suciedad en un extremo que en el otro), deposición, compresión y bloqueo en forma de torta sobre la membrana.

En flujo directo, no cruzado, la presión transmembrana (PTM) puede obtenerse de acuerdo con la siguiente expresión:

$$PTM = P_i - P_p$$

Donde P_i = presión de entrada a membrana.
 P_p = presión de permeado.

Caso de que el flujo sea cruzado o tangencial, la PTM se determina por:

$$PTM = \frac{P_e + P_s}{2} - P_p$$

Donde P_e = presión de entrada a membrana.
 P_s = presión de salida de membrana.
 P_p = presión del permeado.

Finalmente, el caudal de agua obtenido en un sistema de membranas de MF y UF, puede calcularse mediante la expresión:

$$Q_p = J \times S$$

Donde Q_p = caudal de agua tratada o permeada, en L/h
 J = flujo de paso a través de la membrana, en L/h/m²
 S = superficie de membrana disponible, en m²

La dificultad más importante que presentan hasta ahora estas tecnologías de membrana de MF/UF para ser utilizadas como pretratamiento en la desalación, es que sus precios son todavía muy elevados, lo que encarece los costes de inversión y de operación, aproximadamente entre un 15 % y un 20 %, con respecto a los pretratamientos físico-químicos convencionales. Por otro lado, hay que tener en cuenta que estas tecnologías no permiten reducir apreciablemente la cantidad de materia orgánica, la UF como máximo un 30 %, salvo que se puedan utilizar previamente coagulantes o carbón activo en polvo.

Respecto a la utilización de membranas de nanofiltración en pretratamientos de plantas desaladoras, la aplicación más importante está centrada en la evaporación MSF, lo que permite disminuir el consumo energético entre un 25 a 30%, reduciendo el potencial de formación de incrustaciones, principalmente de sulfato y carbonato cálcico.

3.2.1. Microfiltración

Ésta fue la primera tecnología de membrana, y se utiliza principalmente para el tratamiento de aguas superficiales destinadas a consumo humano desde hace más de dos décadas, con objeto de eliminar o reducir protozoos, como *Cryptosporidium* y *Giardia*, turbidez, color, algas, bacterias y, en

algunos casos, virus ligados a materia particulada; como alternativa a los procesos físico-químicos convencionales descritos anteriormente.

Las plantas de microfiltración emplean **membranas orgánicas**, con tamaños de poro entre 0,1 a 0,2 μm . Están construidas, básicamente, en materiales como polipropileno, propileno o polímero fluorado. También existen membranas tubulares de tipo cerámico, con capa activa de alúmina.

La microfiltración puede operarse en dos configuraciones hidráulicas diferentes. En **flujo cruzado** o en **flujo directo**. En la primera, un **flujo tangencial**³ sobre la superficie de la membrana por medio de recirculación del concentrado, permite reducir la polarización por la concentración de materiales retenidos sobre su superficie, lo que suele provocar pérdidas de caudal y de presión. La aportación del agua de entrada al sistema, compensa la producción de agua microfiltrada y la pérdida por purgas de desconcentración. En la segunda, el flujo de agua sobre la superficie de la membrana es directo o perpendicular, sin aplicar ningún flujo cruzado ni recirculación. Un barrido secuencial, automático y de corta duración, permite mantener el flujo de agua tratada de forma estable.

La utilización de la microfiltración en pretratamientos de desalación por membranas de ósmosis inversa, permite reducir su grado de atascamiento, debido a la alta reducción de coloides inorgánicos y orgánicos, responsables en su mayor parte del SDI_{15} de las aguas de entrada, y cuyo rango de tamaño se encuentra entre 0,1 y 10 μm .

Las **instalaciones de microfiltración**, están compuestas, básicamente, por:

- **Prefiltro** de protección, para eliminar partículas de gran tamaño que puedan obstruir las fibras capilares de las membranas, con mallas autolimpiables con tamaño de luz de 500 μm .
- **Bombeo** de aportación a membranas del agua de entrada, con variador de frecuencia.
- Sistema de **retrolavado secuencial**, según la pérdida de carga, con aire y/o agua, con o sin producto químico, incluyendo compresor de aire y bombeo de agua tratada.
- Sistema de **limpieza química**, para recuperar las prestaciones de las membranas si no han sido efectivos los diversos retrolavados establecidos.
- **Test de integridad** de membranas, para asegurar que no tienen roturas y que continúan siendo una barrera efectiva.
- Elementos de **gobierno y control** para que las operaciones de funcionamiento normal, lavados y limpiezas químicas sean totalmente automáticas.

³ Es decir, de forma paralela a la superficie de la membrana.

3.2.2. Ultrafiltración

La ultrafiltración es un proceso de membrana situado entre la microfiltración y la nanofiltración. El tamaño de poro generalmente está comprendido entre 0,1 y 0,001 μm , aunque la forma más común de expresar el tamaño de exclusión en ultrafiltración es referido al **corte molecular**, expresado en Daltons. La definición generalmente aceptada de corte molecular se refiere al peso molecular de macromoléculas tales como dextrano y proteínas globulares, entre otras, que son retenidas en un 90 % por la membrana de ultrafiltración. (Figura 10).

Figura 10. Ultrafiltración con membrana espiral. Por cortesía de AQUAESPaña



Aunque los cortes moleculares de las membranas de ultrafiltración están comprendidos entre 5.000 y 500.000 Daltons, suelen usarse en pretratamientos valores de cortes moleculares comprendidos entre 100.000 y 150.000 Daltons, equivalentes a un tamaño de poro aproximado de 0,025 μm , lo que permite eliminar macromoléculas, proteínas, virus, y sílice coloidal, además de lo expuesto en punto 3.2.1 dedicado a la microfiltración.

El espectro de filtración ayuda a comprender las posibilidades de las diferentes tecnologías de membranas en función del tamaño de poro.

Figura 11. Espectros de filtración o potencial de separación. Modificado de GE Osmonics

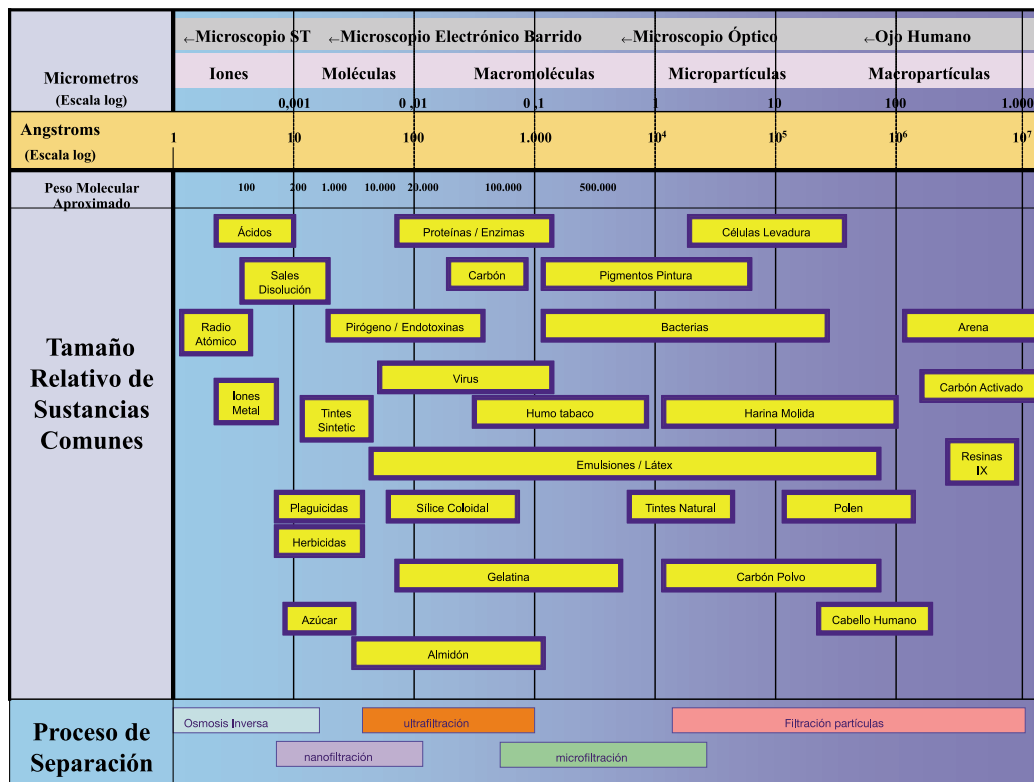
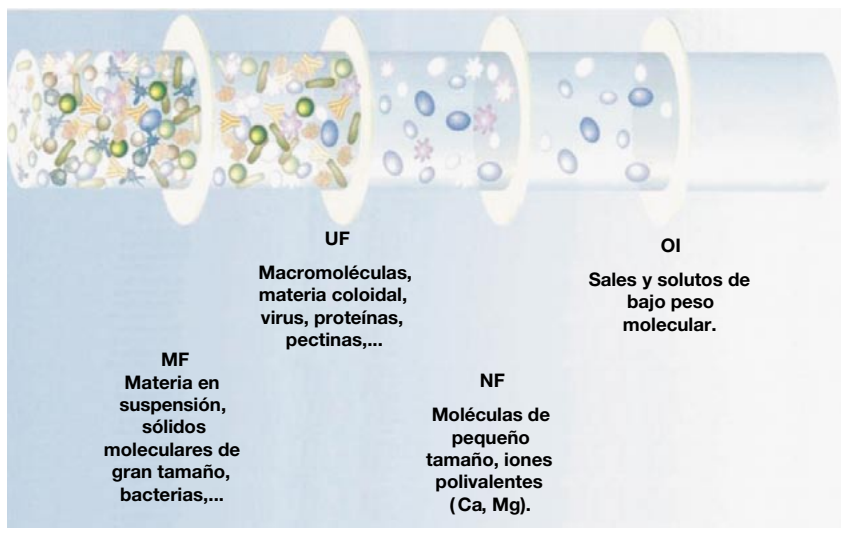


Figura 12 . Esquema de una membrana. Imagen cortesía de Dow Chemical Ibérica. S.L.

SEPARACIÓN POR MEMBRANAS



La mayoría de las membranas son de naturaleza orgánica, fabricadas en materiales poliméricos como polisulfona, fluoruro de polivilideno, poliamida, acetato de celulosa, etc; y cuyas configuraciones suelen ser en fibra capilar de distintos diámetros, en forma de membranas planas en estructura compacta o casete, y también de arrollamiento en espiral. Por otro lado, también existen membranas inorgánicas, de tipo cerámico multicanal a base de óxido de zirconio, aunque son empleadas más bien en tratamientos de aguas industriales.

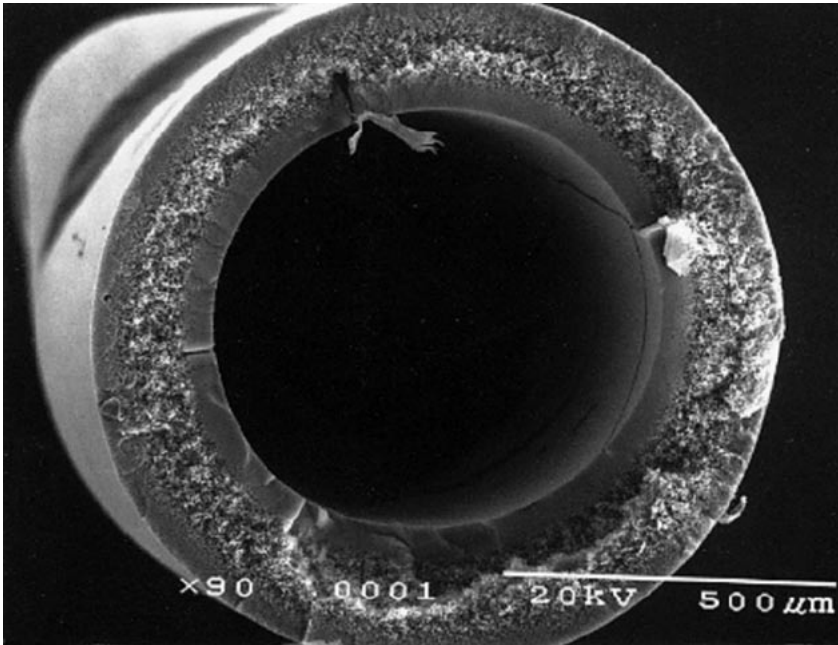
Al igual que la microfiltración, las membranas de ultrafiltración se utilizan en sistemas tanto de flujo cruzado como de flujo directo.

De forma muy similar a las instalaciones de microfiltración, las de ultrafiltración, están compuestas, básicamente, por:

- **Prefiltro** de protección, para eliminar partículas de gran tamaño que puedan obstruir las fibras capilares de las membranas, con mallas autolimpiables con tamaño de luz comprendido entre 80 y 150 μm .
- **Bombeo** de aportación a membranas del agua de entrada, con variador de frecuencia.
- Sistema de **retrolavado secuencial**, según la pérdida de carga, con aire y/o agua, con o sin producto químico, incluyendo compresor de aire y bombeo de agua tratada.

- Sistema de **limpieza química**, para recuperar las prestaciones de las membranas, si no han sido efectivos los diversos retrolavados establecidos.
- **Test de integridad** de membranas, para asegurar que no tienen roturas y que continúan siendo una barrera efectiva. **La realización de este test** es recomendado para algunos tipos de membranas.
- **Elementos de gobierno y control** para que las operaciones de funcionamiento normal, lavados y limpiezas químicas sean totalmente automáticas.

Figura 13. Detalle de membrana capilar de ultrafiltración. Imagen cortesía de AQUAESPAÑA



Esta tecnología de ultrafiltración, de forma similar a la tecnología de microfiltración, permite optimizar el diseño de los sistemas de desalación con membranas, aumentando los flujos, es decir, los litros por hora y por metro cuadrado de membrana; suministrando agua a los sistemas de desalación con ósmosis inversa con valores de SDI_{15} generalmente inferiores a 3.

Tabla 6. Resumen de los resultados de un estudio de eliminación de diferentes microorganismos por ultrafiltración

Microorganismo	Concentración en agua de aportación	Concentración en el agua filtrada	Eliminación (unidades logarítmicas)
<i>Giardia</i> , (quistes ⁴ /L)	2 x 10 ⁹	<1	>9
<i>Cryptosporidium</i> , (ooquistes/L)	1,5 x 10 ⁹	<1	>8
Bacteriófago MS2 UFC/L	5 x 10 ⁸	5 x 10 ³	>4,9

El virus bacteriófago MS2 tiene un tamaño de 0,027 μm y es más pequeño que el tamaño de poro de las membranas de UF. Sin embargo, se alcanza una elevada eliminación, debido probablemente a la adsorción del virus sobre las partículas en suspensión, a la adsorción sobre las membranas, o a la filtración secundaria debida al ensuciamiento (fouling) de la membrana. Realmente existe una tendencia a que mejore la eliminación del MS2 a medida que aumenta el ensuciamiento de la membrana.

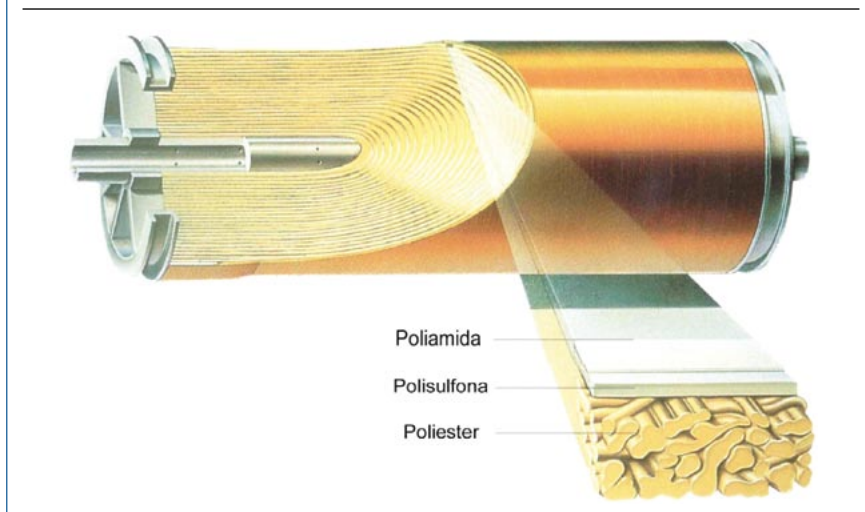
3.2.3. Nanofiltración

La nanofiltración, situada entre la ultrafiltración y la ósmosis inversa, utiliza membranas semipermeables con un tamaño aproximado de poro equivalente a 0,001 μm , es decir un nanómetro. Como característica diferencial del proceso de ósmosis inversa, cabe destacar que los iones divalentes (90 - 98%) son rechazados más selectivamente que los monovalentes (50% - 75%), siendo sus características más destacadas esta capacidad selectiva de iones y su funcionamiento a menor presión.

Aunque su empleo mayoritario se realiza como tratamiento principal de aguas superficiales para reducir el contenido de materias orgánicas antropogénicas tales como plaguicidas, materia orgánica de origen natural (ácidos húmicos), dureza total y sulfato de calcio, principalmente; la aplicación como tecnología de pretratamiento suele ser empleada en plantas de desalación por evaporación, con objeto de reducir el contenido de sulfatos y carbonatos de calcio, para facilitar la elevación de la temperatura máxima de funcionamiento y evitar la precipitación de estas sales. Estas precipitaciones provocan problemas de obstrucción y corrosión de equipos y tuberías en los procesos de desalación que utilizan energía calorífica.

⁴ Quiste y ooquiste. Formas de resistencia y propagación de parásitos. Tanto *Giardia lamblia* como *Cryptosporidium parvum* son parásitos humanos (protistas).

Figura 14. Membrana de nanofiltración arrollada en espiral. Imagen cortesía de AQUAESPAÑA/DOW



Suelen ser membranas de arrollamiento en espiral, compuestas generalmente de poliamida (polipiperazinamida) como capa activa, y de polisulfona y poliéster como capas de soporte. Existen en el mercado otras membranas de nanofiltración con capas activas distintas tales como polivinilalcohol y polisulfona sulfonada, de configuración arrollada en espiral o fibra hueca.

Al igual que la ósmosis inversa, la nanofiltración requiere de un pretratamiento del agua de aportación para evitar el atascamiento de las membranas por partículas coloidales y por precipitación química sobre ellas, causa de frecuentes paradas para su limpieza.

3.3. Pretratamientos para procesos de destilación/evaporación

En los procesos de desalación por destilación, la **misión del pretratamiento** es eliminar o reducir al máximo posible el riesgo de precipitación de sales insolubles en las superficies de intercambio de calor, y la eliminación de gases no condensables capaces de reducir el coeficiente de transmisión de calor, y provocando serios problemas de corrosión en los evaporadores y en los equipos de la planta.

La **procedencia del agua** de entrada no es muy importante para el pretratamiento de una planta de destilación, ya que estos procesos se utilizan sólo para desalar agua de mar, y los constituyentes que causan los problemas de transmisión de calor o corrosiones no suelen variar mucho de unos mares a otros. Por este motivo, sólo se expondrá el caso del pretratamiento del agua de mar.

3.3.1. Pretratamientos habituales

Como se indicó en el capítulo 2, una de las características del agua de mar, es que contiene sales con tendencia a precipitar tanto por efecto del calor, como de la concentración; ya que al iniciarse el proceso de desalación, la corriente de agua en la que las sales permanecen, se concentra en ellas, pudiendo superar el producto de solubilidad de algunas de las sales, con lo cual precipitarían.

Otro de los problemas del agua de mar son los gases disueltos, aire principalmente, ya que este tipo de gases se desprenden en los procesos de evaporación y se acumulan sobre las superficies de transferencia de calor, disminuyendo el coeficiente de transferencia. Por ello, se hace necesaria su eliminación antes de que el agua pase a los evaporadores. Además, la presencia de oxígeno facilita los fenómenos de corrosión de las superficies metálicas de la que están construidas los evaporadores.

Finalmente otro de los problemas habituales en los procesos de desalación por destilación es la formación de espumas en el interior de los evaporadores. Estas espumas reducen el rendimiento de la evaporación y contaminan el producto obtenido, por esta razón hay que evitar su formación.

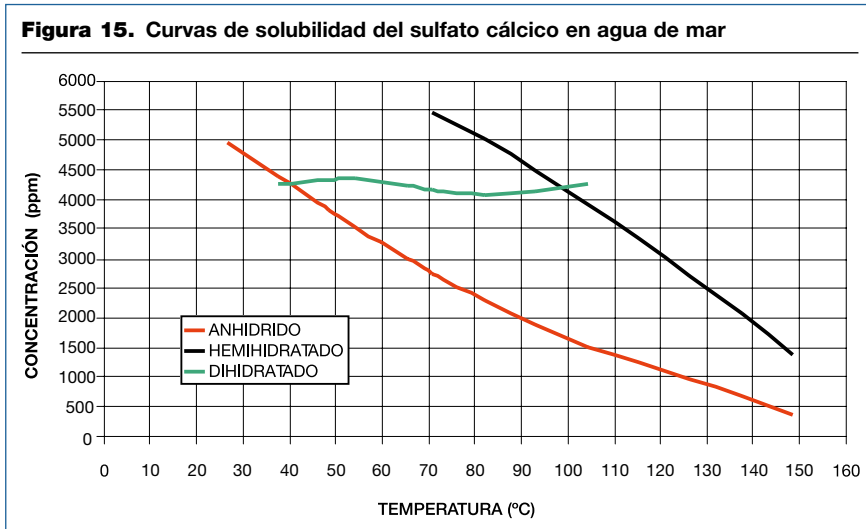
Vamos a analizar en detalle cada uno de estos pretratamientos.

3.3.2. Eliminación de incrustaciones

Como ya se ha indicado en el apartado 3.2, una consecuencia de la concentración de sales que se produce durante el proceso de desalación, es la posibilidad de que algunas sales, como los sulfatos y los carbonatos, precipiten si se llega a rebasar su producto de solubilidad en el agua. Por otra parte, en los procesos de destilación hay que calentar las corrientes de agua que intervienen y como la solubilidad del sulfato cálcico disminuye al aumentar la temperatura, el riesgo de precipitación de la sal, en esas condiciones, es mayor. Otra consecuencia de aumentar la temperatura, es que los bicarbonatos se descomponen transformándose en carbonatos insolubles que precipitan. Para prevenir incrustaciones se remite al lector al apartado 3.2.1

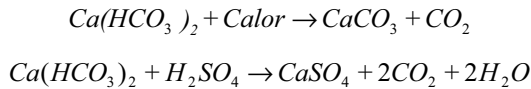
Sulfato de calcio

En la figura 15 se pueden ver las curvas de solubilidad para el sulfato cálcico. La situada más a la izquierda corresponde al sulfato anhídrico. Para que se puedan formar este tipo de cristales es preciso mucho tiempo de residencia y ausencia de agitación del agua, para que se vayan encontrando los iones y formen la red cristalina. Estas condiciones no se dan en los procesos de evaporación, donde las corrientes están continuamente agitadas y los procesos son muy dinámicos, por tanto, este tipo de cristales no llegan a formarse. Sí sucede en cambio con los del sulfato cálcico hemihidratado, cuya formación es prácticamente instantánea cuando se alcanzan las condiciones de concentración y temperatura de la curva. Debido a que los sulfatos son muy difíciles de eliminar por procedimientos químicos, esta curva nos marca los límites prácticos a los que se pueden trabajar los procesos de destilación en cuanto a concentración de la corriente más caliente y la temperatura máxima que puede alcanzarse. Así, para una concentración de sulfato cálcico de 2.800 ppm (habitual en el proceso de M.S.F.), la temperatura máxima teórica es de 126°C, pero en la práctica no se deben sobrepasar los 120°C, ni una concentración de esta corriente por encima de los 60.000 mg/L. de sales totales disueltas.



Control de carbonato cálcico

Los bicarbonatos pueden precipitar como carbonato cálcico por dos razones: una por efecto de la temperatura que provoca su descomposición y transformación en carbonatos insolubles, y otra por aumento del pH, ya que a partir de valores superiores a 8,2 se produce transformación a carbonatos insolubles. Las ecuaciones químicas de este proceso son las siguientes:



La precipitación de estas sales se puede evitar mediante la adición controlada de un ácido, es lo que se conoce como plantas con tratamiento ácido.

Control por antiincrustantes

Otra forma en la que se evita la precipitación de los carbonatos, sulfatos, sílice, sulfato de bario y sulfatos de estroncio, es mediante la adición de un **antiincrustante**. Este tipo de sustancias actúa sobre la formación de los cristales, impidiendo su aparición y manteniendo los iones en sobresaturación en el agua. Para calcular los límites de utilización de estos productos hay que consultar con su fabricante, quien comunicará en cada caso la concentración y las temperaturas recomendadas. Debe tenerse en cuenta que este tipo de sustancias se descomponen con la temperatura, pues se hidrolizan dejando de ser activos, por tanto deben conocerse sus límites de resistencia. En el mercado aparecen constantemente nuevos productos.

3.3.3. Desgasificación y descarbonatación

Como ya se ha indicado, la presencia de gases en el agua puede influir muy negativamente en los procesos de destilación, por ello se hace necesaria su eliminación mediante un desgasificador térmico, donde una corriente de vapor y en condiciones de máximo vacío, produce el desprendimiento de los gases que serán evacuados a la atmósfera mediante un sistema de vacío (eyectores o bombas de vacío). La eficacia de estos equipos llega a extraer hasta el 98% de los gases contenidos en el agua.

Si el tratamiento para la eliminación de los bicarbonatos ha sido de adición de ácido, se producirá una gran cantidad de CO_2 , que permanecerá en disolución. Normalmente, este gas se elimina previamente a la desgasificación para evitar la sobrecarga y el sobredimensionamiento del equipo de vacío, por medio de un descarbonatador atmosférico. El rendimiento de

este tipo de descarbonadores llega a dejar en el agua menos de 10 mg/L de CO₂.

La descarbonatación consiste en una torre en la que el agua se pulveriza o dispersa finamente, percolando sobre un relleno que aumenta la superficie de contacto (normalmente anillos Raschig, monturas o similares). En contra-corriente se introduce aire que arrastra el gas en disolución evacuándolo a la atmósfera por la parte superior de la torre. Para diseños correctos, el rendimiento de este tipo de descarbonadores es elevado, y permite extraer hasta el 98% del CO₂ contenido en el agua, pero saturándola de aire, por ello posterior al descarbonador se sitúa el desgasificador térmico a vacío.

El desgasificador consiste en una torre, cerrada y a vacío, en la que el agua se pulveriza o dispersa finamente, percolando sobre un relleno que aumenta la superficie de contacto (normalmente anillos Raschig, monturas o similares). En contra-corriente se introduce vapor que arrastra los gases en disolución evacuándolos a la atmósfera mediante su extracción por un equipo de vacío (eyectores, bombas de vacío, etc). Para diseños correctos, el rendimiento de este tipo de desgasificadores es elevado, y permite extraer hasta el 99% de los gases disueltos en el agua.

3.3.4. Eliminación de espumas. Antiespumantes

En el caso del proceso de destilación, siempre se lleva a cabo con una intensa agitación del agua de mar en evaporación para facilitar el desprendimiento del vapor. Por ese motivo en el interior de los equipos se forman gran cantidad de espumas que llegan a crear problemas y una forma de solucionarlos es mediante la adición de un antiespumante en el agua de aportación. Estos antiespumantes son del mismo tipo de los utilizados domésticamente en los lavavajillas y lavadoras. La dosificación suele ser de 1 a 2 ppm en el agua de aportación, lo que representa entre 0,2 a 0,4 ppm en el reciclado.

4. Técnicas de desalación

Tras las etapas preliminares de pretratamiento, el agua es desalada mediante diversos procedimientos. Los sistemas más empleados en la actualidad se pueden dividir en dos grandes grupos:

- Desalación mediante membranas.
- Desalación por destilación o evaporación.

Sin embargo, la tecnología de desalación más empleada actualmente es por medio de membranas, y en concreto mediante **ósmosis inversa (OI)**. Este capítulo se adentra en los conceptos básicos de las tecnologías existentes.

Figura 16. Aspecto general del interior de una desaladora de osmosis inversa. Imagen cortesía de INALSA



4.1. Tecnologías de membrana

Las tecnologías de membrana suponen un paso adelante en la filtración convencional aplicada tradicionalmente en el tratamiento del agua.

En este capítulo se explican los conceptos fundamentales de la ósmosis inversa, la nanofiltración y la electrodiálisis.

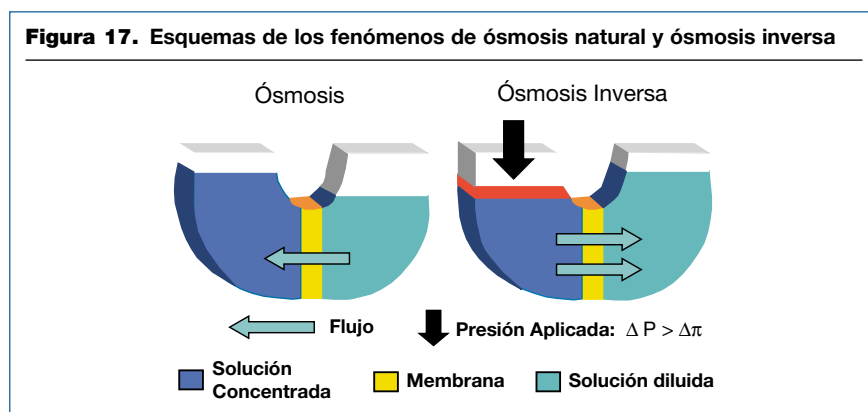
4.1.1. Ósmosis inversa

El fenómeno de la ósmosis ocurre cuando, a través de una membrana semi-permeable, el agua fluye desde la solución de menor salinidad hasta otra de mayor concentración salina. Es un fenómeno que tiene lugar en diversos procesos naturales como, por ejemplo, en la entrada de agua a través de la membrana celular de los seres vivos.

Según una regla fundamental de la naturaleza, este sistema intentará alcanzar el equilibrio, es decir, intentará alcanzar la misma concentración a ambos lados de la membrana. El flujo de agua desde la solución más diluida hacia la más concentrada se detendrá cuando se alcance un equilibrio entre ambas concentraciones. La fuerza que provoca ese movimiento se conoce como presión osmótica y está relacionada con la concentración de sales en el interior de ambas soluciones.

La ósmosis inversa consiste en invertir este proceso aplicando una presión superior a la presión osmótica correspondiente, en el lado de la solución más concentrada. Con esto se consigue que la dirección del flujo del agua vaya del lado de la solución más concentrada a la solución más diluida.

En la **figura 17** se ilustran ambos fenómenos:



4.1.1.1. Configuración de membranas de osmosis inversa

La membrana de ósmosis inversa está estructurada y empaquetada cuidadosamente para su integración en las unidades de proceso. Tanto el soporte como el empaquetado tienen como objetivo maximizar el flujo de agua a través de la membrana, minimizando el paso de sales.

Asimismo, el empaquetado debe reducir las pérdidas de carga, así como evitar en lo posible lo que se conoce como «polarización por concentración», que se deriva de la acumulación de sales sobre la superficie de la membrana. Otro factor que se tiene en cuenta en el diseño mecánico, es el paso con suficiente libertad de coloides o partículas, de modo que se reduzcan en lo posible los ensuciamientos de la membrana que a la postre podrían provocar bajos flujos y alto paso de sal.

Comercialmente se consideran cuatro configuraciones básicas:

- **Plato y Marco.**
- **Tubular.**
- **Fibra hueca.**
- **Arrollamiento en espiral.**

4.1.1.2. Configuración Plato-Marco y configuración tubular

Estas configuraciones corresponden a los inicios de la tecnología de la osmosis inversa. Son las configuraciones que se consideraron en los primeros momentos.

Ambas presentan menor densidad de empaquetado de membrana, con el consiguiente mayor coste económico, en comparación con las más modernas configuraciones de arrollamiento en espiral y fibra hueca.

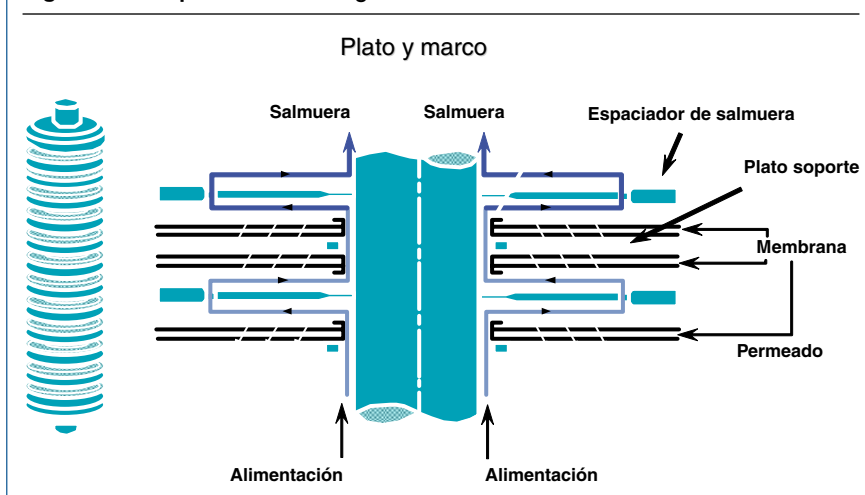
No obstante, este tipo de configuraciones tienen aplicación en la industria alimentaria, por ejemplo para la concentración de zumos de fruta o en tratamiento de aguas residuales.

La **configuración «Plato-Marco»**, que es la primera que se utilizó, usa una membrana plana que se coloca dentro de un marco, circular o rectangular, que actúa de soporte. Las membranas se disponen a ambos lados de un plato por el que se recoge el permeado producido. (Figura 18).

La **configuración tubular** representa una alternativa a la de plato y marco.

La membrana va alojada dentro de un tubo, normalmente de PVC, que soporta la presión. El agua alimenta a la membrana por su interior y el permeado se obtiene por la parte exterior de la misma de manera que el tubo, así dispuesto, produce («suda») el permeado por su exterior que se recoge en el fondo del recipiente en el que va dispuesto dicho tubo.

Figura 18. Esquema de la configuración «Plato-Marco»



4.1.1.3. Configuración Fibra hueca

La fibra hueca se produce con su propia estructura soporte. Estas fibras son tan finas como el tamaño de un cabello humano ($84\ \mu\text{m}$).

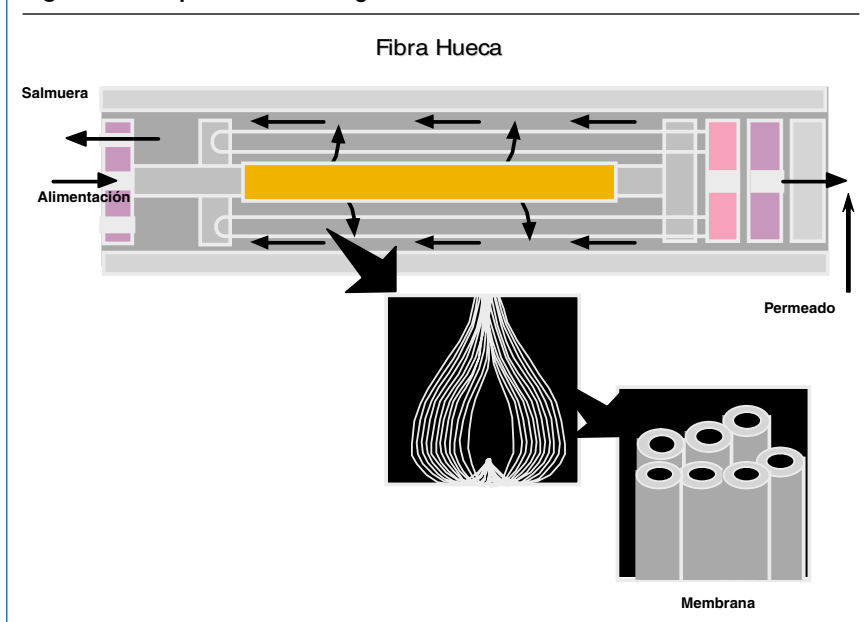
Las fibras se agrupan como tubos en «U» con los extremos abiertos embebidos en una placa epoxy. El conjunto de fibras se encapsula dentro de un recipiente de presión con su punto de alimentación dispuesto en el centro de uno de los extremos.

El flujo dentro de la caja de presión se reparte de forma radial, a través del conjunto de fibras, de modo que el permeado penetra a través de las paredes de la fibra y fluye por el hueco reuniéndose a través del extremo opuesto de la caja de presión. El agua que no ha pasado a través de la membrana, arrastra las sales hacia la salida del concentrado dispuesto en el extremo opuesto.

Esta configuración representa la mayor densidad posible de empaquetado de membrana con la consiguiente mayor relación de producción de agua por volumen ocupado.

No obstante, esta alta densidad de empaquetado deja poco espacio entre las fibras, por ello en este caso las partículas o sólidos en suspensión fluyen con mayor dificultad a través de las fibras provocando problemas de ensuciamiento que son difíciles de solucionar y provocan la consiguiente disminución de rendimiento. (Figura 19).

Figura 19. Esquema de la configuración fibra hueca



4.1.1.4. Configuración en arrollamiento en espiral

En la actualidad, los elementos de ósmosis inversa que se están instalando son los de configuración en espiral. Se fabrican en forma de lámina sobre un material soporte, que en el caso de las actuales membranas de multicapa delgada, T.F.C. (Thin Film Composite), suele ser un poliéster tejido-no tejido. Dos de estas láminas u hojas se agrupan entre sí pero opuestas y separadas por un espaciador que actúa como canal para el flujo de permeado. Ambos lados y uno de los extremos de este conjunto, se sellan mediante unos cordones o líneas de pegamento para formar un conjunto de varias capas a modo de «sobre». El extremo abierto (no pegado) está conectado con el tubo encargado de recoger el permeado, alrededor del cual se enrolla el sobre para formar la espiral. Junto al sobre, se enrolla también una red plástica (espaciador), de modo que queden separadas las superficies de membrana y se mantenga de ese modo suficiente espacio libre para el flujo de agua de alimentación. El elemento así constituido se completa con unas piezas plásticas en los extremos para evitar un posible «efecto telescópico» («telescoping») y se cubre exteriormente con un recubrimiento a base de epoxy-fibra de vidrio que asegura el conjunto. (Figura 20).

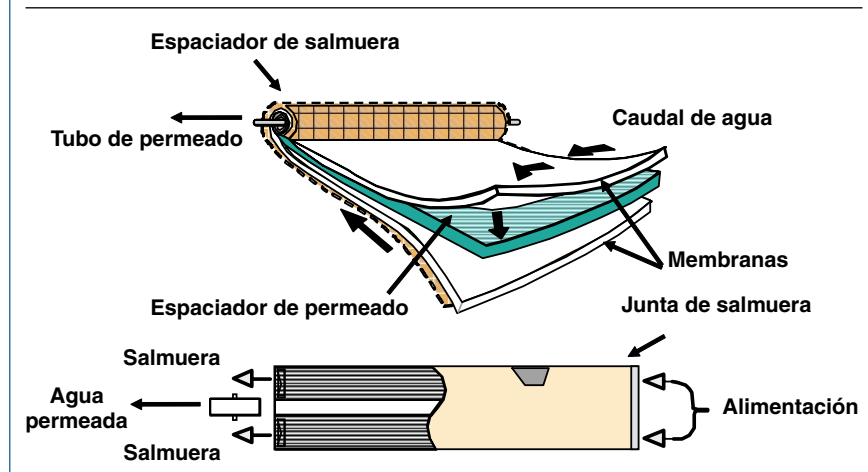
Por último, estos elementos se disponen en recipientes cilíndricos conocidos como **cajas de presión**, capaces de soportar las elevadas presiones de operación. La alimentación se sitúa en un extremo y fluye en paralelo a la dirección del tubo que recoge el permeado. Parte del agua fluye a través de la membrana, recorre un camino espiral y es recogida en el tubo de permeado. El agua que no pasa a través de la membrana circula a lo largo del elemento paralelamente al tubo de permeado, arrastrando las sales hacia la salida de concentrado situada en el extremo opuesto de la caja de presión.

El permeado recogido en el tubo central puede extraerse por cualquiera de los extremos según necesidades del diseño.

En resumen, para esta configuración, los componentes de un elemento de ósmosis inversa son los siguientes:

- Membranas (capas).
- Espaciadores de salmuera.
- Espaciadores de permeado.
- Tubo de permeado.
- Tapas finales («anti-telescoping»).
- Envoltorio del elemento.
- Junta labiada de salmuera.

Figura 20. Componentes de un elemento de ósmosis inversa de arrollamiento en espiral. Imagen cortesía de Dow Chemical Ibérica, S.L.

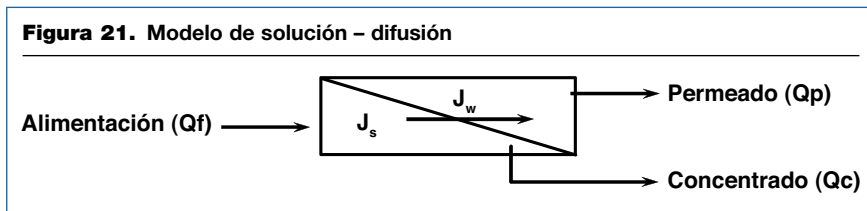


4.1.1.5. Las fórmulas de la ósmosis inversa

Las siguientes fórmulas comentadas ayudan a comprender los fenómenos relacionados con la ósmosis inversa.

4.1.1.6. Modelo de solución – difusión

Las fórmulas usadas en los cálculos de ósmosis inversa están basadas en el modelo de solución-difusión a través de la membrana, en donde habrá un paso de un flujo de sales, J_s , y un flujo de agua, J_w .



La ecuación de difusión del flujo de agua, o solvente, es la siguiente:

$$J_w = A \times (\Delta P - \Delta \pi)$$

Donde

J_w = Flujo de agua en litros por metro cuadrado y por hora.

A = Coeficiente de permeabilidad de la membrana en $L/m^2/\text{bar}$

ΔP = Presión diferencial transmembrana, bar.

$\Delta \pi$ = Presión osmótica diferencial, bar.

El factor A es característico de cada membrana y depende de varios factores como son: el espesor y material de la membrana, la temperatura, la presión, el pH, el factor de conversión y la concentración salina de la solución.

El término entre paréntesis de esta fórmula es lo que se conoce como Presión Neta de Trabajo, «Net Driving Pressure» (NDP).

De esta fórmula se deduce que en cuanto mayor sea la presión neta de trabajo, mayor será la productividad de la membrana.

La ecuación del transporte de sales es la siguiente:

$$J_s = B \times \Delta C$$

Donde

J_s = Flujo de sales, en Kg/m²/s.

B = Coeficiente de transferencia de masa de sales, en m/s.

ΔC = Concentración media diferencial transmembrana Kg/m³.

Los factores A y B dependen de las características de la membrana y de la temperatura, la presión, el pH, el factor de conversión y la concentración salina de la solución.

De esta fórmula se desprende que cuanto mayor sea la concentración salina en el lado de alimentación, mayor será el paso de sales, con lo que aumentará la salinidad del permeado.

Por otra parte, fenómenos como la «polarización» de las membranas, hacen que la concentración de sales en el permeado sea mayor de lo teóricamente previsto.

4.1.1.7. Balance de Materia

Balance del solvente: $Q_f = Q_p + Q_c$

Balance del soluto: $Q_f C_f = Q_p C_p + Q_c C_c$

Donde:

Q_f = Caudal de alimentación, m³/h.

Q_p = Caudal de permeado, m³/h.

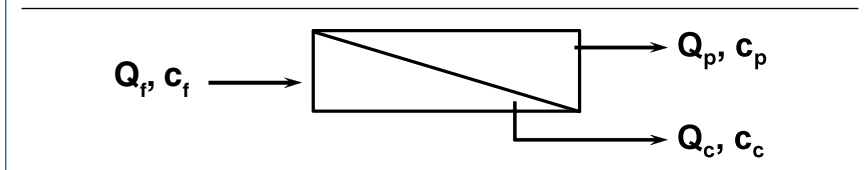
Q_c = Caudal de concentrado o rechazo, m³/h.

c_f = Concentración de soluto en la alimentación, Kg/m³

c_p = Concentración de soluto en el permeado, Kg/m³

c_c = Concentración de soluto en el concentrado o rechazo, Kg/m³

Figura 22. Esquema de balance de materia. El rectángulo expresa la planta en su conjunto



4.1.1.8. Factor de conversión y factor de concentración

El **factor de conversión o recuperación** («recovery»), es el porcentaje de permeado que se obtiene a partir de determinado caudal de alimentación.

Es el cociente, expresado en tanto por ciento, entre el caudal de permeado y el caudal de aportación que llega a las membranas:

$$Y = \frac{Q_p}{Q_f} \times 100 = \left(1 - \frac{Q_c}{Q_f}\right) \times 100$$

Donde:

Q_p = es caudal de permeado

Q_f = es caudal de alimentación.

Q_c = es caudal de concentrado o rechazo

La mayor conversión de un sistema implica, además, una mayor concentración en la salmuera. El factor de concentración de un sistema de ósmosis inversa está relacionado con el factor de conversión mediante la fórmula siguiente:

$$FC = \frac{1}{1 - Y}$$

Donde:

FC = factor de concentración.

Y = factor de conversión en tanto por uno.

Por ejemplo, un sistema de ósmosis inversa diseñado para un factor de conversión del 75 % tendría un factor de concentración de 4, es decir: la salinidad del concentrado es cuatro veces mayor que la salinidad de la alimentación.

4.1.1.9. Factor de Rechazo (R) y de Paso de Sales (SP)

El rechazo de sales de las membranas y de un sistema de membranas, es el factor que determina la calidad final del permeado de un sistema de ósmosis inversa.

La fórmula que determina el rechazo de sales es:

$$R = \frac{C_f - C_p}{C_f} \times 100$$

C_f = Concentración de sales en la alimentación Kg/m³

C_p = Concentración de sales en el permeado. Kg/m³

R = Rechazo de sales, %.

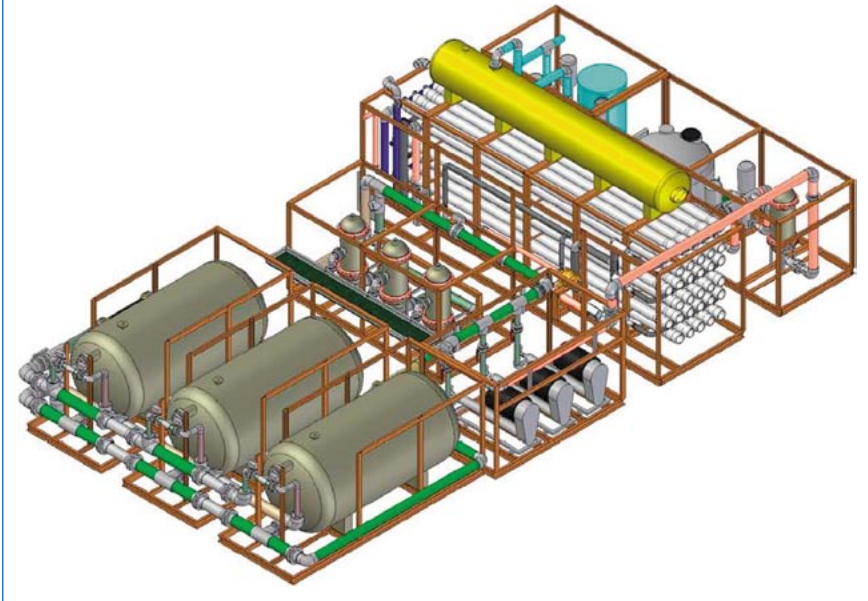
Por tanto, el paso de sales en tanto por ciento, será:

$$SP(\%) = 100 - R$$

4.1.1.10. Diseño de un sistema de membranas de ósmosis inversa. Principales componentes

Un sistema de ósmosis inversa simplificado está formado por una o varias bombas que alimentan el agua procedente del pretratamiento, al bastidor donde se encuentran las cajas de presión que alojan las membranas y un conjunto de tuberías que constituyen la línea de evacuación del concentrado y la línea de permeado para su postratamiento.

Figura 23. Esquema general de una pequeña desaladora industrial de agua marina (2.500 m³ día). Imagen cortesía de AQUAESPaña



La salmuera o rechazo a la salida de los tubos tiene aún mucha presión, ya que la pérdida de carga en el interior de los módulos de OI es pequeña (entre 3 y 5 bares). Con el fin de utilizar esta energía remanente, se conduce la salmuera a un sistema de recuperación de energía, que consiste generalmente en una bomba invertida o una turbina hidráulica del tipo Pelton o Francis, o hacia unas cámaras de intercambio de presión, de forma que se aproveche el salto entre la presión de la salmuera a la salida de las membranas y la presión atmosférica. Con ello la energía necesaria para llevar a cabo el proceso se reduce sensiblemente.

Figura 24. Esquema básico de un sistema de membranas

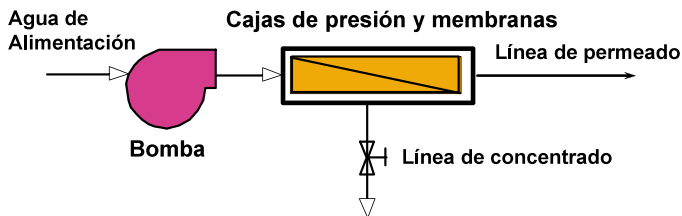


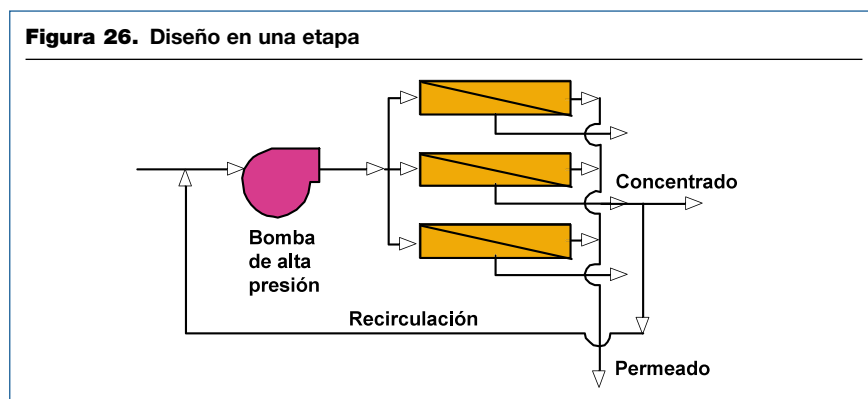
Figura 25. Aspecto de los bastidores con las cajas de presión. Por cortesía de AQUAESPANA



4.1.1.11. Etapas

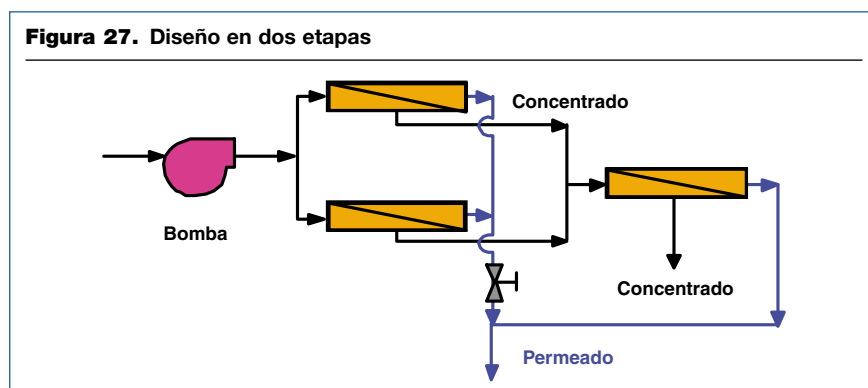
Los elementos de ósmosis inversa van instalados en el interior de las cajas de presión unidos entre si mediante piezas o mecanismos de interconexión. El factor de conversión depende directamente de la longitud del sistema, de manera que los elementos son de longitud limitada (normalmente de 1 metro); para alcanzar unos valores aceptables de conversión, (aproximadamente el 45% en agua de mar y alrededor del 75 % en diseños de agua salobre), se hace necesaria la instalación de 6, 7 u 8 elementos en serie por cada caja de presión.

La capacidad de una planta desaladora por ósmosis inversa viene determinada por la cantidad de cajas de presión instaladas en paralelo siguiendo el esquema el siguiente:



Para incrementar el factor de conversión de un sistema es posible hacer recircular parte del concentrado de nuevo a la alimentación. Esta práctica es posible en instalaciones de agua salobre pero no en las de agua de mar. Es posible ampliar el factor de conversión de un sistema aumentando su longitud y volviendo hacer pasar a la salmuera por otro sistema de ósmosis inversa adicional al que se llama «segunda etapa».

El diagrama sería el siguiente:



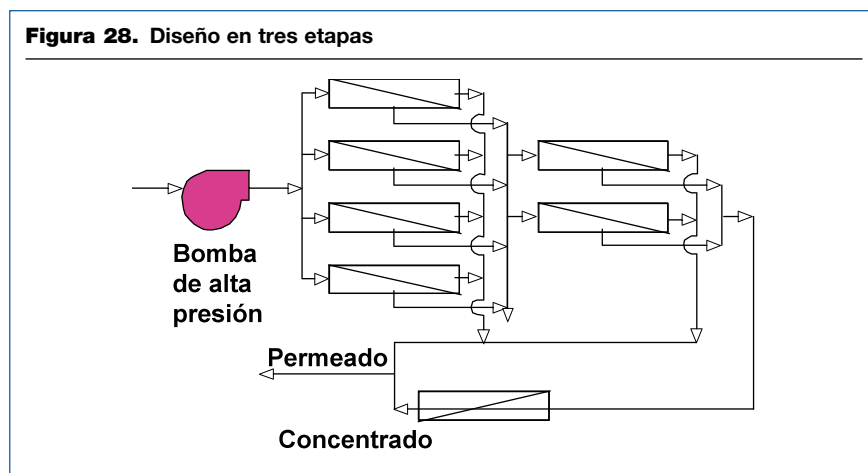
En los sistemas de dos etapas, frecuentemente se regula la presión de permeado entre la primera y la segunda etapa incrementando la presión en la primera etapa, de ese modo también se aumenta, aunque de forma indirecta, la presión sobre la segunda etapa, pudiéndose equilibrar de ese modo la producción nominal de las membranas de ambas etapas.

Con esta actuación se evitan los frecuentes problemas de desequilibrio en la producción de agua por unidad de superficie de membrana instalada.

En sistemas en los que la salinidad del agua es elevada (2 a 5 g/L), pero no son aguas marinas; en vez de lo anterior, suele instalarse una bomba de ayuda para la elevación de presión en la corriente de alimentación a la segunda etapa (bomba booster).

En este caso se logra el efecto de equilibrio en la producción específica con menor costo energético comparado y mayor eficacia global del sistema.

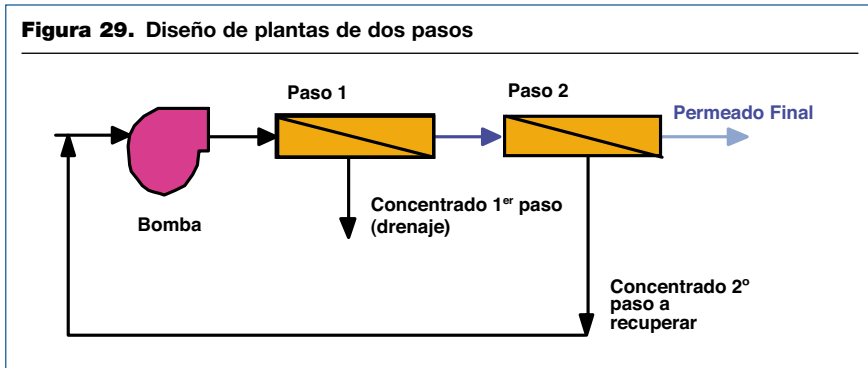
En algunos casos, sobre todo en agua salobre, puede ser necesario el diseño de sistemas de tres etapas para obtener los máximos valores de conversión:



La presión osmótica va creciendo a lo largo del sistema conforme la salinidad va aumentando. Normalmente, la presión osmótica del concentrado de la segunda etapa es ya tan alta que se hace imprescindible la instalación de otra bomba, denominada «booster», a la entrada de la tercera etapa.

4.1.1.12. Pasos

El agua a la salida de las membranas contiene una cierta cantidad de sales, ya que el rechazo de las membranas de OI nunca es del 100%. Por tanto, el agua desalada producto tiene una concentración diferente, dependiendo de la concentración del agua inicial, del factor de concentración de la salmuera, de la temperatura del agua, del tipo de membrana y del diseño realizado. Si se trabaja con agua de mar, la concentración de sales del permeado suele estar entre 200 y 300 mg/L y, si se quiere reducir este contenido salino, es necesario aplicar otra etapa de OI dando lugar a un diseño de plantas de dos pasos.



En la figura anterior se puede ver un diagrama simplificado de una planta de OI de dos pasos. El producto procedente del primer paso normalmente es sometido a un aumento de la presión mediante una bomba, llegando hasta unos 6 u 8 bares, y se introduce en unas membranas de OI de las empleadas con agua salobre. El producto de este segundo paso tendría un contenido en sales inferior a 10 mg/L. El factor de concentración de esta segunda etapa suele ser muy alto, del orden de ocho veces la inicial. El agua de rechazo del segundo paso se une al agua bruta de alimentación del primer paso.

Figura 30. Vista general de una desaladora I. Por cortesía de AEDYR



Figura 31. Vista general de una desaladora II. Por cortesía de AEDYR



Figura 32. Detalle de las cajas de presión. Por cortesía de AQUAESPÑA



4.1.2. Nanofiltración

Siguiendo el modelo de la filtración física, la nanofiltración es un proceso que estaría a mitad de camino entre la ósmosis inversa y la ultrafiltración tal y como se indicó con anterioridad. Normalmente se asimila la nanofiltración con una hiperfiltración con un paso de partículas del tamaño de un nanómetro.

A diferencia de la ósmosis inversa, **la nanofiltración no representa una barrera para todas las sales disueltas**. Dependiendo del tipo de membrana y del tipo de sal, la permeabilidad puede ser mayor o menor. Usando el mismo modelo que para la ósmosis inversa, si la permeabilidad a la sal es baja, la diferencia de presión osmótica entre los dos compartimentos puede llegar a ser casi tan alta como en el caso de la OI. Por otro lado, una alta permeabilidad de la membrana a la sal, no daría lugar a que entre los dos compartimentos se mantuviese una gran diferencia de concentración salina. Por lo tanto, la presión osmótica juega un papel menor si la permeabilidad a la sal es alta. Lo normal es que el agua a tratar tenga iones monovalentes y divalentes y sólo estos últimos son poco permeables a la membrana, por lo que la presión que en conjunto se debe aplicar es inferior que en el caso de la OI.

La nanofiltración se emplea cuando se requiere un rechazo de iones di-, tri-, tetra-valentes sin que se afecte el contenido de los monovalentes. Esto es debido a la mayor permeabilidad de la nanofiltración a los iones monovalentes, por lo que en este sentido puede considerarse como una membrana selectiva de iones.

Dentro de los últimos desarrollos de la nanofiltración, están las **membranas selectivas de atrazinas y de plaguicidas** en general, que tienen un gran campo de aplicación en los tratamientos de agua para consumo humano.

En lo que respecta al diseño, los fundamentos y los componentes para la nanofiltración, es aplicable todo lo expuesto para la ósmosis inversa.

4.1.3. Electrodiálisis

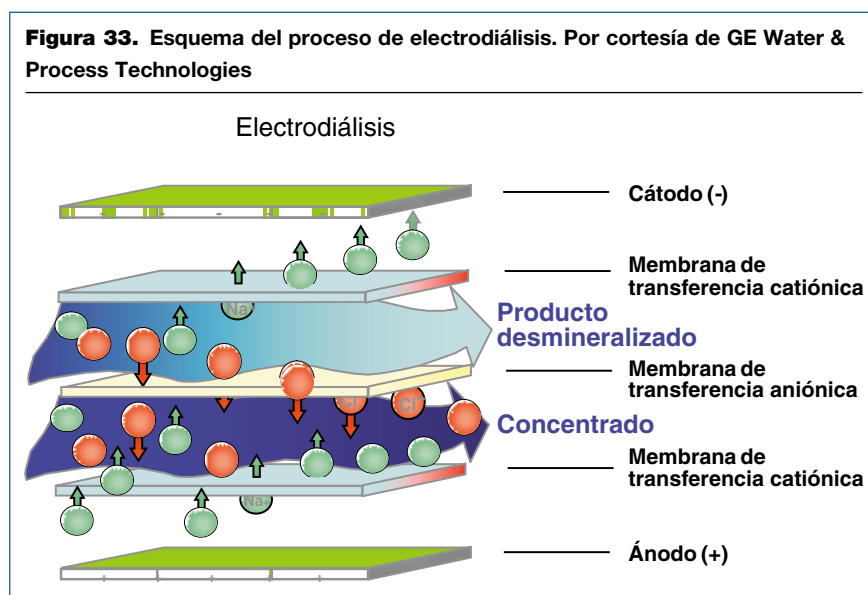
4.1.3.1. Principio de funcionamiento de la electrodiálisis

La electrodiálisis (ED) es un proceso electroquímico empleado para la desalación de agua con alto contenido en sales disueltas. El principio de funcionamiento de esta técnica es la transferencia de los iones disueltos desde el agua de aportación, a otra solución donde se concentra, a través de unas membranas selectivas al paso de cationes o aniones y mediante la aplicación de un campo eléctrico. Como resultado de este proceso se obtiene un agua producto con una concentración de sales menor que el agua de alimentación y un subproducto de rechazo, la **salmuera**, con una elevada concentración de sales. Las dos corrientes de agua fluyen en paralelo entre las membranas: el agua producto se desala progresivamente, mientras que la salmuera se va concentrando también progresivamente. Los cationes del agua a tratar atraviesan la membrana catiónica hacia el cátodo pasando a continuación a la salmuera. De similar manera, los aniones del agua a tratar atraviesan la membrana aniónica hacia el ánodo pasando después a la sal-

muera. **Por lo tanto, en el proceso de electrodiálisis sólo se mueven a través de las membranas los sólidos disueltos pero no el solvente (agua).**

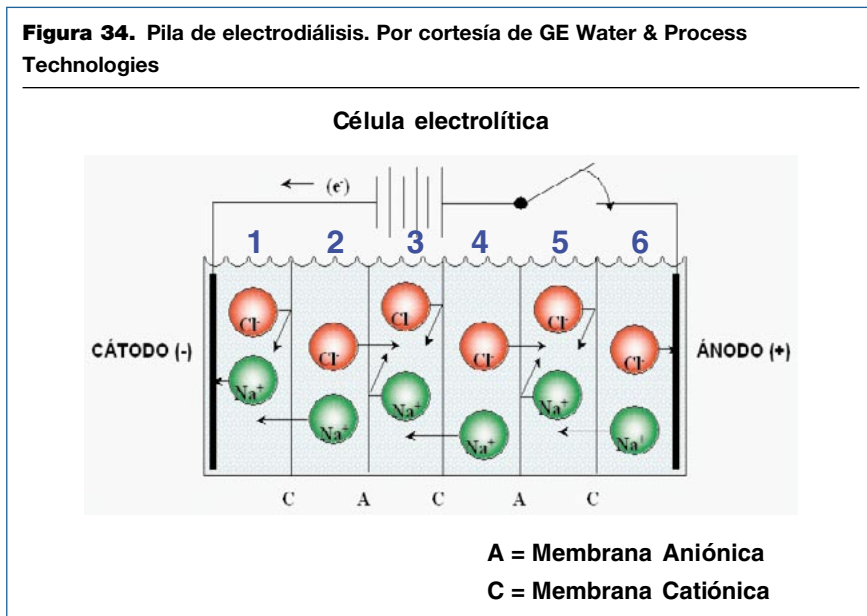
El sentido y la tasa del transporte de cada ión dependen de su carga y su movilidad, de la conductividad de la solución, de las concentraciones relativas, de la intensidad del campo eléctrico aplicado, y está estrechamente relacionado con las características de la membrana de intercambio iónico. La capacidad de eliminación puede aumentarse mediante la unión en serie de varias pilas, aunque no es competitiva frente a la OI en la desalación de aguas de mar. Esta técnica no aporta un efecto barrera, como si lo hacen las otras técnicas de membrana a presión. Es una técnica más robusta frente a cambios en la calidad del agua o paradas del sistema, y tiene un buen comportamiento frente a elementos como el Ba, Sr o sulfatos. Su rendimiento mejora a temperatura elevada y para iones con varia cargas.

Una fracción de la salmuera puede ser recirculada para reducir la cantidad de agua desechada. Esta recirculación aumenta mucho la concentración de la salmuera por lo que puede ser necesaria la adición de ácido u otros reactivos (como los antiincrustantes) al bucle de la salmuera que eviten la deposición de sales sobre las membranas.



4.1.3.2. La pila de electrodiálisis. Elementos Principales

La configuración básica de un sistema de electrodiálisis (**pila de electrodiálisis**), es el apilamiento de un número determinado de pares de célula. Cada par de célula esta compuesto por una membrana de intercambio catiónico, un espaciador por el que fluye el agua desmineralizada, una membrana de intercambio aniónico y un espaciador por el que fluye el agua concentrada. Las membranas de intercambio iónico permiten la transferencia de cationes y aniones de forma selectiva, y los espaciadores separan las membranas permitiendo la distribución de agua sobre su superficie.



Los diferentes pares de célula son ensamblados en horizontal y en paralelo en medio de dos electrodos formando así la pila de electrodiálisis. Los electrodos permiten la conexión eléctrica de la pila de membranas a la fuente de tensión de corriente continua, y distribuye la corriente sobre toda la superficie de la membrana. Para sujetar todo el sistema se utiliza placas finales de acero, tirantes y bloques de material plástico.

La eficiencia de un sistema de electrodiálisis se puede mejorar mediante el cambio periódico de la polaridad de los electrodos (de 2 a 4 veces por hora). Con estos cambios de polaridad, se consigue invertir la dirección de

los iones a través de las membranas y prevenir las incrustaciones disolviendo las posibles precipitaciones y enviándolas al desecho; se reduce la formación de fango o similares sobre la superficie de las membranas; reduce la necesidad de dosificación continua de productos químicos en la mayoría de los casos; y genera limpieza automática de los electrodos con el ácido formado durante la operación anódica. Después de un cambio de polaridad la corriente de producto se convierte en corriente de salmuera y viceversa. Este proceso se conoce como **electrodialisis reversible (EDR)**.

4.1.3.3. Membranas

Las membranas usadas para electrodialisis son, esencialmente, una resina de intercambio de iones fabricada en forma de lámina, con un espesor aproximado de 0,5 mm. Las propiedades básicas de las membranas son:

- Insolubles en soluciones acuosas.
- Presentan baja resistencia eléctrica.
- Impermeables al agua bajo presión.
- Resistentes a cambios de pH entre 1 y 10.
- Utilizables a temperaturas de hasta 46°C
- Resistentes al paso osmótico cuando se colocan en dos soluciones salinas, una de 220 mg/L y otra de 30.000 mg/L de sólidos disueltos.
- Estables al cloro.
- Semi-rígidas para facilitar su montaje.
- Expectativas de longevidad.

La membrana catiónica debe transferir solamente cationes y rechazar los aniones, y la membrana aniónica debe transferir solamente aniones y rechazar los cationes.

Los compartimentos de las membranas tienen en sus extremos unos orificios que alineados con los orificios de los espaciadores, forman el colector de distribución del agua de alimentación, y de la misma forma el de recogida del agua producto. De igual manera se disponen los colectores de salmuera-concentrado y el de recirculación.

4.1.3.4. Espaciadores

Los espaciadores están formados por láminas de polietileno de baja densidad. Estas láminas tienen unos orificios que una vez apilados se alinean con los orificios de las membranas y forman los colectores de aportación de agua cruda y recolección de agua producto, y los colectores de entrada y salida del concentrado. Al alinear todos los orificios, los colectores forman tubos verticales en la pila. El agua entra en un espaciador y circula entre dos membranas por los caminos de flujo que conectan el colector de entrada y

el de salida. La geometría de los espaciadores permite que, montándolos en una posición u otra, se canalice el flujo selectivamente para formar dos corrientes separadas de agua desmineralizada y de concentrado.

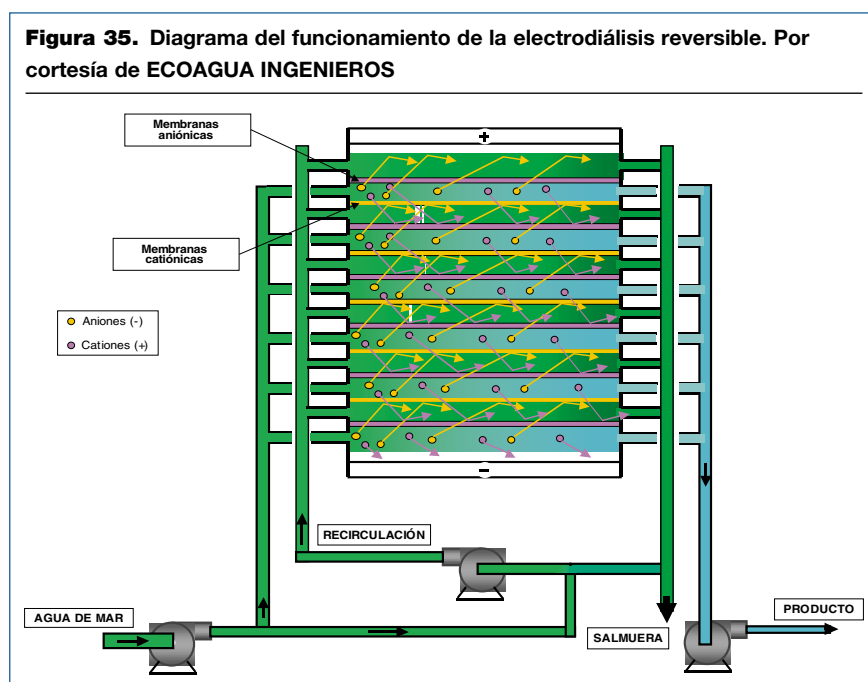
4.1.3.5. Compartimiento de electrodos

Los compartimientos de electrodos se encuentran en los extremos altos y bajo de la pila y están formados por:

- Un electrodo.
- Un espaciador de flujo de electrodo.
- Una membrana catiónica gruesa.

Los electrodos son elementos metálicos localizados en los extremos superior e inferior de la pila, y se emplean para conducir la corriente continua. Están fabricados de titanio recubierto de platino.

La vida de un electrodo depende generalmente de la composición iónica del flujo por el electrodo y el amperaje transportado por unidad de área del electrodo. En general, altos amperajes y agua con contenido elevado de cloruros o alta tendencia incrustante, tenderán a acortar su vida útil.



El espaciador de electrodo tiene la misma función que los otros espaciadores, pero esta formado por varias láminas. Esto le da un grosor mayor y la capacidad de permitir el paso de un gran caudal de agua por su interior, reduciendo las incrustaciones y el desgaste de los electrodos.

La membrana catiónica gruesa tiene todas las propiedades de la membrana catiónica normal, pero tiene un espesor dos veces el de la normal debido a que deberá resistir mayores presiones diferenciales.

Figura 36. Unidad de EDR en contenedor. Por cortesía de GE Water & Process Technologies



4.2. Otras tecnologías de desalación. Técnicas de destilación

Conviene hacer notar los procesos de destilación han caído en desuso debido a los altos costes tanto de inversión como de consumo energético y, por tanto, de explotación. Su utilización está restringida a determinadas aplicaciones de uso industrial para producir un agua destilada necesaria en algunos procesos como por ejemplo, para agua de aportación a calderas de las centrales térmicas o países con abundantes recursos energéticos (Golfo Pérsico). En España la última planta de destilación adjudicada para uso de abastecimiento urbano, fue en 1996: una planta del proceso de MED en Las Palmas de Gran Canaria.

Figura 37. Conjunto de plantas de desalación por destilación en Gran Canaria.
Por cortesía ECOAGUA INGENIEROS



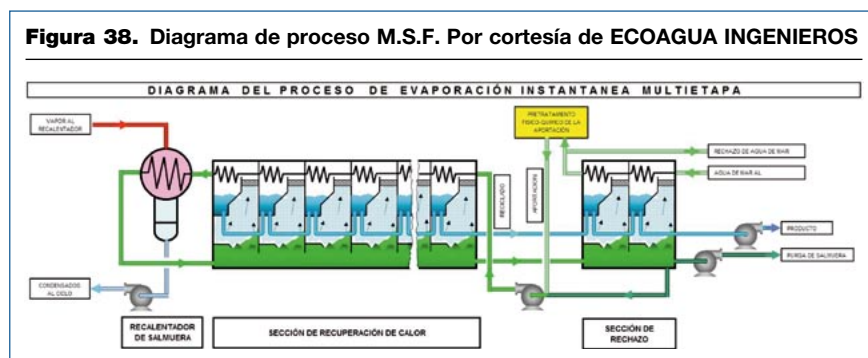
Por otra parte, al producir agua de calidad destilada, necesita mezclarse con aguas de otras procedencias o bien un postratamiento completo que le aporte dureza, alcalinidad y sales al agua producto antes de ser distribuida a la población. Estos postratamientos y los productos químicos empleados, son del mismo tipo que para las plantas de O.I.

4.2.1. Proceso de Evaporación Instantánea Multietapa (MSF)

El objeto de este proceso es destilar agua de mar y condensar el vapor obtenido, recuperando el calor latente para calentar más agua de mar, que posteriormente también se irá evaporando. Si la transmisión de calor fuese con área infinita, e infinito número de etapas y no hubiese pérdidas, una vez comenzado el proceso, no habría que aportar más calor y el proceso se mantendría por sí mismo, pero como esto no es así, hay que disponer de una fuente externa de energía, que suministre el incremento de temperatura que falta para iniciar y mantener el ciclo.

Tomando como referencia el diagrama de flujo de la **figura 38** se va a describir cómo ocurre el proceso. Se distinguen tres secciones, una es la

sección de rechazo, otra es la de recuperación y finalmente, el recalentador de salmuera. Partiendo de la salida del recalentador (a la izquierda de la figura); la salmuera en este punto está a la temperatura máxima admisible del ciclo y se introduce en la primera etapa del evaporador por la parte inferior. Al entrar en dicha etapa, la salmuera se encuentra con una presión inferior a la correspondiente a la de saturación a su temperatura, con lo cual, una parte se evapora de forma «instantánea», para tratar de equilibrarse y ajustar su temperatura a la presión reinante en la etapa. El vapor desprendido pasa a través de unas mallas separadoras de gotas (demisters), cuyo fin es eliminar las gotas de salmuera que hayan podido ser arrastradas por el vapor, en el proceso de evaporarse bruscamente. Después el vapor se condensa en la superficie exterior de los tubos del condensador de la etapa, goteando a la bandeja que hay debajo del haz de tubos donde se recoge.



La salmuera que queda en la parte inferior sin evaporarse, pasa a la etapa siguiente, encontrándose de nuevo con una presión inferior a la de saturación con la temperatura que lleva, repitiéndose el ciclo ya explicado de evaporación y condensación sucesivamente hasta llegar a la última etapa. En ella, por el interior de los tubos del condensador circula agua procedente de la toma de agua de mar que hace las veces de fluido frío. A la salida de las etapas de rechazo de calor, el agua de mar ha aumentado su temperatura. Una parte de este caudal se devuelve al mar como **agua de mar como agua de rechazo** (por exceso de temperatura, que no de sales) y otra parte se aporta al ciclo después de haber sido tratada químicamente para evitar las corrosiones y las incrustaciones. Este caudal se denomina **aportación**.

El caudal de aportación, más una parte de la salmuera que queda en la última etapa, se mezclan formando el **reciclado**, que es introducido, mediante la **bomba de reciclado**, por el interior de los tubos de la sección de

recuperación de calor, haciendo de fluido frío para condensar el vapor que se forma en cada etapa. Este reciclado irá calentándose conforme avanza hacia la primera etapa. A la salida de los tubos de esta primera etapa, ha alcanzado la mayor parte de la temperatura necesaria para iniciar el ciclo, gracias al calor recuperado, no obstante aún le falta un incremento de temperatura que adquiere, hasta llegar a la temperatura máxima admisible en el recalentador de salmuera, siendo la condensación de un vapor externo la fuente calorífica para calentar el reciclado hasta su temperatura máxima.

El condensado del recalentador de salmuera es devuelto al ciclo térmico (caldera) de donde procede el vapor.

El agua de producto obtenida en cada etapa se pasa a la siguiente mediante un sistema de cierres hidráulicos. Esta agua también debe ir equilibrándose con la presión reinante en cada etapa, evaporándose parcialmente y volviéndose a condensar en la superficie de los tubos de la etapa. Al llegar a la última etapa del evaporador, el producto alcanza la temperatura mínima y ha cedido todo su calor sensible. De la bandeja de producto de esta última etapa se saca mediante una bomba de producto y se envía al tanque de almacenamiento.

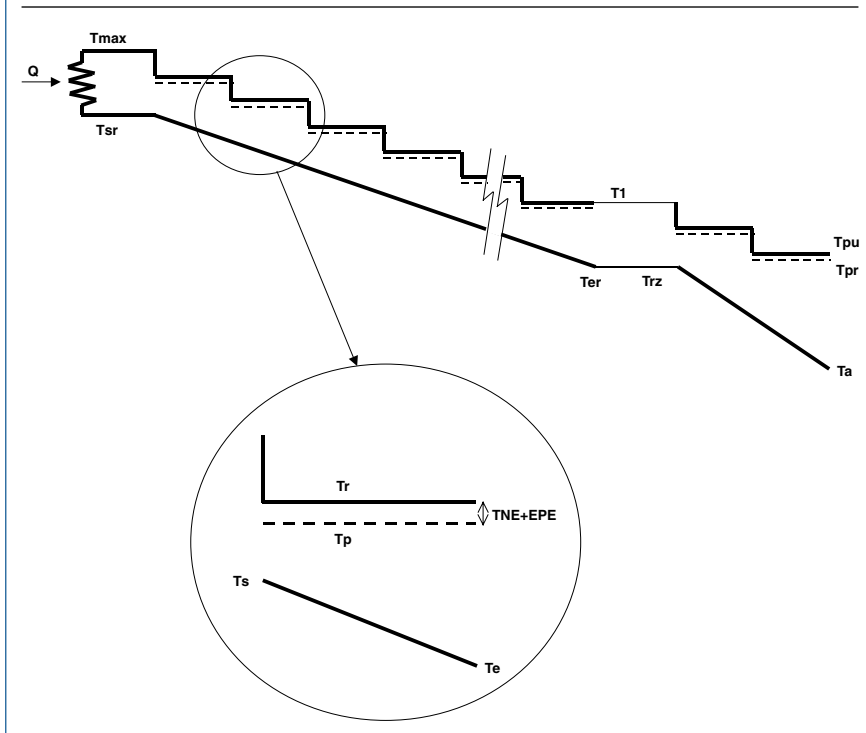
Para mantener el equilibrio salino del evaporador, ya que se está introduciendo continuamente una cantidad de sales en el mismo a través **del agua de aportación procedente del mar**, es necesario extraer la misma cantidad de sales para evitar su acumulación en el interior y que las corrientes se vayan concentrando. Para ello debe hacerse una **purga de salmuera** en el punto de máxima concentración de sales, que es en la salmuera de la última etapa.

Debido al contenido en aire y gases del agua de mar, y a que no son eliminados completamente en el pretratamiento; y por otra parte, a que gran número de etapas trabajan en condiciones de vacío, –por lo que normalmente hay entrada de aire desde el exterior por los poros, bridas, equipos, etc–; es necesario extraer esos gases que no se pueden condensar para evitar que se acumulen en el interior del evaporador provocando una pérdida de rendimiento. Para ello se instala un equipo de vacío y una **red de venteos** de las etapas. Este equipo está formado normalmente por eyectores con condensadores del tipo barométricos o de superficie.

4.2.2. Proceso de Evaporación Multiefecto en Tubos Horizontales (HTME)

El fundamento de este proceso, –como todos los de destilación–, es evaporar el agua de mar, condensar el vapor obtenido y recuperar el calor latente de condensación del vapor para calentar más agua de mar, que vuelve a ser evaporada.

Figura 39. Diagrama térmico de la M.S.F. Por cortesía de AEDYR



La **Figura 39**, permite describir cómo ocurre el proceso. Se divide en dos secciones, el **condensador**, que es el punto más frío del evaporador y los **efectos**, siendo en el primer efecto donde está el foco caliente del ciclo térmico. Partiendo del primer efecto sucede que el vapor aportado como fuente energética, normalmente debajo título, se condensa en el interior de los tubos, mientras que por el exterior de los mismos se rocía agua de mar que hace de fluido frío y se calienta hasta alcanzar la temperatura máxima y evaporarse en parte.

El vapor producido, pasa a través de unos separadores de gotas (demisters), para extraer las gotas de salmuera que pueda arrastrar, y entra en el interior de los tubos del siguiente efecto donde se condensará, evaporando igualmente una parte del agua de mar que está siendo rociada por el exterior de los tubos. Esta agua que se rocía procede del agua de mar no evaporada del primer efecto, por lo que a su vez sufre un proceso de evaporación instantánea al encontrarse con unas condiciones reinantes en el efecto de menor presión que la anterior. En conclusión, el vapor producido

en cada efecto procede de la evaporación por desequilibrio térmico entre efectos, y por la condensación de vapor en el interior de los tubos. Este proceso se va repitiendo de efecto en efecto, reduciéndose cada vez más la temperatura a la que tiene lugar y por tanto, disminuyendo así mismo la presión correspondiente en el interior de cada efecto, hasta llegar al último que es el condensador final.

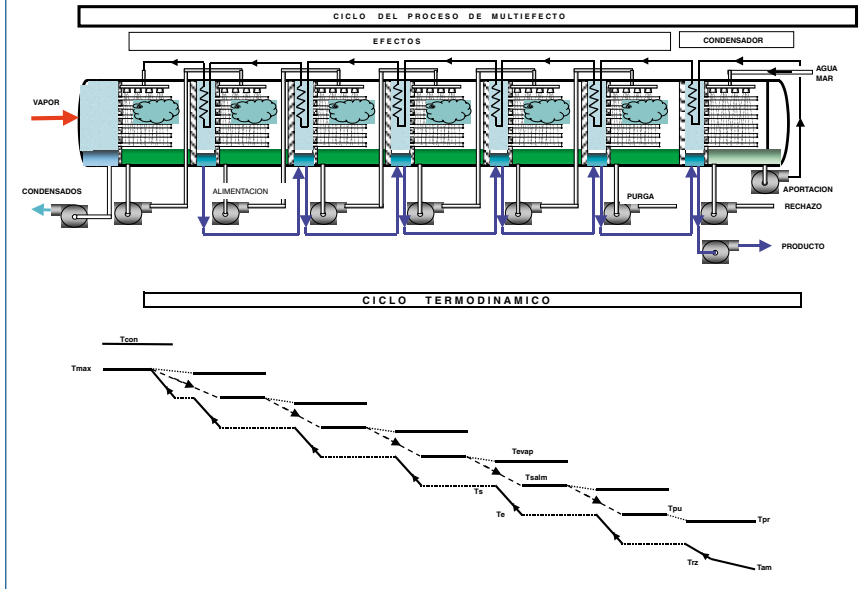
En este condensador se condensa el vapor producido en el efecto anterior, pero como la cantidad de agua de mar utilizada para condensarlo es muy grande, no se produce vapor; únicamente se logra el calentamiento del agua de mar. A la salida de este efecto/condensador, la corriente de agua de mar caliente se divide en dos, una la de rechazo que se devuelve al mar, y otra la de aportación, que se bombea a los efectos anteriores al condensador. A través de unos cambiadores de calor que utilizan una parte del vapor producido en los efectos, este caudal de aportación va calentándose hasta llegar al primer efecto, donde alcanza la temperatura máxima que le permite continuar el ciclo. Como ya se ha indicado al principio, en este primer efecto se rocía el agua de aportación caliente por el exterior de los tubos, incrementando su temperatura y evaporándose parcialmente. El agua de mar que no se ha evaporado y que permanece en este efecto, se bombea a los efectos siguientes, rociando el exterior de los tubos.

En el efecto anterior al condensador es donde el agua de mar está más concentrada, ya que anteriormente se ha ido evaporando parcialmente en las otras cámaras. En este punto se efectúa la purga de salmuera para mantener el equilibrio salino del evaporador.

El vapor condensado en el primer efecto se devuelve al ciclo externo del que procede, ya que es el condensado del vapor motriz. El condensado del segundo y siguientes es el producto, que se va haciendo circular de un efecto a otro poniéndose en contacto, sucesivamente, con presiones más bajas, de modo que una parte de este producto se evapora para equilibrar las presiones y las temperaturas. Este vapor se incorpora con el resto de los producidos en el efecto y se condensan en el siguiente. De esta forma, cuando la corriente de producto llega al condensador final, está a la temperatura más baja que es posible. De aquí se extrae mediante una bomba de producto enviándolo al tanque de almacenamiento de la planta.

Como el agua de mar en el proceso de evaporación va desprendiendo los gases que pueden haberle quedado tras el pretratamiento y como el evaporador trabaja a vacío siempre hay fugas y entradas de aire por poros y diversos puntos, y este aire se acumularía en el interior, dificultando la transferencia de calor y provocando pérdidas de rendimiento. Por ello hay un sistema de venteos en cada efecto, donde un equipo de vacío extrae aquellos que no pueden ser condensados.

Figuras 40 y 41. Ciclo del proceso de multiefecto. Por cortesía de ECOAGUA INGENIEROS



El agua de alimentación antes de introducirla en el evaporador será tratada químicamente para evitar las incrustaciones. El tratamiento habitual es una desgasificación y la adición de un inhibidor, normalmente tipo polifosfato.

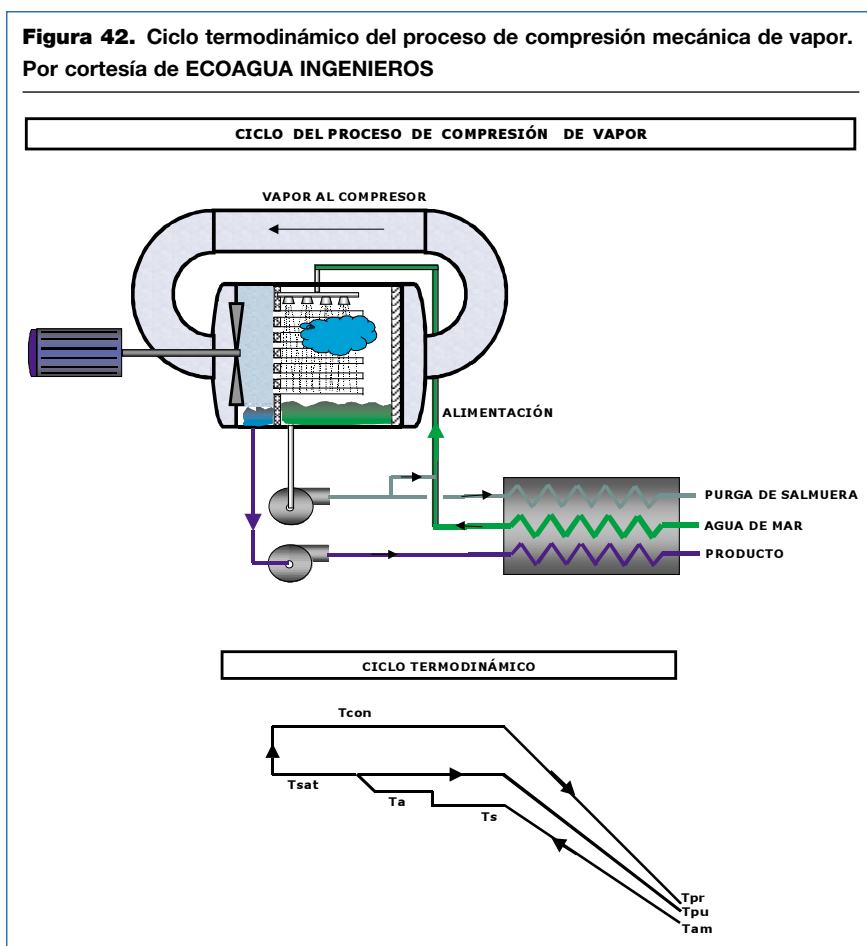
4.2.3. Proceso de Compresión de Vapor (Mecánica y Térmica)

El diagrama de la **Figura 40**, permite explicar como es este proceso. En una planta de este tipo hay tres secciones importantes: un compresor o un eyector; un evaporador que puede ser de una o varias etapas; y un intercambiador de calor líquido/líquido.

El agua de mar procedente de la toma, se hace pasar por el intercambiador de calor donde se calienta. Este agua de mar calentada se mezcla con una parte de la salmuera y forma la **alimentación**, que es bombeada al interior del evaporador, y rociada sobre los tubos del condensador mediante unas toberas. Esta **alimentación** se calienta hasta alcanzar la temperatura de saturación (T_{sat}) correspondiente a la presión reinante en el interior del

evaporador. Al seguir absorbiendo calor, una parte se evapora. El vapor formado pasa a través de unas mallas separadoras de gotas (demisters), entra en la aspiración del compresor que lo comprime hasta alcanzar la presión P_2 , convirtiéndose en un vapor recalentado. Este vapor es introducido en el interior de los tubos del evaporador, donde primero pierde su calor sensible y después se condensa, cediendo el calor a la **alimentación** está cayendo por el exterior de los tubos. El producto es extraído mediante una bomba y dado que aún lleva calor sensible es enfriado en el intercambiador de placas, calentando el agua de mar que se incorpora al ciclo.

Figura 42. Ciclo termodinámico del proceso de compresión mecánica de vapor.
Por cortesía de ECOAGUA INGENIEROS



La salmuera que no se ha evaporado, cae al fondo del evaporador desde donde se extrae mediante una bomba, dividiéndose el flujo en dos corrientes: una que se mezcla con el agua de mar de aportación para formar la alimentación, y la otra denominada «**purga de salmuera**», necesaria para mantener el equilibrio salino. Como la **purga** aún tiene calor sensible es enfriada en el intercambiador de placas donde cede su calor al agua de mar que va al evaporador.

El agua de mar antes de ser introducida en el ciclo es **tratada químicamente** para evitar las incrustaciones y corrosiones. También existe un equipo de vacío formado por una bomba de vacío para extraer los gases que no se condensan del interior del evaporador.

Lo descrito hasta ahora es el proceso de **Compresión Mecánica de Vapor**. Si se sustituye el compresor por un **eyector** que funcione con vapor, se tiene lo que se conoce como «**Eyector-Compresión de vapor**».

5. Postratamiento

Las aguas desaladas generalmente tienen una dureza y alcalinidad bajas, con un marcado carácter agresivo, por lo que requieren un tratamiento posterior para su corrección antes de ser distribuidas.

El tipo de tratamiento de corrección, así como su alcance, dependen fundamentalmente del proceso de desalación utilizado y de la calidad del agua tratada obtenida. Se pueden diferenciar cinco actuaciones que pueden ser o no necesarias dependiendo del agua producto obtenida, la reglamentación vigente y la calidad deseada para el agua postratada (potable). Estas actuaciones pueden clasificarse en cinco tipos: eliminación de CO_2 o descarbonatación, mezcla de aguas, intercambio iónico, acondicionamiento químico y desinfección.

5.1. Eliminación de CO_2 o descarbonatación

Si en el pretratamiento se ha empleado gas carbónico para rebajar el pH y evitar la aparición de carbonatos, se producirá una gran cantidad de CO_2 que quedará en disolución y atravesará con facilidad la membrana apareciendo en el agua producto. El carbónico puede provocar una disminución del pH del agua que aumentaría su agresividad. Si es necesario mediante descarbonatación, se puede reducir la concentración de CO_2 hasta alcanzar valores de pH de equilibrio en los que el índice de Langelier se sitúe en el intervalo de $\pm 0,5$. De ese modo, el pH quedaría ajustado en el intervalo de valores marcado por la vigente legislación de aguas de consumo humano.

Si el contenido de CO_2 es bajo, ya sea porque no se realiza acidificación en el pretratamiento, porque el anhídrido carbónico ya ha sido eliminado en el propio pretratamiento, o bien porque se desea conservar para reutilizarlo en la remineralización; no se precisa la instalación de un descarbonatador.

Por el contrario, si en el agua tratada hay CO_2 en exceso, será necesario reducirlo hasta concentraciones convenientes para la instalación o para la calidad del agua final. La eliminación del carbónico o descarbonatación se puede llevar a cabo mediante descarbonatador u otro sistema de neutralización.

El descarbonatador, para «stripping en frío» consiste en una torre en la que el agua se pulveriza o dispersa finamente, percolando sobre un lecho de material (normalmente anillos Raschig o similares, lava volcánica, coque, etc...), a contra corriente de un caudal de aire que arrastra el gas en

disolución evacuándolo a la atmósfera por la parte superior de la torre. Para diseños correctos, el rendimiento de este tipo de descarbonatadores es elevado, y permite extraer hasta el 98% de los gases contenidos en el agua.

5.2. Intercambio iónico

En el conjunto del proceso de desalación, el intercambio iónico puede utilizarse tanto en el pretratamiento para eliminar principalmente calcio, magnesio, bario y boro del agua; como en el postratamiento para eliminar boro u otras sustancias. Esta última aplicación es de especial importancia en todas las plantas desalinizadoras instaladas antes de 2003, cuando no existía limitación legal para los niveles de boro en el agua de consumo humano.

Se conoce como intercambio iónico al cambio de iones entre un sólido (material de intercambio iónico o resina) y un líquido en el que no hay un cambio permanente en la estructura del sólido. El intercambio iónico se usa en el tratamiento de aguas y también sirve como método de separación para muchos procesos en los que intervienen otros líquidos. Su principal campo de aplicación es el ablandamiento del agua empleada en los hogares, y la producción de agua blanda y desmineralizada en la industria: como por ejemplo en las centrales térmicas, refinerías, en la industria química, así como también en aplicaciones especiales como la síntesis química, investigación médica, procesos de la industria alimentaria, minería, agricultura y en una gran variedad de otras aplicaciones. La utilidad del intercambio iónico reside en la capacidad de usar y reutilizar el material de intercambio iónico mediante su regeneración.

El intercambio iónico ocurre en una variedad de sustancias y ha sido usado a nivel industrial desde 1910 con la introducción del ablandamiento de aguas usando zeolitas, primeramente naturales y posteriormente sintéticas. El carbón sulfonado, desarrollado para el tratamiento de aguas industriales, fue el primer material de intercambio iónico estable a bajo pH. La introducción de las resinas de síntesis orgánica en 1935 fue el resultado de la síntesis de los productos de condensación fenólicos que contienen bien grupos sulfónicos o grupos amina que podían ser usados para el intercambio reversible de cationes o aniones.

Las resinas de intercambio iónico se pueden clasificar en **cuatro grandes grupos**:

- Resinas intercambiadoras de cationes.
- Resinas intercambiadoras de aniones.
- Resinas selectivas.
- Polímeros de adsorción.

A su vez las resinas intercambiadoras de cationes se clasifican en dos clases:

- Fuertemente disociadas. Comúnmente denominadas Cation Fuerte (CF)

- Débilmente disociadas. Comúnmente denominadas Cation Débil (CD)

Y las resinas intercambiadoras de aniones en:

- Fuertemente disociadas, tipo I, II y III. Comúnmente denominadas Anión Fuerte (AF I, AF II, AF III)

- Débilmente disociadas. Comúnmente denominadas Anión Débil (AD)

Las resinas selectivas se caracterizan por disponer de grupos activos con afinidad especial frente a determinados iones, como por ejemplo para la retención de arsénico, boro, nitratos, plomo, etc.

Los polímeros de adsorción, o resinas adsorbentes, son polímeros débilmente funcionalizados, o no funcionalizados, es decir sin grupos activos, con diversas porosidades y una gran superficie activa, por lo que son capaces de retener determinadas moléculas orgánicas como por ejemplo, MTBE, hidrocarburos clorados, THM, etc.

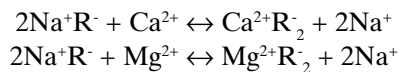
5.2.1. Intercambio catiónico

El intercambio catiónico tiene una amplia aplicación en el ablandamiento de aguas. En este proceso, los iones calcio y magnesio del agua son intercambiados por iones sodio. El hierro ferroso y otros metales tales como manganeso y aluminio a veces están presentes en pequeñas cantidades, estos metales también son intercambiados, pero no revisten importancia en los procesos de ablandamiento. La eliminación de la dureza, o de iones de calcio y magnesio, es lo que da como producto final lo que se denomina «agua blanda».

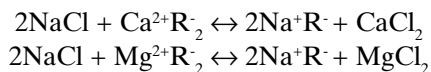
Un intercambiador de cationes regenerado con cloruro sódico, trabaja en ciclo sodio. Esta operación corresponde al ablandamiento o descalcificación del agua en su forma más simple.

Las reacciones del proceso son las siguientes:

Operación:



Regeneración:

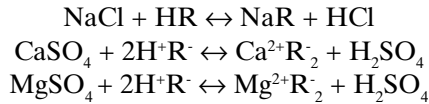


Donde R = Resina de intercambio cation fuerte.

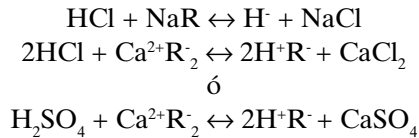
Otra aplicación importante del intercambio iónico es la **descationización** en la que todos los cationes presentes en el agua son intercambiados por ión hidrógeno. Para trabajar con una resina en ciclo hidrógeno (H), se debe regenerar con ácido diluido convenientemente, para lo que generalmente se usa el ácido clorhídrico en solución del 5 al 7%, o bien ácido sulfúrico al 0,8-4%.

Las reacciones con ácido clorhídrico son las siguientes:

Operación:



Regeneración:



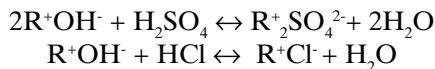
Donde R = resina de intercambio catión fuerte.

5.2.2. Intercambio aniónico

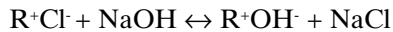
Es el intercambio de los aniones presentes en el agua (SO_4^{2-} , NO_3^- , Cl^- , PO_4^{3-} , HCO_3^- , SiO_2 , etc.) por iones hidroxilo (OH^-). Este intercambio precede al intercambio catiónico, consiguiendo de ese modo la total desmineralización del agua.

A continuación se muestra un ejemplo de las reacciones típicas que tienen lugar en resinas de intercambio anión fuerte:

Operación:



Regeneración:



Donde R = Resina de intercambio anión fuerte.

En las resinas anión débil no se intercambia el CO_2 ni el SiO_2 .

Estos ácidos débiles se intercambian en resinas anión fuerte conjuntamente con los iones de ácido fuerte, siendo el costo de mantenimiento en este caso más elevado, igual que sucede con la carga contaminante producida que es enviada al medio en la regeneración.

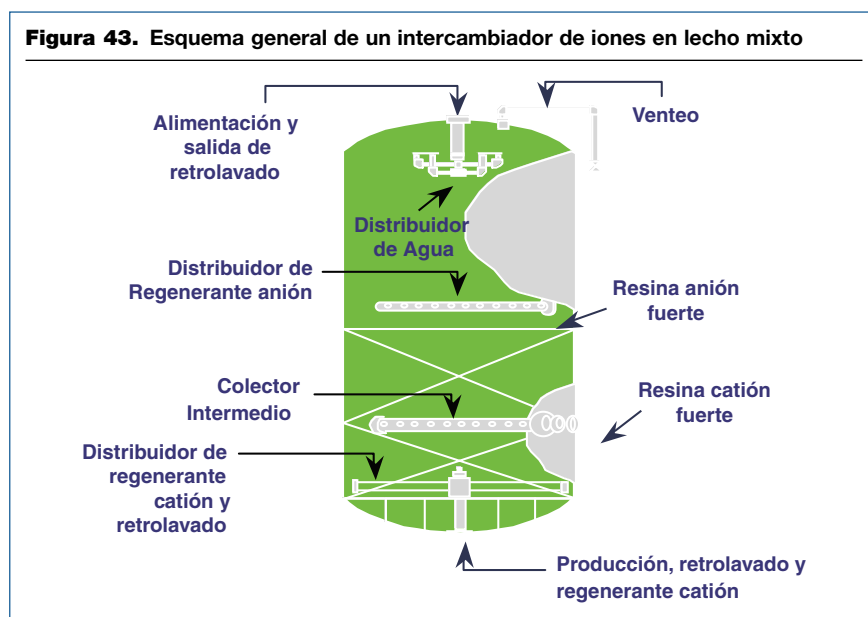
5.2.3. Equipo necesario para la instalación de las resinas

El diseño debe optimizarse para asegurar la menor inversión y la mayor economía de la operación, buscando la mayor capacidad operativa de la resina y el menor consumo de regenerante.

La regeneración de las resinas puede ser diseñada para hacerse tanto en el mismo sentido del flujo del agua en régimen de funcionamiento, o bien en contracorriente. Hoy en día, para evitar el vertido de altas cargas contaminantes, generalmente se realizan en contracorriente.

El equipo incluye: depósitos para instalar las resinas, tuberías, válvulas, soportes, distribuidores, colectores, venteos, tanques para los productos químicos de regeneración y los accesorios necesarios.

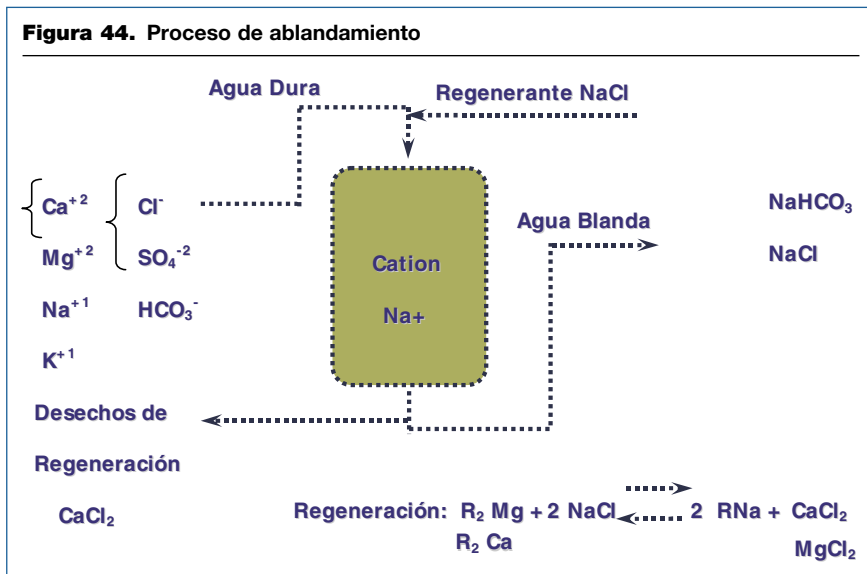
La instalación de la resina puede ser un simple lecho, es decir, un tipo de resina por depósito, o un lecho mixto, con resina catiónica y aniónica mezcladas en un mismo depósito. (Figura 43).



5.2.4. Aplicaciones de las instalaciones de intercambio iónico

Las principales aplicaciones del intercambio iónico en las aguas de consumo e industriales son las siguientes:

- Desendurecimiento o ablandamiento de aguas (descalcificación).
- Desalcalinización.
- Desmineralización.
- Eliminación selectiva de iones.
- Adsorción de compuestos orgánicos.



5.2.4.1. Desendurecimiento o ablandamiento de aguas (descalcificación) (Figura 44)

Las resinas catión fuerte al trabajar en ciclo sódico, ablandan las aguas duras al intercambiar el calcio y el magnesio, que son los iones responsables de la dureza del agua, por iones de sodio muy solubles. El calcio, magnesio y sodio son los elementos importantes que afectan el proceso de ablandamiento.

La fuga de dureza está relacionada con el contenido porcentual y la concentración de las sales totales disueltas (STD) del agua que está siendo

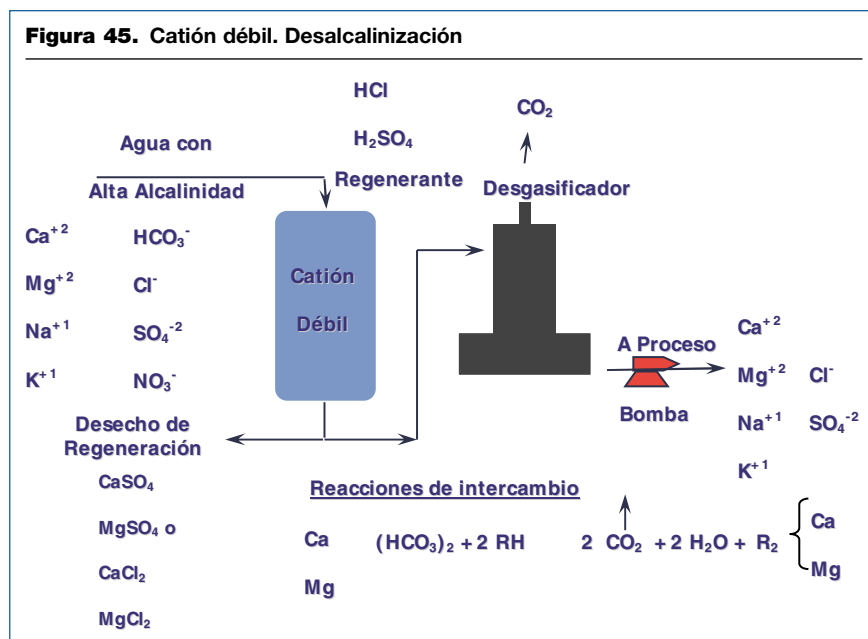
tratada, y con el consumo estequiométrico de regenerante con relación a la capacidad de intercambio utilizada.

La resina elimina selectivamente los iones calcio y magnesio de agua de alta dureza, reemplazándolos por iones sodio. La alta selectividad de las resinas permite la eliminación de estos iones.

5.2.4.2. Desalcalinización

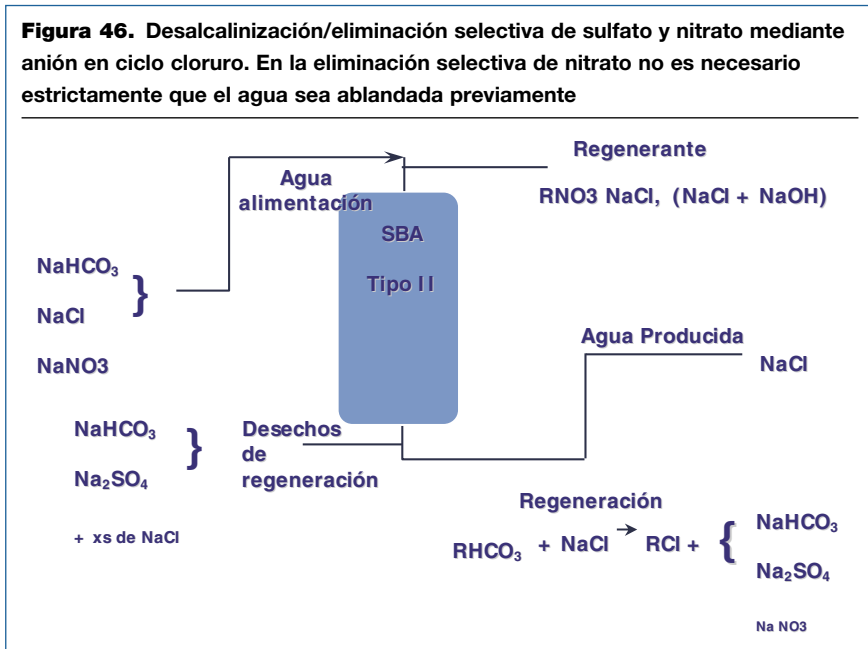
La **desalcalinización** (también conocida como descarbonatación) del agua se efectúa usualmente mediante una resina catión débil, donde la resina elimina la alcalinidad al fijar los cationes asociados a iones bicarbonato, carbonato o hidroxilo convirtiendo las sales de calcio, magnesio y sodio en su ácido débil correspondiente, eliminando después el CO_2 obtenido por desgasificación atmosférica.

En la regeneración se utilizará HCl ó H_2SO_4 , situándose el rendimiento estequiométrico en la regeneración de la resina entre el 102 – 105% del ácido consumido respecto a los iones intercambiados, siendo por lo tanto muy baja la carga contaminante vertida al medio natural. (Figura 45).



5.2.4.3. Desalcalinización y eliminación selectiva de sulfato y nitrato

La desalcalinización en casos muy reducidos puede realizarse mediante el uso de una resina aniónica de base fuerte, en donde se reduce la alcalinidad intercambiando los aniones bicarbonato, carbonato, sulfato y nitratos por anión cloruro. (Figura 46).



5.2.4.4. Desmineralización

En el proceso de desmineralización o desionización, las resinas eliminan casi por completo los cationes y los aniones del agua. El proceso está determinado por la composición del agua de alimentación, la configuración del equipo, las cantidades y los tipos de resinas usadas, así como sus regenerantes y la calidad requerida para el efluente.

El proceso de desmineralización intercambia los cationes de todas las sales de calcio, magnesio, sodio y otros cationes metálicos, por iones H^+ liberando sus correspondientes ácidos. Posteriormente, los ácidos se eliminan mediante resinas aniónicas apropiadas.

La operación de desmineralización puede hacerse mediante un proceso secuencial catión-anión (lechos simples o lechos estratificados), o una mezcla de resinas catiónicas y aniónicas (lechos mixtos). En ocasiones, y dependiendo del diseño, se puede instalar un desgasificador antes de la resina aniónica fuerte para eliminar el dióxido de carbono y, en consecuencia, reducir el consumo químico de NaOH.

En la regeneración de las resinas catiónicas se usa normalmente H_2SO_4 ó HCl, y en las resinas aniónicas se usa sosa cáustica (NaOH).

Cuando se emplea resina catión fuerte y anión débil, el desgasificador se sitúa tras estas etapas. (Figuras 47, 48 y 49).

5.2.4.5. Eliminación selectiva de iones

Es factible la retención selectiva de determinados iones, mediante el uso de resinas intercambiadoras de iones dotadas de grupos activos con afinidades más específicas. Dentro de este grupo de intercambiadores iónicos, por ejemplo tienen especial relevancia las denominadas «resinas quelantes» en la retención de metales pesados.

En el tratamiento de agua potable, los procesos en los que normalmente se pueden utilizar este tipo de resinas son:

Retención de níquel, plomo, boro, cobre, mercurio, hierro/manganeso, arsénico, nitrato, fluoruro y otros.

Elementos radioactivos como el uranio y el radio, también son susceptibles de ser eliminados selectivamente utilizando resinas AF I y CF.

Los procesos de regeneración en los casos citados anteriormente son específicos y determinados por los fabricantes de resinas de intercambio y las ingenierías instaladoras.

5.2.4.6. Polímeros adsorbentes

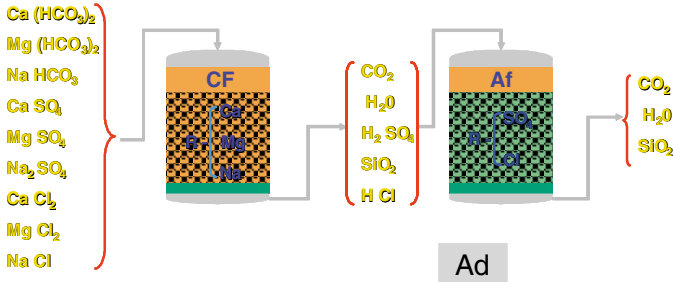
Los polímeros o resinas adsorbentes pueden subdividirse en dos grandes grupos:

- **Resinas funcionalizadas:** Resinas generalmente como las definidas en el apartado de intercambiadores de aniones, las cuales permiten la retención de determinadas sustancias orgánicas de origen natural, cómo ácidos húmicos, fúlvicos, polisacáridos, etc.

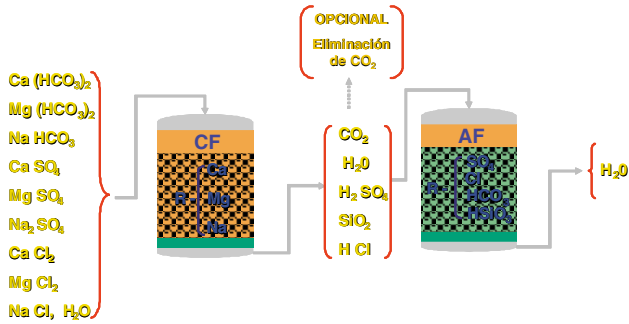
La regeneración de este grupo de resinas se consigue mediante la utilización de sosa cáustica (NaOH) o soluciones alcalinas de cloruro sódico ($NaCl + NaOH$).

Figuras 47, 48 y 49

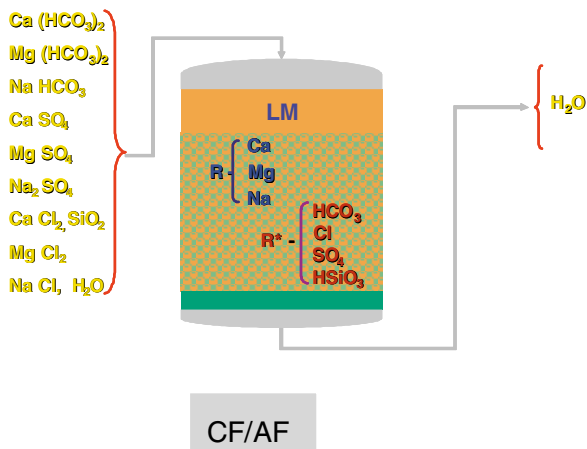
Desmineralización Parcial



Desmineralización Total



Lecho Mixto



- **Resinas no funcionalizadas:** El desarrollo en los últimos años de polímeros basados en el poliestireno reticulado con diferentes porosidades y diferente grado de superficie activa, no dotados o débilmente dotados de grupos activos, que han permitido la adsorción de determinadas moléculas orgánicas contaminantes o indeseables en el agua, como por ejemplo plaguicidas, MTBE, THM, etc.

En este caso la regeneración óptima se consigue con la utilización de alcohol etílico, vapor de agua, siendo no obstante factible también la regeneración con sosa cáustica.

5.3. Acondicionamiento químico

Dada la gran capacidad de eliminación de las membranas, el agua producida no tiene más que algo de cloruro sódico disuelto. En estas condiciones, el agua no es apta para determinados usos como el consumo humano, el regadío agrícola, etc. ya que como se ha indicado, carece de dureza y alcalinidad y resulta muy agresiva. Por este motivo, suele hacerse un proceso de postratamiento al agua producto mediante el que se aportan determinadas sustancias como calcio, magnesio y bicarbonatos, ajustándose su equilibrio calcio - carbónico. Esto es válido tanto para la desalación de aguas marinas como para la de aguas superficiales (salobres).

Esta etapa es muy importante dado que es la última previa a la desinfección y posterior distribución. Por ello, desajustes en el pH, índice de Langelier, turbidez o mezclas (con aportaciones de aguas que puedan producir incidencias en la red como presencia de nitratos, cloritos, THMs o sus precursores), deben tenerse también en cuenta, además de la composición mineral equilibrada y en último término el cumplimiento de la legislación vigente para las aguas de consumo humano.

5.3.1. Cumplimiento de la normativa de agua de consumo humano

Como ya se ha indicado, el agua producto de una desalación carece de la alcalinidad y dureza mínimas para cumplir con lo especificado en la legislación vigente sobre aguas de consumo humano¹.

Siendo el cloruro sódico la sal predominante del agua de mar, en el caso de una desaladora por ósmosis de agua marina, cuyas membranas estuvieran algo deterioradas, el agua permeada podría contener una cierta concentración de cloruros y de sodio. Según la vigente legislación de agua

de consumo humano¹, el valor máximo de sodio es de 200 mg/L (8,70 meq/L) y el de cloruros es de 250 mg/L (7,04 meq/L).

Teniendo en cuenta que la molécula de cloruro sódico contiene los mismos miliequivalentes de ambos iones y los límites de la legislación vigente, el agua osmotizada podría contener como máximo 7,04 meq/L de cloruro y otro tanto de sodio (161,9 mg/L), es decir 7,04 meq/l de cloruro sódico en total; lo que equivale a 412 mg/L de la sal. En la tabla 7 se da la composición de un agua osmotizada hipotética con la mayor concentración posible de cloruros admitida por la vigente legislación.

Sin embargo, con esta composición, el índice de Langelier sería aproximadamente de -5,3; fuera del intervalo legal para agua de consumo humano¹, y el índice de SAR de 63,5; valor muy alto para agua de riego, lo que pone de manifiesto la necesidad de remineralizar las aguas desaladas.

Tabla 7

CATIONES		ANIONES	
	mg/L		mg/L
Calcio	2,0	Bicarbonato	3,0
Magnesio	3,0	Sulfato	10,8
Sodio	161,9	Cloruro	250,0
Potasio	6,0	STD	437,3
Boro	0,6	Anhídrido carbónico	15
Temperatura	21°C	pH	5,5

Existen dos planteamientos diferentes (no excluyentes entre sí) para remineralizar el agua producto:

- **Remineralización mediante mezcla del agua producto con otra que al menos haya sido pretratada.**
- **Remineralización química del propio agua producto.**

¹ Real Decreto 140/2003, de 7 de febrero, por el que se establecen los criterios sanitarios de la calidad del agua de consumo humano, a la fecha de publicación de la presente guía. Para pH e índice de Langelier, véase en particular el anexo I, «Parámetros y valores paramétricos», punto C, nota 5.

5.3.2. Remineralización mediante mezcla de aguas

La remineralización por mezcla de aguas se basa en añadir al producto otra agua que puede ser del mismo u otro origen, y que haya sido al menos pre-tratada. Para que el agua-mezcla resultante cumpla con la normativa de agua de consumo, será necesario conocer a fondo la composición química de todas las aguas que formen la mezcla.

La práctica de la mezcla de aguas no será aplicable en las instalaciones en las que dispongan exclusivamente de agua de mar, en estos casos la remineralización del producto se deberá abordar por el vía química tal y como se explica en el siguiente párrafo (punto 5.3.3).

La correcta mezcla de aguas será una solución que podría considerarse en los siguientes supuestos:

- Cuando además de agua de mar se disponga de otra de origen diferente (Ej.: pozos de agua salobre o dulce relativamente próximos).
- Cuando el agua de aportación no sea de mar, sino más o menos salobre.

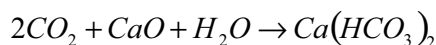
Como se ha indicado, cuando sólo se disponga de agua marina no será aplicable la mezcla de aguas, y la remineralización del producto se deberá abordar por la vía química tal y como se explica en el siguiente párrafo.

5.3.3. Remineralización química del agua producto

La remineralización química del agua se puede realizar por medio de varios procedimientos:

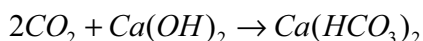
- **Dosificación de CO₂ y cal viva.**
- **Dosificación de CO₂ e hidróxido cálcico.**
- **Dosificación de CO₂ y lechos de carbonato cálcico (calcita)**
- **Dosificación de CO₂ y torres de dolomitas.**
- **Dosificación de cloruro magnésico y bicarbonato sódico.**

En el caso de **dosificar CO₂ y cal viva**, la reacción que tiene lugar es:



De esta forma, se incrementa el contenido en bicarbonatos y en calcio, lo que da lugar a un incremento de la dureza y de la alcalinidad del producto final, así como la reducción del índice de SAR en caso de utilizarse en agricultura. Las dosis dependerán del resultado final que se quiera lograr.

En caso de **dosificar CO₂ e hidróxido cálcico**, la reacción que tiene lugar es:

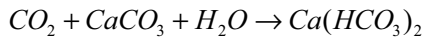


Con idéntico resultado que antes, la mejora procede de utilizar el hidróxido cálcico que es menos problemático ya que no desprende tanto calor al disolverse.

Actualmente es el método más utilizado en España, especialmente en grandes instalaciones. El hidróxido cálcico es un sólido que no se puede dosificar directamente, por lo que se debe preparar una solución, también llamada «lechada de cal». A partir de un silo con el $\text{Ca}(\text{OH})_2$ en polvo se hace la lechada con agua producto al 10-15%. En grandes instalaciones esta primera solución se hace pasar por unos saturadores cuya función es diluirla en un mayor volumen con el fin de obtener una solución normalmente al 5-7% de agua saturada de cal, más fácil de dosificar. Esta agua saturada se mezcla con el agua a remineralizar en una cámara a la que se añade CO_2 , para facilitar la reacción. El proceso se controla mediante un analizador en continuo de pH colocado al final de la cámara de reacción.

Las instalaciones de **dosificación de CO_2 y lechos de carbonato cálcico (calcita)**, están incrementándose en los últimos años en España. Los lechos pueden ser de flujo descendente, a modo de filtros abiertos convencionales, equivalentes a los de arena o carbón activo de los tratamientos convencionales de las ETAPs, o de flujo ascendente y altura constante, que minimizan el problema de la carga periódica que debe hacerse en los lechos abiertos.

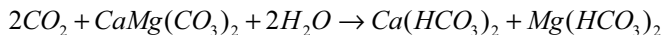
La reacción que se produce es la siguiente:



La calcita es carbonato cálcico CaCO_3 que puede obtenerse de elevada pureza y libre de trazas de otras rocas carbonatadas. Su composición media en CaO es del 55%.

La ventaja de usar calcita frente a $\text{Ca}(\text{OH})_2$, es que con la calcita se obtiene más cantidad de bicarbonatos, con el mismo consumo de CO_2 además, con el paso del agua por los lechos de calcita, hace que alcance el equilibrio (pH de saturación) automáticamente, disolviendo para ello la cantidad exacta que necesita de carbonato de calcio, sin necesidad de equipos de control y dosificación.

En el caso de **dosificar CO_2 y después pasar por torres de dolomitas**, las reacciones que tienen lugar son:



La dolomita es un mineral compuesto de carbonato de calcio y magnesio [$\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$], con una proporción aproximada de CaO del 30.5 % y del 21 % de MgO.

Igual que en el caso de la calcita se obtiene más cantidad de bicarbonatos, con el mismo consumo de CO_2 . Además en este caso se obtiene además un ión adicional de magnesio lo que representa una ventaja económica ya que se logra una mayor dureza y una mayor alcalinidad con la misma cantidad de anhídrido carbónico. También en este caso el paso del agua por las torres de dolomitas, hace que alcance el equilibrio (pH de saturación) sin necesidad de equipos de control. El tiempo de contacto es mayor que en otros lechos.

La **dosificación de cloruro magnésico y bicarbonato sódico**, introduce iones de bicarbonato y de magnesio dando dureza y alcalinidad, pero añade más iones cloruro y sodio, los más abundantes en el agua producto (véase 5.2.5). Por otra parte, es un sistema costoso económicamente por los reactivos que utiliza.

5.3.4. Ejemplo de remineralización química. Acondicionamiento químico

Suponiendo que para remineralizar se haya empleado CO_2 y $\text{Ca}(\text{OH})_2$, el agua hipotética de la tabla nº 7, pasaría a tener la composición que se indica en la siguiente tabla nº 8.

Tabla 8			
CATIONES		ANIONES	
	mg/L		mg/L
Calcio	11,0	Bicarbonato	29,3
Magnesio	3,0	Sulfato	10,8
Sodio	161,9	Cloruro	250,0
Potasio	6,0	Carbonato	1,28
Boro	0,6	STD	473,88
		Anhídrido carbónico	0,09
Temperatura	21°C	pH	8,7

Esto se consigue mediante la dosificación de 5 mg/L de CO_2 y de 16,7 mg/L de hidróxido cálcico puros. En estas condiciones el índice de Langelier es de -0,34 y el Índice de SAR es de 20.

El agua así obtenida, en cuanto a índice de Langelier y pH, cumple con los niveles establecidos en el Real Decreto 140/2003, pues el pH estará comprendido entre 6,5 y 9,5.

De cara a evitar corrosiones en la red de abastecimiento, se recomienda mantener un índice de Langelier lo más cercano al cero o ligeramente positivo.

5.3.5. Otros acondicionamientos químicos

Aunque en España no se exige la fluoración de las aguas ni está particularmente recomendada, las aguas desaladas podrían ser acondicionadas añadiendo fluoruro sódico, sustancia química empleada como anticaries.

En general, el agua obtenida por desalación tiene la calidad suficiente como para admitir determinados niveles de sustancias en el postratamiento, y preparar de ese modo agua «a la carta» como exijan la legislación o el uso al que se vayan a destinar.

6. Mantenimiento, limpieza y conservación

Se puede definir el mantenimiento como el conjunto de operaciones encaminadas a conseguir un funcionamiento y duración óptimos de la planta y garantizar la calidad del agua producida. El mantenimiento se realiza en cada uno de los procesos unitarios del tratamiento (pretratamiento físico-químico, sistemas de filtración, equipos de dosificación, válvulas y otros equipos de regulación, sistema eléctrico, etc.)

Las operaciones de mantenimiento descritas en este capítulo se refieren al proceso de desalación mediante ósmosis inversa (OI), nanofiltración (NF) y electrodiálisis (ED), no teniéndose en cuenta los procesos de desalación por evaporación dada su escasa aplicación en España.

6.1. El manual de operación y mantenimiento

El manual de operación y mantenimiento, debe incluir al menos los siguientes apartados:

- Descripción de la instalación.
 - Memoria descriptiva del proceso y de la instalación.
 - Diagramas de flujo.
 - Esquemas unifilares¹.
 - Listados de equipos y materiales.
 - Listado de reactivos, incluyendo sus fichas técnicas y fichas de datos de seguridad.
 - Dispositivos de control e instrumentación.
- Modelo para la toma de datos y control durante la explotación. Se trata de un documento-tipo donde se recogen todos los parámetros necesarios para el control de la instalación, así como sus límites.
- Procedimiento de limpieza del sistema.
- Operaciones previas a la parada.
- Operaciones de mantenimiento.

¹ Esquemas de cableado eléctrico.

6.2. Toma de datos de funcionamiento y registro de control

Un correcto mantenimiento del sistema comienza por la toma de datos de su funcionamiento. La toma de datos, en lo que se refiere al rendimiento de la instalación, debe comenzar de forma inmediata tras la puesta en marcha.

Los datos de funcionamiento sirven para evaluar el rendimiento del sistema, y deben ser tomados de forma periódica a lo largo de toda la vida útil de la instalación. Deberán quedar registrados y correctamente archivados, con posibilidad de acceso a los registros históricos.

La información debería incluir:

Tabla 9

Parámetros	Agua de aportación	Permeado	Rechazo
Temperatura	X		
Caudal	X	X	X
Presión	X	X	X
Conductividad	X	X	X
pH	X	X	X
SDI ₁₅	X		
REDOX	X		
Balance iónico	X	X	X
Análisis microbiológico	X	X	X

Deberá considerarse además el registro de las siguientes operaciones:

- Calibrado de instrumentos de medida según las instrucciones del fabricante.
- Análisis periódico de control del agua de alimentación, concentrado y permeado.
- Fecha de inicio de operación de las membranas y sustituciones.
- Limpiezas y desinfecciones. Frecuencia y productos químicos empleados.
- Paradas. Puesta en conservación (preservación) de las membranas.

- Mantenimiento rutinario de equipos según especificaciones.
- Registro de las incidencias detectadas durante la operación.
- Medida del consumo energético.
- Medida del consumo de reactivos.

Nota: Los datos de operación deberían ser sometidos a normalización según lo establecido en la norma ASTM Método D 4472-89 «Recordkeeping for Reverse Osmosis System», o mediante empleo de programas de cálculo especialmente diseñados para ello.

Estos datos proporcionan los medios necesarios para la evaluación del rendimiento de la instalación, así como un registro de control de todos los cambios del sistema que pueden tener una incidencia en la calidad del producto.

6.3. Limpieza de membranas

Cuando el agua que llega a las membranas contiene sustancias tales como óxidos metálicos, silicatos de aluminio, materia orgánica, partículas coloidales, microorganismos y otros contaminantes menos frecuentes se producen ensuciamientos que afectan a los elementos que componen dichas membranas.

Además, el efecto de la concentración de iones disueltos a lo largo del sistema, genera también riesgo de incrustación de sales.

Un mal o insuficiente funcionamiento del pretratamiento, una mala regulación de la conversión de la planta, inadecuada dosificación de reactivos o cambios no detectados en la calidad del agua de alimentación, aceleran los procesos de ensuciamiento en la membrana, y pueden incidir negativamente en su rendimiento.

Los síntomas de un ensuciamiento, no siempre detectables inmediatamente, se manifiestan habitualmente como pérdidas de la calidad del agua producto, disminución de la producción o aumento de las presiones de trabajo. Cuando se producen cambios en los parámetros normalizados de funcionamiento en cualquier punto del bastidor, presión diferencial, caudal de permeado y paso de sales; debe programarse cuanto antes una limpieza con el fin de recuperar la situación original.

Normalmente, se admite que debe realizarse una limpieza cuando se producen variaciones en torno al 10-15 % del valor de estos parámetros de funcionamiento. Si no se procede de forma inmediata a la limpieza una vez se detectan estos síntomas, pueden alcanzarse grados irreversibles de ensuciamiento o daños en la estructura de la membrana. En todo caso, siempre deberán seguirse las especificaciones del fabricante. También es habitual,

aunque no se haya producido ningún ensuciamiento, realizar una limpieza preventiva de la instalación al menos una vez al año.

La pérdida de carga máxima admisible para un elemento es de 1,4 bar. En una caja de presión dotada de 6 elementos, la pérdida de carga máxima admisible es de 4,2 bar. Estos valores deben considerarse como límites en régimen de trabajo normal. No obstante, deben respetarse los límites del fabricante para cada modelo de membrana.

Hoy en día se dispone de técnicas de limpieza muy efectivas que deben aplicarse diligentemente cuando se presentan problemas de precipitaciones y/o ensuciamientos para reestablecer las condiciones de flujo normales.

Las técnicas analíticas disponibles permiten determinar la causa de los posibles problemas. Las autopsias de membrana deben hacerse para prevenir la repetición de cualquier contingencia que produzca un daño irreversible en un plazo más corto de uso que el habitual.

6.3.1. Tipos comunes de ensuciamiento

Los tipos de ensuciamientos más comunes de las membranas usadas en el tratamiento de agua son:

- Depósitos e incrustaciones inorgánicas.
- Ensuciamiento coloidal.
- Materia orgánica, colonizaciones microbiológicas y formación de biopelículas.

6.3.1.1. Depósitos e incrustaciones inorgánicas

Debido a la creciente concentración de sales a medida que el agua circula a lo largo de la superficie de la membrana, es más probable que la formación de incrustaciones tenga lugar en el extremo final de las cajas de presión en el sentido del flujo. Las incrustaciones que se suelen encontrar en membranas incluyen las de **carbonato cálcico, carbonato de bario, sulfatos de calcio y de bario, y silicatos de calcio y magnesio**. Los depósitos de **hierro** son también frecuentes. En todo momento deben evitarse los depósitos de **aluminio y sus silicatos**. Otras sales como el fluoruro cálcico o las precipitaciones de fosfato cálcico son menos habituales en sistemas de producción de agua potable.

Figura 50. Micro-cristales de sulfato de bario en la superficie de una membrana (imagen obtenida mediante microscopía electrónica de barrido, SEM)

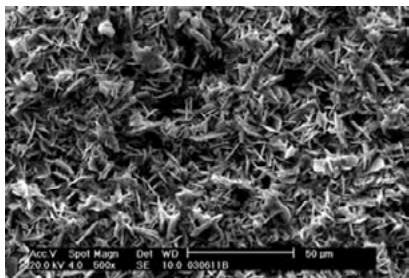


Figura 51. Depósito de óxidos de hierro en la superficie de una membrana de ósmosis inversa

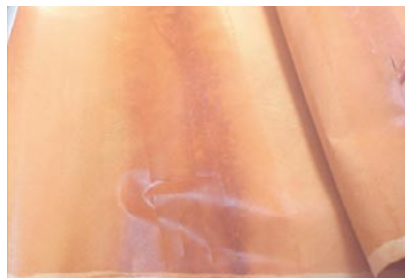


Figura 52. Precipitación de sulfato cálcico

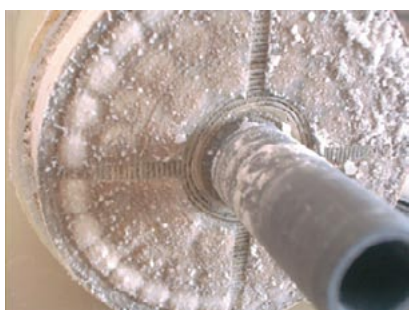


Figura 53. Ensuciamiento de carbonato cálcico. Producido por fallo en la dosificación de antiincrustante durante 48 horas



Fotos cedidas por cortesía de Genesys Membrane Products.

6.3.1.2. Ensuciamiento coloidal

La material coloidal presente en el agua se elimina mayoritariamente en el pretratamiento, si bien ocasionalmente hay fracciones que alcanzan las membranas, provocando su ensuciamiento.

Figura 54. Depósito de materia coloidal en la superficie de una membrana. Foto cedida por cortesía de Genesys Membrane Products



6.3.1.3. Materia orgánica, colonizaciones microbiológicas y formación de biopelículas

El contenido de materia orgánica en el agua de aportación puede originar problemas en la mayoría de las instalaciones. Esta materia orgánica puede depositarse en la superficie de las membranas provocando disminuciones en el caudal de producción, a la vez que su presencia facilita el desarrollo de microorganismos responsables de la formación de la biopelícula.

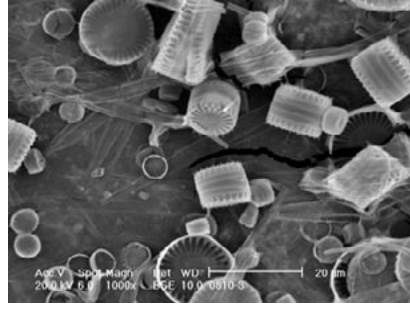
El ensuciamiento biológico es la causa más común del descenso del rendimiento de las membranas. Esto se debe fundamentalmente a la acumulación de polisacáridos extracelulares (SPE) segregados por microorganismos (bacterias, hongos, levaduras), que entran en la planta con el agua de aportación o que crecen en el interior y que posteriormente se depositan en la membrana. Los programas de limpieza recomendados normalmente combinan un procedimiento de desinfección y limpieza que se ejecuta en varias etapas.

Imágenes de ensuciamiento

Figura 55. Depósitos de materia orgánica y biopelícula en la superficie de la membrana



Figura 56. Microfotografía SEM de la superficie de una membrana de ósmosis inversa. Presencia de diatomeas y otros microorganismos



Fotos cedidas por cortesía de Genesys Membrane Products.

6.3.2. Procedimiento de limpieza y recomendaciones generales para ósmosis inversa y nanofiltración

Las membranas deben limpiarse de forma periódica (limpieza habitual de las instalaciones al menos una vez al año), o como se ha indicado, cuando la presión diferencial (ΔP), el caudal de permeado o el paso de sales (conductividad del permeado) varíen en un 10-15% respecto a los valores de diseño. Siempre deben respetarse las condiciones establecidas por los fabricantes de membranas para no deteriorarlas o acortar su vida útil. **La operación de limpieza de membranas se realiza siempre con la planta fuera de producción.**

La elección de los productos y procedimiento de limpieza más adecuados vendrá determinada por el tipo de ensuciamiento presente. Consecuentemente, es recomendable llevar a cabo ensayos piloto encaminados a investigar tanto el tipo de ensuciamiento existente como la eficacia del método de limpieza que debe emplearse. Con frecuencia es recomendable utilizar una combinación de varios productos en una o más etapas de limpieza.

Para más información, se recomienda también leer el capítulo 7 de esta guía sobre sustancias químicas empleadas en la desalación.

En el proceso de limpieza de membranas debe realizarse en las siguientes etapas y respetando las siguientes consideraciones:

6.3.2.1. Preparación de la solución de limpieza

Las soluciones de limpieza deben prepararse con agua de buena calidad y sin cloro. Se recomienda el empleo de agua permeada. Los productos químicos de limpieza deben añadirse en el agua y asegurarse que los cambios de pH y temperatura se realizan gradualmente. En ocasiones, la suciedad que se debe eliminar requiere una solución química a una temperatura del agua superior a la del medio ambiente. El intervalo frecuentemente oscila entre 15°C y 35°C.

Una vez más, se verificarán estas prácticas con las **recomendaciones del fabricante de la membrana empleada.**

Antes de bombear la solución de limpieza, **se debe comprobar la mezcla completa y la total disolución de los productos químicos empleados.**

Para calcular el volumen de solución de limpieza requerida (y las dimensiones del sistema de limpieza) debe tenerse en cuenta el número de membranas que serán limpiadas (volumen de las cajas de presión) y el volumen del circuito de limpieza.

Habitualmente se emplean de 1,2 a 1,5 volúmenes de solución de limpieza por volumen de caja de presión. Véase también el apartado 8.1.4.

6.3.2.2. Recirculación de la solución de limpieza en el sistema

La limpieza de la membrana debe realizarse a baja presión (<4 bar) y el flujo no debe exceder los límites establecidos. Deben intercalarse periodos de recirculación y reposo, con el fin de favorecer el contacto de la solución de limpieza con la suciedad y facilitar su eliminación.

Si la solución de limpieza muestra un fuerte cambio de color y/o aparecen precipitaciones, habría que desecharla y hacer una nueva, repitiendo el proceso. Durante toda la fase de limpieza, las válvulas de concentrado y permeado de retorno al tanque de limpieza, deben mantenerse abiertas, **pero la válvula de permeado al tanque de agua producto estará cerrada durante todo el proceso y sólo se abrirá una vez comprobada que la calidad del agua permeada es óptima.**

Al lavar químicamente, se atenderá a los manuales de operación y las recomendaciones del fabricante.

Cuando el ensuciamiento es muy grande, suele recomendarse limpiar recirculando a bajo caudal durante 10-15 horas. En este caso el caudal aplicado es del 10-15% del indicado en la tabla.

En el caso de limpiezas a elevada temperatura 35-45°C (según el pH de la solución de limpieza), se recomienda también la aplicación de un caudal bajo.

Tabla 10. Caudal de alimentación a cada caja de presión durante la recirculación de soluciones de limpieza química

Diámetro membrana en pulgadas	Presión alimentación en bar	Caudal en m ³ /h por caja de presión
2,5	1,5-4,0	0,7-1,2
4,0	1,5-4,0	1,8-2,3
8,0	1,5-4,0	6,8-9,1

6.3.2.3. Desplazamiento de la solución de limpieza/aclarado

Una vez finalizada la limpieza (o entre etapas de limpieza), deben aclararse las membranas y el circuito de limpieza con agua de calidad apropiada para cada tipo de membrana.

El proceso de aclarado finaliza cuando se tiene evidencia que se ha desplazado completamente la solución de limpieza del interior de las membranas. Véase también el apartado 8.1.4.

6.3.2.4. Arranque de la producción

Una vez finalizado el aclarado, se pone en marcha la instalación desechando el agua producto **durante 30 minutos** al caudal nominal de diseño, para garantizar la total eliminación de trazas de productos químicos de limpieza en la línea de agua osmotizada.

Existen productos formulados específicamente para limpieza de membranas, en los que además de los ácidos o bases, se añaden detergentes, reguladores de pH y otros compuestos que ayudan a la eliminación de la suciedad.

Todos los productos empleados en la limpieza de membranas deben contar con la aprobación de compatibilidad de los fabricantes de las mismas.

Sobre consideraciones sanitarias y administrativas específicas sobre sustancias y productos químicos que pueden emplearse, consúltese el capítulo 7 de esta guía y la legislación específica de agua de consumo humano.

6.3.3. Procedimiento de limpieza y recomendaciones generales para electrodiálisis

En los sistemas de electrodiálisis es posible que en las pilas de las membranas y en el bastidor hidráulico se produzca incrustaciones o contaminaciones. Para ello hay previsto un procedimiento de mantenimiento mediante una limpieza química en línea, que consiste en hacer circular por el interior de las pilas durante un tiempo más o menos prolongado determinadas soluciones químicas. El procedimiento general comporta que en función del tipo

de contaminación se utilizará soluciones de HCl o de NaCl. En los procesos de limpieza de la ED puede utilizarse en caso necesario hipoclorito sódico, al tratarse de membranas que toleran bien hasta 0,5 mg/L de cloro en continuo y dosis mayores puntuales. Esto es una diferencia fundamental respecto a tecnologías como la OI. Las membranas de ED necesitan de una limpieza manual con cepillos cada cierto tiempo. Para ello se desmontan de la pila y una a una se van cepillando para eliminar las suciedades depositadas en ellas. Siendo ésta otra de las diferencias importantes con la OI.

El bastidor cuenta con un tanque específico del que se recircula el reactivo de limpieza por el sistema. Los reactivos que se emplean son:

Solución ácido clorhídrico (HCl) al 5%

La concentración de ácido a recircular por el sistema debe ser del 5% aproximadamente, aun pH de 1-1,5. El HCl elimina las incrustaciones de carbonato cálcico, reaccionando para formar cloruro cálcico y CO₂. Cuando se sospecha de la existencia de graves incrustaciones de carbonato, se recomienda dejar la unidad con la solución ácida en su interior durante toda la noche para conseguir su máxima efectividad. El HCl también ayuda a eliminar pequeños depósitos de suciedades ligeras de la superficie de las membranas y polielectrolitos aniónicos y antiincrustantes.

Solución de cloruro sódico (NaCl) al 5%

La utilidad de la solución salina es eliminar los contaminantes orgánicos de las membranas de intercambio iónico. Este tipo de tratamiento se realiza usualmente en unidades que tratan aguas procedentes de ríos, lagos, fuentes o de tratamientos biológicos de depuradoras urbanas que contienen carga orgánica. Normalmente una limpieza salina de NaCl debe ir acompañado por una limpieza de ácido posterior.

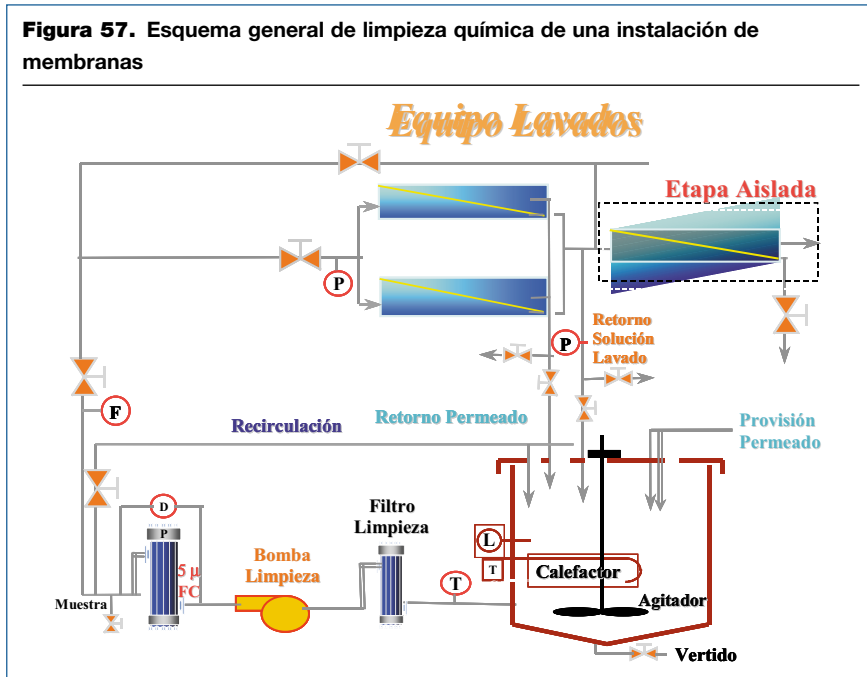
Es importante que la solución a recircular sea de al menos, un 3% de NaCl (0,55N) y que el pH de la unidad sea entre 8 y 9. Para elevar el pH puede utilizarse una pequeña cantidad de hidróxido sódico (NaOH) en el tanque de limpieza. Cualquier valor superior a 10 puede dañar seriamente las membranas aniónicas.

En determinadas circunstancias, puede producirse un ensuciamiento, que requiera la limpieza mecánica del sistema, que se realiza, desmontando la pila, siguiendo las instrucciones del fabricante, y limpiando manualmente membranas y espaciadores. Mientras se realiza esta operación, las membranas sucias pueden cambiarse por otras nuevas o limpias, volver a montar la pila y ponerla en servicio. Las membranas limpiadas, se guardaran en un recipiente tipo bañera, con agua ligeramente ácida hasta su uso.

6.3.4. Equipos de limpieza

En la mayoría de los casos, las membranas se limpian «in situ». Es recomendable que las instalaciones cuenten con su propio equipo de limpieza diseñado específicamente para cada planta y que debería incluir (Véase figura 57):

- Un **tanque de preparación de la solución de limpieza**, de un tamaño adecuado, que debería incluir una resistencia calefactora y un sistema de agitación.
- Indicadores de **temperatura y caudalímetro**.
- Un **sistema de recirculación** de los caudales de la solución de limpieza en los ramales de producto y rechazo.
- Una **bomba centrífuga de material resistente a la corrosión**, diseñada para impulsar la solución de limpieza a una presión entre 2,5 y 4 bar en el circuito.
- Un **filtro de cartucho** para evitar que los sólidos en suspensión vuelvan a entrar al sistema con la recirculación. Estos deben reemplazarse después de cada limpieza o cuando se alcance su presión diferencial máxima.
- **Puntos de toma de muestras**.



6.3.5. Conservación de las membranas en paradas

6.3.5.1. Membranas de ósmosis inversa y nanofiltración

En todos los casos de parada:

Antes de la entrada en parada desde servicio, es recomendable realizar un enjuague o desplazamiento (flushing) con agua producto o agua de alimentación, con el fin de minimizar los riesgos de incrustación y/o deposición.

En el caso de parada de menos de 48 horas:

Puede ser suficiente realizar un desplazamiento con **agua permeada** o con un arranque de la instalación de 30 minutos cada 24h.

En el caso de paradas entre 48 horas a 5 días:

Cuando la instalación se para durante más de 48h, en períodos previstos de inactividad de la planta o con el fin de realizar trabajos de mantenimiento, **es necesario proteger las membranas de crecimientos microbiológicos que afectarían posteriormente al rendimiento de la instalación.**

Uno de los procedimientos, consiste en la introducción de una solución **conservante** compuesta por un **agente reductor** o un **biocida**, en función del tipo de membrana.

A partir de 5 días de parada:

Cuando se va a proceder a una parada superior a 5 días, puede ser conveniente aprovecharla para llevar a cabo una limpieza antes de aplicar el procedimiento de conservación.

Como ejemplo, se detalla a continuación un protocolo de conservación:

1. Proceder (si fuera necesario) a una limpieza según procedimiento aplicable, asegurando un enjuague completo de la instalación
2. Poner en remojo todas las membranas con la solución de conservación, asegurando que no quede aire en los tubos de presión. Para esto, debe recircularse la solución (a caudal elevado) de forma que desplace el aire del circuito.
3. Aislar el circuito evitando la entrada de aire.
4. Cambiar la solución de conservación de forma periódica (cada formulación de preservación tienen una vida determinada). En soluciones basadas en bisulfito, se debe controlar el pH al menos una

vez a la semana. Se cambiará la solución conservante cuando el pH sea inferior al recomendado por cada fabricante de membrana.

La temperatura de conservación debería estar entre 5°C y 45°C. En caso de temperatura inferior a 5°C se podrá añadir glicerina a la solución de conservación.

Existen en el mercado de productos biocidas específicos destinados a la conservación de membranas durante paradas. Estos productos, compatibles con membranas y de amplio espectro bactericida, permiten prolongar la vida de las soluciones de conservación hasta 6 meses. Véase también el capítulo 7 sobre sustancias químicas.

Antes de reanudar la producción de agua se recomienda realizar un enjuague (seguido de una limpieza alcalina si el período de conservación ha sido largo), según lo indicado en el apartado 6.3.2.4.

6.3.5.2. Membranas de electrodiálisis

Antes de devolver la unidad al modo de operación normal, la solución de limpieza debe ser desalojada totalmente, tanto del bastidor como de las pilas. Esta solución es altamente conductora y pueden suceder averías muy severas en la unidad si no se elimina totalmente estas soluciones de limpieza al conectar los rectificadores. Por lo tanto la unidad tiene que completar el ciclo de post enjuague de la limpieza en línea antes de volver a la operación normal. Para ello, se mide en el agua producto el pH hasta llegar al valor habitual.

En caso de parada prolongada se enjuaga todo el sistema para eliminar la salmuera, hasta conseguir valores próximos a la conductividad del agua de alimentación en el bucle de salmuera. Habitualmente, en función del agua de aportación, al sistema parado, se le renueva el agua cada 3-5 días.

7. Sustancias y materiales

Este capítulo de la guía está dedicado a las sustancias para el tratamiento y los productos de construcción en contacto con el agua (materiales), en el ámbito de la desalación y el tratamiento del agua para consumo humano mediante membranas.

Se tratan por separado estas dos categorías:

- Sustancias o preparados químicos.
- Productos y materiales de construcción en contacto con el agua.

7.1. Sustancias o preparados químicos empleados en procesos de desalación y otros tratamientos del agua mediante la utilización de membranas

Como se remarca en la introducción, la desalación del agua de mar es una actividad que ha cobrado auge en España durante los últimos años. Así mismo, cada día es más común el empleo de las tecnologías de membranas para el tratamiento de aguas salobres o de calidad insuficiente en origen para atender las demandas de consumo humano.

En el presente capítulo se describen requisitos para los diversos grupos de sustancias químicas empleados en los procesos de desalación, una exposición de la normativa actualmente aplicable y la información que debe estar disponible a requerimiento de las Autoridades Sanitarias en las plantas desaladoras.

En particular, en las tecnologías de membrana existen una serie de procesos indirectamente relacionados con el tratamiento como son el mantenimiento, conservación y limpieza de las membranas, labores que se llevan a cabo «fuera de línea», sin que los dispositivos estén produciendo agua desalada. En estos casos, los productos se regularán a través de una norma o recomendación específica y pueden estar afectadas así mismo por la normativa de biocidas¹ y el nuevo reglamento REACH², por lo que es necesario que exista control y seguridad en su empleo.

¹ Real Decreto 1054/2002, de 11 de octubre, por el que se regula el proceso de evaluación para el registro, autorización y comercialización de biocidas.

² Reglamento (CE nº 1907/2006) de 18 de diciembre del Parlamento Europeo y del Consejo relativo al Registro, Evaluación, Autorización y Restricción de las sustancias y preparados químicos (REACH).

Establecimiento de requisitos adicionales por parte de las Autoridades Sanitarias de las Comunidades Autónomas

Las Comunidades Autónomas disponen de competencias en materia de vigilancia e inspección sanitaria, por lo que pueden establecer *requisitos sanitarios adicionales* para el uso de determinadas sustancias y productos (ej: establecimiento de determinados controles o restricciones), **e incluso establecer prohibiciones de uso**. Por ese motivo, se sugiere a los gestores, fabricantes o distribuidores de sustancias, que se pongan en contacto con las respectivas Consejerías de Sanidad donde prevean la distribución y empleo de sus productos químicos.

Así mismo, el empleo de sustancias por parte del gestor en lugares diferentes a los establecidos en la legislación vigente, está condicionado a **autorización previa** por parte de las Autoridades Sanitarias.

Parte de la información que se describe en el presente capítulo, puede ser también útil en la preparación de los preceptivos **informes sanitarios vinculantes** antes de la puesta en marcha de una desaladora, estaciones de tratamiento de agua potable u otras infraestructuras hidráulicas.

A efectos prácticos, las sustancias y preparados de esta categoría se han dividido en dos grupos según su punto de aplicación o modo de empleo, y según su consideración dentro de la normativa de agua de consumo humano.

- **Grupo A.** Sustancias dosificadas en continuo en el pretratamiento en los sistemas de tratamiento por membranas y sustancias empleadas en el postratamiento **del agua**, que están **normalizadas específicamente para ese uso³ y reconocidas en la legislación** de agua de consumo humano.
- **Grupo B.** Sustancias empleadas en el **mantenimiento**, la **limpieza** y la **conservación de membranas** siempre que los trabajos sean realizados fuera del circuito de producción de agua producto y en la **limpieza de superficies** en contacto con el agua.

7.1.1. Grupo A

Sustancias dosificadas en continuo en el pretratamiento en los sistemas de tratamiento por membranas y sustancias empleadas en el postratamiento del agua, que están normalizadas específicamente para ese uso y reconocidas en la legislación de agua de consumo humano.

Las sustancias químicas o preparados deben cumplir la normativa vigente aplicable a cualquier sustancia para el tratamiento del agua destinada a la producción de agua de consumo humano.

³ Disponen de normas UNE-EN o EN específicas dentro del grupo de «sustancias químicas para el tratamiento de agua destinada a la producción de agua de consumo humano».

Concretamente:

1. **Cumplimiento de los artículos 9 y 10 del Real Decreto 140/2003, de 7 de febrero por el que se establecen los criterios sanitarios de la calidad del agua de consumo humano⁴.**
2. **Cumplimiento de la Orden SAS/1915/2009**, de 21 de noviembre, sobre **sustancias para el tratamiento del agua** destinada a la producción de agua de consumo humano. (BOE 17/07/2009), que actualiza y amplía el RD 140/2003; **o cualquier otra normativa que la sustituya o complemente**, se está finalizando la tramitación de una modificación de esta Orden.

Esta nueva Orden tiene las siguientes características

- **Deroga la Orden Ministerial SCO 3719/2005, de 21 de noviembre sobre sustancias para el tratamiento del agua destinada a la producción de agua de consumo humano. (BOE 287 del 1/12/2005)**
- **Actualiza anexo II del Real Decreto 140/2003** sobre agua de consumo humano con dos listas positivas, 83 sustancias o grupos de sustancias en la parte A (sustancias para tratamiento), 10 sustancias en la parte B (Biocidas), frente a 73 iniciales, en las que se indica:
 - Nombres.
 - Sinónimos.
 - Números CAS y EINECS
 - Función principal.
 - Control analítico adicional
 - Observaciones y condiciones de utilización.
- Establece las **condiciones de cumplimiento** de las normas UNE EN.
- Exige que las sustancias vayan acompañadas de **documentación específica** a disposición de la inspección sanitaria.
- **Prohíbe** el empleo de sustancias o productos **que no estén en sus anexos (lista positiva)**.

Breve reseña sobre las Normas UNE EN

Como característica común de las sustancias recogidas en la citada Orden SAS/1915/2009, cabe destacar que *todas disponen de una norma UNE-EN específica* como «sustancias para el tratamiento de agua destinada a consumo humano» que debe ser cumplida.

Las normas UNE-EN son la adopción de **normas europeas** (Normas EN, del Comité Europeo de Normalización, CEN). Con ellas se establecen

⁴ Disponible en línea: http://www.msps.es/ciudadanos/saludAmbLaboral/docs/rd_140_2003.pdf

las características que debe tener cada sustancia, los límites de residuos, contaminantes o sustancias químicas, la dosis recomendada, y los métodos normalizados para su análisis cualitativo y cuantitativo.

El cumplimiento de las normas UNE-EN, es garantía de que las sustancias han sido elaboradas conforme a determinados niveles de calidad controlada, y que se efectúan ensayos para comprobar que las principales impurezas o subproductos, están por debajo de un límite determinado por el comité de expertos que participó en la elaboración de las citadas normas.

De todo lo anterior se desprende que **para que una sustancia pueda ser utilizada, previamente debe existir y cumplir su correspondiente norma UNE-EN**, o bien contar con una norma EN equivalente aprobada y en proceso de adopción como norma UNE-EN, dentro del grupo específico de «sustancias químicas para el tratamiento de agua destinada a consumo humano»; y cuyo nombre haya sido incluido en **las actualizaciones** establecidas en la correspondiente **Orden Ministerial**. Es decir, la existencia de una norma específica para determinada sustancia es, en este momento, un requisito previo indispensable para su consideración dentro del grupo de sustancias que pueden ser empleadas, pero no significa que sea reconocida automáticamente dentro de la lista emitida por el Ministerio de Sanidad y Consumo, ya que se han descartado aquellas sustancias activas que han sido clasificadas como CMR (cancerígena, mutagénica y tóxica para la reproducción) o con alta toxicidad u otras características que pudieran afectar a la salud.

La Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR), es responsable de la tramitación, publicación y distribución de las Normas UNE-EN, y coordina la adopción de las normas CEN en España. Para localizar una norma determinada, o para iniciar un proceso de normalización, es preciso ponerse en contacto con AENOR por ser el órgano designado por el Comité Europeo de Normalización (CEN) para tal fin. Web: <http://www.aenor.es>

7.1.2. Grupo B

Sustancias empleadas en el mantenimiento, la limpieza y la conservación de membranas, siempre que los trabajos sean realizados fuera del circuito de producción de agua producto y en la limpieza de superficies en contacto con el agua.

Corresponden a este grupo las sustancias empleadas en la limpieza y mantenimiento de las membranas a planta parada. Los biocidas empleados deben estar incluidos en el tipo de producto 4 conforme a la legislación vigente, y las sustancias no biocidas deberán ser conformes al reglamento del REACH.

En este caso, las sustancias empleadas no están dentro del ámbito de la Orden SAS/1915/2009 al tratarse de agentes de superficie y limpiadores, que siempre se emplean a planta parada. No obstante, se regularán mediante una norma o recomendación específica por parte del Ministerio de Sanidad y Política Social. De ese modo, a parte de lo indicado en el capítulo 6, de momento **se establecen las siguientes recomendaciones.**

Condiciones, criterios y recomendaciones en su aplicación.

1. Las actuaciones se realizarán **únicamente fuera de producción.**
2. Documentación que se solicite la autoridad sanitaria competente.
3. Deberán excluirse las sustancias carcinogénicas, mutagénicas o tóxicas para la reproducción (sustancias CMR).
4. Las sustancias no biocidas deben estar preregistradas en el REACH, y en un futuro próximo, autorizadas por este Reglamento.
5. Es preciso enjuagar tal y como se explica en el capítulo 6 de la presente guía.
6. Existirá un protocolo detallado de limpieza, en el que se mencione en cada caso el procedimiento y el volumen mínimo de agua y tiempo necesario para cada tipo de enjuagues.
7. Una vez finalizada la limpieza, la puesta en marcha está supeditada **a la demostración empírica directa o indirecta** de que cualquier resto de las sustancias químicas empleadas ha sido eliminado. De todo ello quedará constancia en el **cuaderno de operaciones**, que podrá ser solicitado por la autoridad sanitaria competente.
8. Para cumplir lo que se indica en el punto anterior, se sugiere como mínimo el control del pH y la conductividad, cuya medición a la entrada y salida del bastidor, del elemento de membrana o de la caja de presión, indiquen el mismo valor antes de la puesta en producción.
9. Se adoptarán las medidas necesarias para neutralizar el efluente y evitar posibles efectos medioambientales.

En la página siguiente se adjunta a modo de **ejemplo, un resumen de la información requerida por la autoridad competente de Reino Unido: Comité británico de productos y procesos (CPP)**, en el contexto de su sistema nacional de aprobación para las sustancias o productos químicos empleados en tecnología de membranas (WRAS⁵), a los fabricantes de cada preparado que va a ser utilizado para el tratamiento del agua.

⁵ Como referencia, entre otras, se ha empleado la siguiente publicación: «Guidance to applicants seeking approval of products and processes for use in the treatment and provision of public water supplies». 2002. Committee on products and processes for use in public water supply. Drinking Water Inspectorate. DEFRA. Department for Environment, Food & Rural Affairs. 86 pp.

Recomendaciones sobre los requisitos informativos y documentación de las sustancias y productos empleados en los procesos de desalación.

Información solicitada.

- Descripción del producto.
- ¿Es antiincrustante o desinfectante?

Descripción de la utilización del producto.

- Rangos de dosificación normal y máximo.
- Tipos de membranas en la que se puede utilizar.
- Tipos de agua.
- Puntos de aplicación.
- Método de dosificación y control.
- Método para determinar la concentración del producto en el agua; y si corresponde, cualquier impureza relevante.
- Reactividad con cualquier sustancia habitual en el tratamiento. En particular con cloro y ozono.

Especificaciones del producto.

- Fórmula química completa y sus correspondientes números CAS.
- Nombre de suministrador de cada uno de los componentes, junto con los nombres de contacto, dirección, teléfono, y fax.
- Propiedades generales como el estado físico, color, olor, tamaño de las partículas, puntos de ebullición/fusión, solubilidad, pH, viscosidad, peso molecular, etc.
- Especificación, incluyendo ensayos, de la cantidad de impurezas, monómeros que reaccionan y otros residuos, subproductos, coadyuvantes, etc.
- Métodos de análisis y límites de detección y/o cuantificación para los ensayos y cualquier impureza significativa.
- Líneas generales del proceso de producción.
- Identidad y cantidad de cada reactivo empleado, incluyendo los aditivos menores y los catalizadores.
- Especificaciones de los reactivos.
- Descripción del proceso con el orden de las adiciones y los parámetros fundamentales de la reacción como la temperatura y el tiempo.
- Principios químicos de la reacción y reacciones colaterales.
- Purificación del producto.
- Cualquier otra información relevante.

Sobre la efectividad de uso.

- Datos básicos.

Evidencias sobre los posibles efectos toxicológicos del producto y los de cualquier otra impureza significativa.

El resumen debe incluir:

- Ensayos de toxicidad aguda disponibles en mamíferos (oral, absorción dérmica, inhalación, irritación ocular, sensibilización de piel, ensayos de fotosensibilidad/fototoxicidad, etc).
- Ensayos sobre genotoxicidad (Screening).
- Ensayos de toxicidad subaguda, como los estudios de alimentación a 90 días en mamíferos.
- En caso de existir: estudios metabólicos, de inducción teratogénica, estudios de toxicidad crónica mediante ensayos de alimentación a largo plazo en mamíferos (normalmente rata, durante 2 años)
- Ensayos de ecotoxicidad (*Daphnia magna*, peces)
- Datos sobre la toxicología de los productos de reacción generados durante la cloración o la ozonización.

Información sobre el comportamiento del producto después de su aplicación.

- Biodegradabilidad o persistencia del producto. Recomendaciones para su tratamiento antes del vertido.

Instrucciones de uso.

Debe contener:

- Descripción del producto.
- Descripción del modo de empleo.
- Preparación del producto preliminar antes de su aplicación.
- Método y modo de dosificación.
- Dosis máxima.
- Método para el control de la dosificación y control de la concentración en el agua.
- Instrucciones de seguridad para su eliminación.
- Curvas de degradación de producto.

Los productos para dosificación fuera de línea deben incluir:

- Detalles de los procedimientos de enjuague que demuestren que el producto ha sido completamente eliminado de la membrana.
- Curva de eliminación de cómo se lleva esto a la práctica.
- Cualquier otra información que sea requerida por las Autoridades Sanitarias.

7.1.2.1. Recomendaciones en su aplicación

- Respetar la dosificación.
- Calibración periódica de los sistemas de dosificación automáticos.
- Respetar las incompatibilidades.
- Las sustancias, utilizadas en el pretratamiento, no deberían aparecer en el agua producto por encima de su límite de detección, si así fuera, debería revisarse la efectividad de la membrana y adoptar las medidas correctoras pertinentes para que no pasen esas sustancias al agua producto.
- Registro del consumo real de cada producto y gráficas de evolución de la dosificación de cada reactivo.
- Plan de actuación ante incidencias. Incluyendo el cálculo de las posibles concentraciones de sustancia en el agua producto, en el peor escenario posible.
- El laboratorio que realice los controles de sustancias en el agua producto, deberían cumplir lo establecido en el artículo 16 del Real Decreto 140/2003.

Para más información sobre sustancias para el tratamiento del agua de consumo humano, es posible consultar las siguientes páginas web del Ministerio Sanidad y Política Social:

Profesionales: <http://www.msps.es/profesionales/saludPublica/saludAmbLaboral/calidadAguas/home.htm>

7.2. Productos y materiales de construcción en contacto con el agua

El agua tiene unas propiedades extraordinarias. Su comportamiento bipolar, actuando según las cargas de las sustancias y elementos presentes en su matriz, la convierte en el «disolvente universal». Una gran cantidad de las sustancias por tanto pueden ser disueltas, convertidas en micelas, o simplemente arrastradas en suspensión por el agua.

También es bien sabido que en función del equilibrio iónico del agua, y en particular de su pH, temperatura, dureza, alcalinidad y oxígeno disuelto, tiene mayor o menor capacidad agresiva, corrosiva, oxidativa o incrustante sobre algunos materiales, especialmente sobre muchos metales féreos. La agresividad del agua desalada antes de su postratamiento, es una buena prueba de ello. Igualmente sucede con las aguas de mar o salobres.

Todo ello supone una migración potencial de los materiales ya sean metálicos, poliméricos (plásticos, resinas), cementosos e incluso cerámicos al agua que permanece o fluye por las diversas infraestructuras hidráulicas. Una selección inadecuada de los materiales, puede incrementar la presencia de elementos y sustancias causando alteraciones en la calidad del agua. Las más frecuentes son cambios organolépticos como olores, sabores y colores; o si las sustancias están contempladas en las listas de parámetros que se controlan en el agua, puede llegar a provocar incumplimientos, incluso la no aptitud del agua para ser distribuida para consumo humano.

Otra posible fuente de inquietud, es la liberación de las llamadas «sustancias inesperadas». En particular, la composición polimérica y la presencia de diversos ingredientes en muchos materiales plásticos se presta a ello. En estos casos, sólo se puede identificar mediante barridos realizados con equipos de muy alta sensibilidad y resolución como la cromatografía de gases-espectrometría de masas (CGMS).

Complementariamente, es sabido que determinadas sustancias tienen tendencia al desarrollo de microorganismos en su superficie, bien por constituir hábitat favorable, bien por ser fuente de nutrientes que favorecen su crecimiento. Esta cualidad de determinados materiales puede dar lugar a la formación de biopelículas (biofilm) en detrimento de la calidad del agua y el funcionamiento de las membranas.

En 1999, los cuatro países que disponían de sistemas de aprobación de materiales de construcción en contacto con el agua (Francia, Alemania, Holanda y Reino Unido) alentados por la Comisión Europea, publicaron un estudio sobre la viabilidad de crear un sistema uniforme para los países de la Unión Europea que evitara trabas al comercio internacional y supusiera una garantía de calidad para consumidores y usuarios a la hora de seleccionar determinados productos o materiales.

Este sistema vino a denominarse **EAS**, «**European Acceptance Scheme for construction products in contact with drinking water**», Sistema Europeo para la aceptación de productos de la construcción en contacto con el agua. España acogió muy bien la iniciativa, y comenzó a trabajar desde sus inicios en el Grupo de Reguladores formado por representantes de los Estados Miembros (RG-CPDW, Regulators Group on Construction Products in contact with Drinking Water), actualmente convertido en un Grupo de Expertos.

Este sistema trata de establecer los procedimientos para la correcta selección de los productos y materias primas mediante un procedimiento basado en principios científicos, con el fin de garantizar la seguridad sanitaria de los materiales en contacto con el agua de consumo. Para ello, se apoya en normas europeas armonizadas (hEN) y un desarrollo normativo a escala europea que le confiera aplicabilidad.

7.2.1. Recomendaciones y criterios básicos sanitarios para la selección de productos y materiales en contacto con el agua

De modo preliminar, este capítulo recoge una serie de **recomendaciones y criterios básicos** como orientación a la selección de productos de construcción empleados en las instalaciones de desalación y en los abastecimientos hasta el grifo del consumidor. Así mismo, se describe el **tipo de información** que debería estar disponible como apoyo al **informe sanitario vinculante**.

En principio, la **agresividad natural** de las aguas de aporte y las aguas producto, hace que generalmente se empleen materiales de muy buena calidad y con una gran resistencia a cualquier tipo de degradación, lo cual sin duda contribuye a limitar las sustancias que pueden migrar de los productos de construcción al agua.

Adicionalmente, las eventuales migraciones que podrían tener lugar desde los materiales de la captación, conducciones y fase de pretratamiento hasta algunos tipos de membranas, en particular las de ósmosis inversa, quedan frenadas por el mismo motivo que las sustancias químicas empleadas en el pretratamiento. Efectivamente, algunas membranas se comportan como filtros, no dejando atravesar por lo general ni siquiera sustancias disueltas. De hecho, una de las causas frecuentes de limpieza es la deposición de iones metálicos sobre las membranas. (Ver en el capítulo 6 las recomendaciones sobre limpieza de membranas).

7.2.1.1. Condiciones generales que debería cumplir todo producto en contacto con el agua de consumo

Los materiales deben cumplir todo lo que establece el **Real Decreto 140/2003**, de 7 de febrero por el que se **establecen los criterios sanitarios de la calidad del agua de consumo humano**.

En particular, en el citado RD 140/2003, parte de la definición de «producto de construcción en contacto con agua de consumo humano» como todo producto de construcción, de revestimiento o utilizado en los procesos de montaje de las captaciones, conducciones, ETAPs, redes de abastecimiento y distribución, depósitos, cisternas e instalaciones interiores que estén situadas desde la captación hasta el grifo del consumidor.

El artículo 8 sobre las **conducciones del agua**, establece que antes de su puesta en funcionamiento, se realizará un lavado y/o desinfección de las conducciones. El material de construcción, revestimiento, soldaduras y accesorios **no transmitirán al agua sustancias o propiedades que contaminen o empeoren la calidad del agua procedente de la captación**.

Así mismo, en el artículo 11 sobre «**depósitos y cisternas** para el agua de consumo humano», se indica que «los depósitos públicos o privados, fijos o móviles, de la red de abastecimiento, de distribución o de instalaciones interiores y cisternas para agua de consumo humano deberán cumplir con lo dispuesto en el artículo 14».

El artículo 14, específicamente dedicado a los **productos de construcción** en contacto con el agua de consumo humano, expresa:

Que los productos que estén en contacto con el agua de consumo humano, por ellos mismos o por las prácticas de instalación que se utilicen, **no transmitirán al agua de consumo humano sustancias o propiedades que contaminen o empeoren su calidad y supongan un incumplimiento de los requisitos especificados en el anexo I o un riesgo para la salud de la población abastecida**. Los parámetros del anexo I, son límites cuantitativos de determinadas sustancias cuya concentración no debe ser superada por razones sanitarias, por razón de su toxicidad o por su valor como indicadores de contaminación microbiológica, química o física. La superación de un parámetro causa la **no aptitud** del agua, salvo en el caso de tratarse de un parámetro de la parte C, siempre que su incumplimiento no suponga un riesgo sanitario para la población abastecida.

Otro principio fundamental de este artículo es que **los materiales de construcción no pueden estar compuestos por sustancias peligrosas** para la salud.

Concretamente, para los productos de construcción empleados en aparatos de tratamiento en edificios (equipos de bombeo, equipos domésticos de filtración u ósmosis inversa, etc.); los depósitos y cisternas, las redes de distribución públicas, privadas, incluso las redes interiores, podrían ser sujeto de autorizaciones para su uso según disposiciones que regularía en su caso la Comisión Interministerial de Productos de Construcción (CIPC) y, por lo dispuesto en la legislación sobre notificación de sustancias nuevas y clasificación, envasado y etiquetado de las sustancias peligrosas; en la normativa sobre clasificación, envasado y etiquetado de preparados peligrosos o cualquier otra legislación o normativa técnica que pudiera ser de aplicación, en lo que no se oponga a lo dispuesto en el Real Decreto 140/2003.

Dentro de los materiales se incluyen todas aquellas sustancias empleadas en el montaje como soldaduras, pegamentos, juntas, colas, lubricantes, grasas, siliconas, etc; que puedan estar en contacto con el agua.

Cabe destacar por tanto, que todo lo tratado en el presente capítulo es válido **no sólo para las desaladoras, sino para cualquier infraestructura en contacto con el agua de consumo humano**.

7.2.1.2. Recomendación sobre información básica

Las Autoridades Sanitarias competentes (Comunidad Autónoma) deben emitir un informe vinculante en el periodo de proyecto y después otro infor-

me basado en una inspección antes de la puesta en marcha de una nueva instalación. Por ese motivo, **los responsables del proyecto de la planta o de las instalaciones, al solicitar el informe vinculante, deben presentar un dossier detallado con la información aportada por los fabricantes sobre los productos de construcción y materiales que vayan a estar en contacto con el agua.**

Son de especial interés las características de los productos de construcción, las pruebas que demuestren su seguridad desde el punto de vista sanitario y otros aspectos adicionales.

El dossier quedará en la instalación, una vez puesta en marcha ante cualquier eventual inspección de la autoridad sanitaria competente.

Seguidamente se dan ejemplos de la información que podría ser solicitada por la Autoridad sanitaria competente.

Datos generales. (Anexo IX del RD 140/2003)

1. Empresa comunicante

Nombre, dirección, código postal, Ciudad (Provincia), teléfono, fax, correo electrónico, número de registro sanitario de la empresa.

2. Producto

- Fabricante y dirección.
- Nombre comercial del producto.
- Finalidad del producto para: tubería, depósito, junta o soldadura, revestimiento, accesorio, membranas, otra (especificar)
- Ubicación/es recomendada/s por el fabricante para el producto.
- ¿Está en contacto directo con el agua de consumo humano?
- Clasificación del producto.
- Incompatibilidades con otros productos, sustancias y/o desinfectantes.
- Ensayos de migración del producto al agua.
- Ensayos de reacción química del producto a 20 ppm de cloro.

3. Composición y etiquetado:

- a) Composición cualitativa y cuantitativa al 100%, incluidas impurezas, N° CAS y N° CE.
- b) Etiqueta original del producto.

Casos particulares según tipos de productos

Se adjunta, a modo de ejemplo, un resumen de la información requerida por la autoridad competente del Reino Unido: «Guidance to applicants

seeking approval of products and processes for use in the treatment and provision of public water supplies». 2002. Committee on products and processes for use in public water supply. Drinking Water Inspectorate. DEFRA. Department for Environment, Food & Rural Affairs. 86 pp. Esta información es requerida en el Reino Unido a los fabricantes de materiales en contacto con el agua y/o diseñadores de la planta.

- a) Elementos o sistemas de membranas.
- b) Medios de filtración.
- c) Conducciones (tuberías) y recubrimientos.
- d) Resinas de intercambio iónico.
- e) Valvulería, juntas, adhesivos y otros accesorios.

A) Elementos o sistemas de membranas

Información básica

- Nombre del producto.
- Descripción y funciones.
- Información sobre los límites de tolerancia de la membrana. (Ej: si resiste o no un determinado grado de cloración).
- Descripción general del modo de funcionamiento, incluido las presiones, tasas de filtración, descripción del flujo, % de agua producto obtenida y descripción del modo de ensamblaje de los elementos en las cajas de presión y del tipo de juntas empleadas.

Datos sobre el montaje o construcción con el producto.

- Diagramas o fotografías explicativas mostrando como está estructurado cada elemento y el ensamblaje típico de un conjunto de elementos.
- Descripción de la construcción del producto con una descripción detallada de todos los componentes de cada tipo de membrana empleado, incluyendo composición y dimensiones. En el caso de sistemas de membranas de fibra, debe incluir detalles sobre el número de fibras, área de filtración, dimensiones internas y externas de las fibras y su longitud.
- Información sobre el tipo de agua que va a estar en contacto con cada componente de la membrana durante su funcionamiento (ej: agua de entrada, agua producto, salmuera, etc). En los casos que la corriente de rechazo vuelva a introducirse de nuevo a otra etapa, debe indicarse claramente que tipo de agua está en contacto con cada componente de la membrana.
- Tabla resumen con la lista de todos los componentes empleados en un elemento.
- Para cada uno de estos componentes, la tabla resumen debe contener la siguiente información:
 - Número de referencia del componente.
 - Nombre del componente.
 - Nombre del proveedor de cada componente.
 - Tipo de composición química.

- Área superficial en contacto con el agua de entrada, el producto o el agua de rechazo (m^2)
- Superficie en contacto con el agua producto (m^2)
- Relación área superficial/volumen (m^2/m^3)

Informe con los siguientes ensayos⁶

- Olor y sabor del agua.
- Apariencia.
- Crecimiento de microorganismos.
- Citotoxicidad.
- Migración de metales.

Formulación detallada

- Información sobre aditivos, catalizadores, filtros, colorantes e impurezas.
- Peso molecular o intervalos de pesos moleculares para cada constituyente polimérico junto con la concentración de cualquier monómero residual.
- Fichas de datos de seguridad de cada ingrediente.
- Descripciones, composiciones químicas para los líquidos conservantes de las membranas.
- Nombre de cada proveedor de cada componente junto con su nombre de contacto, dirección, teléfono, fax, y correo electrónico.

Deben presentarse los ensayos básicos para cada uno de los componentes de la membrana tanto aguas arriba como aguas abajo.

Instrucciones de uso

No es preciso ni deseable adjuntar un lote completo de manuales de funcionamiento, sino las instrucciones de uso, es decir, el documento que se entrega a los clientes junto con la compra del producto. Las instrucciones deben comprender:

- Instalación y enjuague.
- Funcionamiento.
- Modo de lavado y retrolavado.
- Seguridad en el manejo.
- Vertido del agua residual.

Si se emplean sustancias alternativas a las recomendadas por el fabricante de membranas, deben emplearse técnicas que permitan detectar que no se ocasionará un incumplimiento de la normativa vigente en cada momento.

Las instrucciones de limpieza deben incluir información sobre la frecuencia de limpieza y los productos que pueden emplearse. También debe acompañarse de los procedimientos de eliminación de todos los agentes de limpieza antes de volverse a poner en funcionamiento. Deben incluirse también curvas de eliminación.

Es importante que los ensayos de migración (o lixiviación) reconstruyan las condiciones lo más reales posible en las que el producto va a ser instalado.

⁶ En caso de existir, los ensayos deberán ser realizados conforme su correspondiente norma UNE EN.

B) Medios de filtración

La mayor parte de los medios de filtración se encuentran recogidos en la legislación de agua de consumo⁷ y fundamentalmente se aplica lo expuesto en el apartado anterior sobre sustancias para el tratamiento de agua de consumo.

Especificación del producto

Forma física, tamaño y distribución de las partículas, propiedades de adsorción, especificaciones técnicas.

Origen y especificaciones técnicas de las materias primas

Debe incluirse la información sobre las concentraciones de hidrocarburos aromáticos policíclicos, metales tóxicos y cualquier otra impureza relevante del producto.

Evidencias del efecto del producto sobre la calidad del agua

- Migración de metales.
- Cualquier estudio de migración específico que atendiendo a la formulación soliciten las Autoridades Sanitarias.
- Evidencia de que el producto no fomenta el crecimiento bacteriano. (Facilitar ensayos).
- Estudio de solubilidad y liberación de contaminantes específicos desde el medio.
- Directrices sobre cuando sería posible alcanzar la saturación y el breakthrough y como puede prevenirse (deben construirse curvas de saturación).

Esquemas del proceso de fabricación

- Tipos y cantidades de materias primas y reactivos empleados incluyendo aditivos y catalizadores.
- Procesos como el extrusionado, tamizado, y tamaño de partículas obtenido.
- Reacciones químicas y físicas y cualquier reacción lateral incluyendo temperaturas y detallando cada etapa y cualquier proceso químico accesorio que pueda emplearse.
- Detalles sobre cualquier proceso de finalización y cualquier otra información relevante.

Instrucciones de uso

- Descripción del producto.
- Descripción del modo de empleo.
- Preparación del lecho.
- Procedimientos de acondicionamiento o activación del lecho.
- Precauciones durante la limpieza y regeneración.
- Condiciones de almacenamiento.
- Desecho del producto.
- Procedimientos generales de seguridad en el manejo.

⁷ Orden SAS/1915/2009, de 8 de julio, sobre sustancias para el tratamiento del agua destinada a la producción de agua de consumo humano (BOE 17/07/2009).

C) Conducciones y recubrimientos

Información requerida:

Descripción del producto

- Nombre comercial.
- Tipo de producto.

Esquema de utilización

- Tipos de agua que pueden emplearse.
- Relación superficie de producto por volumen de agua; o para las conducciones, información sobre los diámetros.
- Para recubrimientos, especificar si la aplicación viene de fábrica.
- En los productos de aplicación «in situ», métodos de aplicación, condiciones de curación, e instrucciones de puesta en funcionamiento.
- Propiedades generales, como las propiedades físicas, color, densidad, etc.
- Etapas del proceso o tratamiento en las que el agua va a estar en contacto con el recubrimiento.
- Tiempos estimados de contacto.

Evidencias del efecto del producto sobre la calidad del agua

- Informe con los ensayos básicos⁸.
- Para los productos de aplicación «in situ» las condiciones de los ensayos básicos deben reconstruir las condiciones reales típicas al lugar donde debe emplearse el producto.

Formulación del producto

Debe incluir:

- Número CAS y composición de cada ingrediente.
- Nombre del proveedor de cada ingrediente incluyendo nombre de contacto, dirección, teléfono, fax y correo electrónico.
- Especificaciones técnicas de cada ingrediente.

Concentraciones de impurezas, monómeros sin reaccionar, subproductos, aditivos y catalizadores en el producto

- Para los productos poliméricos o ingredientes, peso molecular (o intervalos) de los polímeros y de las concentraciones de cualquier monómero residual.
- Composición química completa de los iniciadores (cuando corresponda).
- Para productos bicomponente, la proporción de cada uno.

⁸ Olor y sabor del agua, apariencia, crecimiento de microorganismos, citotoxicidad, migración de metales. Conforme a sus correspondientes normas UNE-EN en caso de que estén disponibles.

Esquema del proceso de fabricación

- Descripción del proceso con el orden de adición de los componentes y detalles de los parámetros de proceso más importantes.
- Cantidad de reactivos empleados.
- Reacciones químicas y físicas y cualquier otra reacción lateral junto con detalles del proceso de terminación.
- Para los productos termo sellados, (por ejemplo los plásticos con fibras de refuerzo, gomas, compuestos fenólicos, etc), detalles completos sobre las condiciones de curación, incluyendo:
 - Curva de temperatura.
 - Duración de la curva.
 - Agentes o lubricantes empleados para el desencofrado.
 - Método de secado/fraguado (ej: secado al aire, en corriente, etc.)
 - Duración y temperatura de secado/fraguado.

Especificación de producto

- Debe facilitarse las fichas de seguridad de cada ingrediente separadamente.

Instrucciones de uso

Deben presentarse como un documento independiente.

Para conducciones:

- Descripción del producto.
- Descripción del modo de empleo.
- Especificaciones físicas del producto.
- Para conducciones cementosas, las especificaciones deben incluir los límites de agresividad del agua que puede ser transportada.
- Instrucciones de almacenamiento.
- Instrucciones de instalación. (ej: como deben mezclarse).
- Ensayos.
- Procedimientos generales de seguridad.

Para recubrimientos poliméricos, materiales de reparación u otros recubrimientos:

- Descripción del producto.
- Descripción del modo de empleo.
- Instrucciones para la preparación del producto por el usuario, incluyendo las proporciones de mezcla y el tiempo de aplicación disponible de la preparación antes de que fragüe.
- Instrucciones para la preparación de la superficie.
- Instrucciones de aplicación incluida la temperatura mínima de aplicación.
- Condiciones de curado con la curva de curación de los productos cementosos altamente modificados (ej: los que tienen más del 35% de modificadores orgánicos).
- Vida útil del producto aplicado.
- Procedimientos generales de seguridad.

D) Resinas de intercambio iónico

Información requerida:

Descripción del producto

- Tipo de resina.
- Tipo de lecho: capacidad, tamaño, etc.
- Flujo de trabajo.
- Tiempo de contacto con el lecho vacío.
- Tipo de regenerador empleado y volumen.
- Volumen de enjuague.
- pH que se alcanza y como se alcanza. Tipo de base o ácido empleados.

Especificación de producto

- Formulación de los ingredientes principales incluyendo el número CAS.

Descripción esquemática del proceso de fabricación

No es preciso un protocolo exhaustivo, pero sí dar detalles sobre la materia prima y los reactivos empleados, la temperatura de cada una de las fases de producción. Es importante reseñar cualquier sustancia que no se consuma completamente durante el proceso de fabricación.

Efectividad de uso y caracterización del punto de ruptura

Presentar evidencias de pruebas piloto que muestren la efectividad. Debe determinarse la cantidad de impurezas en las aguas que deben ser eliminadas en cada caso. De igual modo, debe demostrarse la eficiencia y efectividad de la eliminación del producto en el agua.

Datos toxicológicos de los principales componentes de la formulación

Deben describirse los principales efectos sobre la salud de los componentes principales, y debe incluirse así mismo una evaluación de riesgo de la toxicidad potencial en la utilización del producto.

Efectos del producto sobre la calidad del agua

El usuario debe mostrar como el producto afecta a la calidad del agua. Debería demostrarse el empleo de estas resinas no causa ningún incumplimiento.

Regeneración, desecho, y reutilización del producto

El desecho del producto debe realizarse conforme a la legislación vigente. Si el producto se regenera o se reutiliza debe indicarse claramente.

Instrucciones de uso

La utilización correcta depende en gran medida de la claridad de las instrucciones. Deben incluirse los siguientes aspectos:

- Debe ser un documento independiente y aislado del producto (no el la misma etiqueta).
- Debe incluir detalles como el tamaño, profundidad, capacidad, etc.
- Flujos.
- Estabilización de pH.
- Volumen de regeneración.
- Estimación de la vida útil.
- Protocolo de eliminación.
- Aspectos de seguridad laboral.

E) Valvulería, juntas, adhesivos y otros accesorios

Información requerida:

Descripción del producto

- Nombre comercial.
- Tipo de producto.

Esquema de utilización

- Tipos de agua que pueden emplearse, indicando los intervalos de características físico químicas aceptables.
- Relación superficie de producto por volumen de agua, información sobre los diámetros.
- Propiedades generales como las propiedades físicas, color, densidad, etc.
- Etapas del proceso o tratamiento en las que el agua va a estar en contacto con algún elemento.
- Tiempos estimados de contacto.

Formulación del producto

Debe incluir:

- Número CAS y composición de cada ingrediente.
- Nombre del proveedor de cada ingrediente incluyendo nombre de contacto, dirección, teléfono, fax y correo electrónico.
- Especificaciones técnicas de cada ingrediente.

Concentraciones de impurezas, monómeros sin reaccionar, subproductos, aditivos y catalizadores en el producto

- Para los productos poliméricos o ingredientes, peso molecular (o intervalos) de los polímeros y de las concentraciones de cualquier monómero residual.
- Composición química completa de los iniciadores (cuando corresponda)
- Para productos bicomponente, la proporción de cada uno.

Especificación de producto

- Debe facilitarse las fichas de seguridad de cada ingrediente de forma separada.

Instrucciones de uso

Deben presentarse como un documento independiente.

- Descripción del producto.
- Descripción del modo de empleo.
- Especificaciones físicas del producto.
- Instrucciones de almacenamiento.
- Instrucciones de instalación. (ej: como deben mezclarse).
- Ensayos
- Procedimientos generales de seguridad.
- Vida útil del producto.

Otros criterios de valoración sobre materiales en contacto con el agua

Ante la falta de legislación nacional por la situación de *statu quo*, al estar elaborándose a nivel europeo una futura legislación sobre este tema, se comentan dos situaciones que la autoridad sanitaria competente podría tener en consideración.

- 1º Si bien, el agua de consumo se excluye expresamente en la legislación alimentaria sobre materiales en contacto con alimentos, una condición favorable a la hora de seleccionar y demostrar la adecuación de los materiales, es que **sean aptos para entrar en contacto con los alimentos**. En caso de existir, deben adjuntarse las pruebas de aptitud para la concesión del correspondiente logotipo «calidad alimentaria».⁹
- 2º Los productos comercializados a nivel internacional que cuenten con certificaciones de sistemas de aprobación de reconocido prestigio, acerca de productos y materiales de construcción en contacto con el agua de consumo.

⁹ Más información en la Agencia Española de Seguridad Alimentaria y Nutrición. <http://www.aesa.msp.es>

7.3. Información adicional

7.3.1. Referencias españolas

Datos de contacto en materia de productos de construcción en contacto con el agua.

Comisión Interministerial de Productos de la Construcción (CIPC). (Responsables de los asuntos relacionados con productos de la construcción).

- Ministerio de Industria, Turismo y Comercio. (Secretaría CIPC)
- Instituto Eduardo Torroja. (Representación española en el Grupo de Expertos sobre Productos de Construcción en contacto con el agua de consumo. EG-CPDW¹⁰)

También es posible consultar las siguientes páginas web del Ministerio Sanidad y Política Social:

Ciudadanos:

<http://www.msps.es/ciudadanos/saludAmbLaboral/calidadAguas/home.htm>

Profesionales:

<http://www.msps.es/profesionales/saludPublica/saludAmbLaboral/calidadAguas/home.htm>

7.3.2. Referencias de normas UNE EN sobre materiales de construcción y agua de consumo humano

A modo de ejemplo, se citan las normas en vigor a fecha de publicación de la presente guía acerca de la influencia de los materiales en contacto con agua destinada a consumo humano. Es posible consultar nuevas normas y actualizaciones en el portal web de la Asociación Española de Normalización y Acreditación (AENOR), responsable de su publicación y venta. www.aenor.es.

UNE-EN 1420-1:2000. Influencia de los materiales orgánicos sobre el agua destinada al consumo humano. Determinación del olor y del sabor en las redes de distribución. Parte 1: Método de ensayo.

¹⁰ Expert group on Construction Products used in contact with Drinking Water.

- UNE-EN 12873-1:2004. Influencia de los materiales sobre el agua destinada al consumo humano. Influencia de la migración. Parte 1: Método de ensayo de materiales de fabricación industrial, excepto los materiales metálicos y los materiales a base de cemento.
- UNE-EN 12873-2:2005. Influencia de los materiales sobre el agua destinada al consumo humano. Influencia de la migración. Parte 2: Método de ensayo de materiales aplicados in situ, excepto los materiales metálicos y los materiales a base de cemento.
- UNE-EN 12873-3:2007. Influencia de los materiales sobre el agua destinada al consumo humano. Influencia de la migración. Parte 3: Método de ensayo para resinas de intercambio iónico y adsorbentes.
- UNE-EN 12873-4:2007. Influencia de los materiales sobre el agua destinada al consumo humano. Influencia de la migración. Parte 4: Método de ensayo para las membranas para tratamiento del agua.
- UNE-EN 13052-1:2002. Influencia de los materiales sobre el agua destinada al consumo humano. Materiales orgánicos. Determinación del color y de la turbidez del agua en las redes de distribución. Parte 1: Método de ensayo.
- UNE-EN 14395-1:2005. Influencia de los materiales orgánicos sobre el agua destinada al consumo humano. Evaluación de las características organolépticas del agua en sistemas de almacenamiento. Parte 1: Método de ensayo.
- UNE-EN 14718:2007. Influencia de los materiales orgánicos sobre el agua destinada al consumo humano. Determinación de la demanda de cloro. Método de ensayo.
- UNE-EN 14944-1:2007. Influencia de los materiales con base de cemento sobre el agua destinada al consumo humano. Métodos de ensayo. Parte 1: Influencia de los productos de base cemento de fabricación industrial sobre los parámetros organolépticos.
- UNE-EN 14944-3:2008. Influencia de los materiales con base de cemento sobre el agua destinada al consumo humano. Métodos de ensayo. Parte 3: Migración de sustancias desde materiales con base de cemento.
- UNE-EN 14718:2007. Influencia de los materiales orgánicos sobre el agua destinada al consumo humano. Determinación de la demanda de cloro. Método de ensayo.
- UNE-EN 1420-1:2000. Influencia de los materiales orgánicos sobre el agua destinada al consumo humano. Determinación del olor y del sabor en las redes de distribución. Parte 1: Método de ensayo.
- UNE-EN 14395-1:2005. Influencia de los materiales orgánicos sobre el agua destinada al consumo humano. Evaluación de las características organolépticas del agua en sistemas de almacenamiento. Parte 1: Método de ensayo.

- UNE-EN 12873-1:2004. Influencia de los materiales sobre el agua destinada al consumo humano. Influencia de la migración. Parte 1: Método de ensayo de materiales de fabricación industrial, excepto los materiales metálicos y los materiales a base de cemento.
- UNE-EN 12873-2:2005. Influencia de los materiales sobre el agua destinada al consumo humano. Influencia de la migración. Parte 2: Método de ensayo de materiales aplicados in situ, excepto los materiales metálicos y los materiales a base de cemento.
- UNE-EN 12873-3:2007. Influencia de los materiales sobre el agua destinada al consumo humano. Influencia de la migración. Parte 3: Método de ensayo para resinas de intercambio iónico y adsorbentes.
- UNE-EN 12873-4:2007. Influencia de los materiales sobre el agua destinada al consumo humano. Influencia de la migración. Parte 4: Método de ensayo para las membranas para tratamiento del agua
- UNE-EN ISO 8795:2002. Sistemas de canalización en materiales plásticos para el transporte de agua destinada al consumo humano. Evaluación de la migración. Determinación de los valores de migración en los tubos y accesorios de plástico y sus uniones. (ISO 8795:2001)
- UNE-ENV 852:2002. Sistemas de canalización en materiales plásticos para el transporte de agua destinada al consumo humano. Evaluación de la migración. Guía para la interpretación de los valores de migración derivados de laboratorio.
- UNE-ENV 12108:2002. Sistemas de canalización en materiales plásticos. Práctica recomendada para la instalación en el interior de la estructura de los edificios de sistemas de canalización a presión de agua caliente y fría destinada al consumo humano.
- UNE-ENV 12108:2002 ERRATUM: 2007. Sistemas de canalización en materiales plásticos. Práctica recomendada para la instalación en el interior de la estructura de los edificios de sistemas de canalización a presión de agua caliente y fría destinada al consumo humano.

8. Controles específicos de la calidad del agua en plantas en producción

Para controlar el funcionamiento de la planta desaladora se miden una serie de parámetros físico-químicos de acuerdo con unos programas pre-establecidos que abarcan todas las etapas del proceso de desalación. Aunque el control de calidad del agua final es también una parte del proceso, facilita mucho la comprensión dividir los parámetros a medir en dos grandes grupos:

- **Parámetros de control del proceso.** La medición de estos parámetros tiene por finalidad conocer el funcionamiento de las distintas etapas de la instalación. Las frecuencias que se indican son orientativas y dependerán de las instrucciones de cada fabricante o instalador y de la calidad del agua bruta o de captación.
- **Parámetros de control de la calidad del agua producida.** La medición de estos parámetros tiene por objeto conocer la calidad del agua final que se obtiene en la instalación. En este grupo se deberá tener en cuenta la vigente legislación sobre aguas de consumo humano, tanto en lo relativo a parámetros analíticos como a frecuencias.

Al objeto de que este capítulo resulte lo más práctico posible, los parámetros de control se agrupan en tablas en las que también se indica la frecuencia de las determinaciones. Los controles analíticos se han dividido en tres grupos:

- Controles automáticos medidos en continuo.
- Controles llevados a cabo «in situ» o sobre el terreno, por el propio personal de la planta.
- Controles llevados a cabo en un laboratorio.

8.1. Control del proceso

8.1.1. Agua bruta de captación

Se presentan los análisis que, en principio, forman parte de la rutina. Antes del diseño y construcción de la planta debe estudiarse a fondo las características del agua bruta que se captará y aportará a la instalación, de forma que el pretratamiento y el seguimiento analítico definitivo se diseñe con arreglo a esa información previa.

El punto de muestreo y de conexión de la instrumentación de control en continuo será la captación de agua y/o la impulsión de las bombas de agua bruta antes de la entrada a planta.

Tabla 11

Parámetro	Control en continuo		Control <i>in situ</i>		Control en laboratorio		Notas/Observaciones
	Método	Frecuencia control	Método	Frecuencia control	Método	Frecuencia control	
Conductividad	Conductivímetro	Lectura continua	Conductivímetro portátil	1 vez/ día	Conductivímetro certificado de laboratorio	En continuo + comprobación 1 vez/ mes	La frecuencia de control se ajustará en función del tipo de agua bruta.
pH	pH-metro	Lectura continua	pH-metro portátil	1 vez/ día	pH-metro certificado de laboratorio	En continuo + comprobación 1 vez/ mes	

.../...

.../...

Parámetro	Control en continuo		Control <i>in situ</i>		Control en laboratorio		Notas/Observaciones
	Método	Frecuencia control	Método	Frecuencia control	Método	Frecuencia control	
Temperatura	Sonda de temperatura	Lectura continua	Sonda de temperatura asociada a pH-metro portátil	1 vez/ día	Sonda de temperatura asociada a pH-metro de laboratorio	En continuo + comprobación 1 vez/ mes	
Turbidez	Turbidímetro	En continuo	Turbidímetro portátil	1 vez/ día	Turbidímetro certificado de laboratorio	1 vez/ día	Con una sensibilidad inferior a 1 UNF
Amonio	NP	NP	NP	NP	Determinación analítica	1 vez/ mes	
Boro	NP	NP	NP	NP	Determinación analítica	1 vez/ mes	
Fosfatos/ Ortofosfatos	NP	NP	NP	NP	Determinación analítica	1 vez/ mes	
Oxidabilidad	NP	NP	NP	NP	Determinación analítica	En función del tipo de pretratamiento	
Bacterias Coliformes	NP	NP	NP	NP	Muestreo	1 vez/mes o cuando se cambie el origen del agua	Indicador de calidad biológica del agua bruta. Se recomienda emplear un volumen de muestra entre 100 mL – 1000 mL

.../...

.../...

Parámetro	Control en continuo		Control <i>in situ</i>		Control en laboratorio		Notas/Observaciones
	Método	Frecuencia control	Método	Frecuencia control	Método	Frecuencia control	
Recuento de colonias aerobias a 22°C	NP	NP	NP	NP	Muestreo	1 vez/mes o cuando se cambie el origen del agua.	Indicador de calidad biológica del agua bruta. Se recomienda emplear un volumen de muestra entre 100 mL – 1000 mL
Aniones y cationes mayoritarios, minoritarios y traza en función del análisis inicial.	NP	NP	NP	NP	Determinación analítica	Cambios significativos de conductividad, cambios operacionales, cambios de pretratamiento y 1 vez/año	
Sílice	NP	NP	NP	NP	Determinación analítica	En función de la problemática local.	
SDI₁₅	NP	NP	Equipo de SDI	1 vez/día mínimo	NP	NP	Existen otras medidas análogas como equipos de recuento de partículas, u otros índices de atascamiento.
Notas: (1) NP: No procede.							

8.1.2. Agua pretratada. Acondicionamiento químico previo entrada a membranas

El punto de muestreo y de conexión de la instrumentación de control en continuo será a lo largo del circuito y tras la dosificación de reactivos, siendo el punto más adecuado tras la microfiltración.

Tabla 12

Parámetro	Control en continuo		Control <i>in situ</i>		Control en laboratorio		Notas/Observaciones
	Método	Frecuencia control	Método	Frecuencia control	Método	Frecuencia control	
Cloro libre	Sonda de cloro	Lectura continua	Determinación analítica por colorimetría	1 vez/ turno de operador	Determinación analítica	1 vez/ día	En caso de membranas sensibles a la presencia de cloro.
Turbidez	Turbidímetro	En continuo	Turbidímetro portátil	1 vez/ día	Turbidímetro certificado de laboratorio	1 vez/ día	La frecuencia de control se ajustará en función del tipo de agua y el tipo de pretratamiento existente.
Aluminio	NP	NP	NP	NP	Determinación analítica	1 vez/ semana	Sólo en casos específicos en los que haya presencia de aluminio en el agua bruta o se empleen sus sales como agente coagulante.

.../...

.../...

Parámetro	Control en continuo		Control <i>in situ</i>		Control en laboratorio		Notas/Observaciones
	Método	Frecuencia control	Método	Frecuencia control	Método	Frecuencia control	
Bacterias coliformes	NP	NP	NP	NP	Muestreo	1 vez/ semana	Indicador de calidad biológica del agua pretratada. La frecuencia de control se ajustará en función del tipo de agua y el tipo de pretratamiento existente. Se recomienda emplear un volumen de muestra entre 100 mL – 1000 mL. Es recomendable realizar esta misma medida en el agua de rechazo.
Conductividad	Conductivímetro	Lectura continua	Conductivímetro portátil	1 vez/ día	Conductivímetro certificado de laboratorio	1 vez/ semana	
Hierro	NP	NP	NP	NP	Determinación analítica	1 vez/ semana	Sólo en casos específicos en los que haya presencia de hierro en el agua bruta o se empleen sus sales como agente coagulante.

.../...

.../...

Parámetro	Control en continuo		Control <i>in situ</i>		Control en laboratorio		Notas/Observaciones
	Método	Frecuencia control	Método	Frecuencia control	Método	Frecuencia control	
Metabisulfito sódico	NP	NP	NP	NP	Determinación analítica	1 vez/ semana	El punto de muestreo será en la corriente de rechazo de la ósmosis.
pH	pH-metro	Lectura continua	pH-metro portátil	1 vez/ día	pH-metro certificado de laboratorio	1 vez/ semana	
Recuento de colonias a 22°C	NP	NP	NP	NP	Muestreo	1 vez/ semana	Indicador de calidad biológica del agua pretratada. La frecuencia de control se ajustará en función del tipo de agua y el tipo de pretratamiento existente. Se recomienda emplear un volumen de muestra entre 100 mL – 1000 mL. Es recomendable realizar esta misma medida en el agua de rechazo.
Temperatura	Sonda de temperatura	Lectura continua	Sonda de temperatura asociada a pH-metro portátil	1 vez/ día	Sonda de temperatura asociada a pH-metro de laboratorio	1 vez/ semana	

.../...

.../...

Parámetro	Control en continuo		Control <i>in situ</i>		Control en laboratorio		Notas/Observaciones
	Método	Frecuencia control	Método	Frecuencia control	Método	Frecuencia control	
Antiincrustante	NP	NP	Por dosificación	1 vez/día	NP	NP	Existe posibilidad de control analítico.
Potencial RedOX	Sonda de ORP	Lectura continua	NP	NP	Redoxímetro certificado de laboratorio	1 vez/mes	En caso de membranas sensibles a la presencia de cloro.
SDI₁₅	NP	NP	Equipo de SDI	1 vez/día mínimo	NP	NP	Existen otras medidas análogas como equipos de recuento de partículas, u otros índices de atascamiento.
Notas: (1) NP: No procede / No posible							

8.1.3. Control de bastidores de membranas

Tabla 13							
Parámetro	Control en continuo		Control <i>in situ</i>		Control en laboratorio		Notas/Observaciones
	Método	Frecuencia control	Método	Frecuencia control	Método	Frecuencia control	
Conductividad agua de alimentación a membranas	Conductímetro	Lectura continua	Conductímetro portátil	2 veces por semana y bastidor	NP	NP	El control de funcionamiento de las cajas de presión de los bastidores, debe ser realizado por los operadores de planta mediante muestreo individual del agua de entrada a los bastidores, del rechazo de bastidores y de la calidad del agua osmotizada en cada caja de presión del bastidor (se deben medir todas y cada una de ellas), cuando se detectan anomalías debidas a un incremento de la conductividad. En el caso de la ED se actuará de forma semejante.
Conductividad agua osmotizada a la salida de bastidor	Conductímetro	Lectura continua	Conductímetro portátil	2 veces por semana y bastidor	NP	NP	
Conductividad agua de salida de rechazo de bastidor	Conductímetro	Lectura continua	Conductímetro portátil	2 veces por semana y bastidor	NP	NP	

8.1.4. Control del lavado químico de bastidores

Se indican a continuación los controles que deben realizarse en el agua de lavado, en cada una de las diferentes fases del procedimiento. Resulta fundamental el control sobre la preparación de las soluciones de cada reactivo de lavado, de tal modo que se asegure que las concentraciones finales del reactivo utilizado sean conformes con la especificación correspondiente. Los puntos de muestreo en la línea de limpieza son generalmente tres: tanque de preparación de la solución de limpieza, salida del filtro de limpieza o afino (antes de entrada a las membranas) y retorno al tanque. Véase también el capítulo 6.

Fase de lavado	Parámetro	Control en continuo		Control in situ o en laboratorio		Notas/Observaciones
		Método	Frecuencia control	Método	Frecuencia control	
Preparación de la solución de lavado, tras la dilución de reactivos	Conductividad	Conductivímetro	Lectura continua	Conductivímetro portátil	1 vez /fase de lavado.	Previamente a la entrada de solución de limpieza a los bastidores de ósmosis.
	pH	PH-metro	Lectura continua	PH-metro portátil	1 vez /fase de lavado.	Previamente a la entrada de solución de limpieza a los bastidores de ósmosis. Respetar los valores límite de alto y bajo pH, según especificaciones del fabricante de la membrana.
	Temperatura	Sonda de temperatura	Lectura continua	Sonda de temperatura asociada a pH-metro portátil	1 vez /fase de lavado.	Previamente a la entrada de solución de limpieza a los bastidores de ósmosis. Respetar los valores recomendados por el fabricante de la membrana.

.../...

.../...

Fase de lavado	Parámetro	Control en continuo		Control in situ o en laboratorio		Notas/Observaciones
		Método	Frecuencia control	Método	Frecuencia control	
En fase de lavado y contacto con membranas	Conductividad	Conductivímetro	Lectura continua	Conductivímetro portátil	1 vez/ cada hora	La medida de conductividad en el permeado permite verificar fugas o contaminación del agua osmotizada por paso de la solución de lavado a la red de agua producto.
	pH	PH-metro	Lectura continua	PH-metro portátil	1 vez/ cada hora	Respetar los valores límite de alto y bajo PH, según especificaciones del fabricante.
	Temperatura	Sonda de temperatura	Lectura continua	Sonda de temperatura asociada pH-metro portátil	1 vez/ cada hora	Respetar el valor límite de temperatura establecido por el fabricante de la membrana.
Durante y/o al finalizar el lavado	Turbidez	NP	NP	Determinación analítica de laboratorio	1 ó 2 muestras	Control visual.
	Hierro	NP	NP	Determinación analítica de laboratorio	1 ó 2 muestras	Permite determinar el tipo de ensuciamiento de las membranas.
	Calcio	NP	NP	Determinación analítica de laboratorio	1 ó 2 muestras	Permite determinar el tipo de ensuciamiento de las membranas.
	Materia orgánica (oxidabilidad)	NP	NP	Determinación analítica de laboratorio	1 ó 2 muestras	Permite determinar el tipo de ensuciamiento de las membranas.

.../...

.../...

Fase de lavado	Parámetro	Control en continuo		Control in situ o en laboratorio		Notas/Observaciones
		Método	Frecuencia control	Método	Frecuencia control	
Desplazamiento y lavado con agua osmotizada o con agua pretratada.	Conductividad	Conductivímetro	Lectura continua	Conductivímetro portátil	Hasta conseguir valor similar al agua osmotizada o pretratada.	
	pH	PH-metro	Lectura continua	PH-metro portátil		Hasta conseguir valor similar al del agua osmotizada o pretratada antes de hacer el lavado químico.
En fase de preservación de membranas tras lavado químico	Depende del reactivo empleado	NP	NP	Depende del reactivo empleado	1 muestra	Véase procedimiento de conservación de las membranas en paradas (6.3.4)

Notas: (1) NP: No procede.

8.2. Controles específicos de la calidad del agua producto

8.2.1. Controles antes del postratamiento

Tabla 15							
Parámetro	Control en continuo		Control <i>in situ</i>		Control en laboratorio		Notas/Observaciones
	Método	Frecuencia control	Método	Frecuencia control	Método	Frecuencia control	
Alcalinidad	NP	NP	NP	NP	Valoración analítica	1 vez/ día	
Conductividad	Conductímetro	En continuo	Conductímetro portátil	1 vez/ turno	Conductímetro calibrado o certificado	1 vez/ día	Punto de muestreo: salida agua osmotizada.
pH	pH-metro	En continuo	pH-metro portátil	1 vez/ turno	PH-metro calibrado o certificado	1 vez/ día	Sonda instalada en salida de agua osmotizada.
Temperatura	Sonda de temperatura	En continuo	Sonda de temperatura asociada pH-metro portátil	1 vez/ turno	Sonda de temperatura asociada pHmetro	1 vez/ día	Punto de muestreo: salida agua osmotizada.
Boro	NP	NP	NP	NP	Determinación analítica	1 vez/ mes	La frecuencia de control será según el RD 140/2003 o equivalente.

.../...

.../...

Parámetro	Control en continuo		Control <i>in situ</i>		Control en laboratorio		Notas/Observaciones
	Método	Frecuencia control	Método	Frecuencia control	Método	Frecuencia control	
Bacterias coliformes	NP	NP	NP	NP	Determinación analítica	1vez/ mes	Toma de muestra a la salida de depósito de agua producto.
Recuento de colonias aerobias a 22°C	NP	NP	NP	NP	Determinación analítica	1vez/ mes	Toma de muestra a la salida de depósito de agua producto.

Notas: (1) NP: No procede / No posible

8.2.2. Controles después del postratamiento

Se entiende por postratamiento la adición química de reactivos para la remineralización, neutralización y/o corrección de pH y la desinfección final. El agua postratada no podrá ser agresiva ni incrustante. El resultado de calcular el Índice de Langelier debería estar comprendido entre +/- 0,5. En ocasiones, puede ser necesaria la realización de otros tratamientos específicos, como la eliminación del boro. En el capítulo 5 se trataron diversas técnicas de postratamiento.

Como se viene señalando, el agua destinada a consumo humano, deberá cumplir todos los niveles, parámetros y frecuencias establecidas en la legislación vigente de aguas de consumo humano.

Tabla 16							
Parámetro	Control en continuo		Control <i>in situ</i>		Control en laboratorio		Notas/Observaciones
	Método	Frecuencia control	Método	Frecuencia control	Método	Frecuencia control	
Alcalinidad	NP	NP	NP	NP	Valoración analítica	1 vez/ día	
Bacterias coliformes	NP	NP	NP	NP	Determinación analítica	1 vez/ día	Toma de muestra a la salida de depósito de agua producto.
Calcio	NP	NP	NP	NP	Valoración analítica	1 vez/ día	

.../...

.../...

Parámetro	Control en continuo		Control <i>in situ</i>		Control en laboratorio		Notas/Observaciones
	Método	Frecuencia control	Método	Frecuencia control	Método	Frecuencia control	
Cloro libre	Analizador de cloro	En continuo	Equipos de medición de cloro por colorimetría	1 vez/ turno	Analizador de cloro, método normalizado	1 vez/ día	
Colonias de bacterias aerobias a 22°C	NP	NP	NP	NP	Determinación analítica	1vez/ día	Toma de muestra a la salida de depósito de agua producto.
Conductividad	Conductímetro	En continuo	Conductímetro portátil	1 vez/ turno	Conductímetro calibrado o certificado	1 vez/ día	Sonda instalada a la salida de depósito de agua producto.
Determinación del índice de Langelier	NP	NP	NP	NP	Estimación	1 vez/ día	
PH	PH-metro	En continuo	Ph-metro portátil	1 vez/ turno	PH-metro calibrado o certificado	1 vez/ día	Sonda instalada en salida de agua postratada, tras adición de Cal y/o CO2.
Temperatura	Sonda de temperatura	En continuo	Sonda de temperatura asociada pH-metro portátil	1 vez/ turno	Sonda de temperatura asociada pHmetro	1 vez/ día	

.../...

.../...

Parámetro	Control en continuo		Control <i>in situ</i>		Control en laboratorio		Notas/Observaciones
	Método	Frecuencia control	Método	Frecuencia control	Método	Frecuencia control	
Turbidez	Turbidímetro	En continuo	Turbidímetro portátil	1 vez/ turno	Turbidímetro calibrado o certificado	1 vez/ día	Parámetro sometido a seguimiento si la remineralización se realiza mediante la adición de cal.
Boro	NP	NP	NP	NP	Valoración analítica	1 vez / mes	Cuando exista un postratamiento específico para su reducción.

9. Casos particulares: industria alimentaria y equipos domésticos

9.1. Industria alimentaria y afines

9.1.1. Aplicación

La desalación del agua viene realizándose en la **industria alimentaria** de forma regular desde hace más de 30 años.

Debe destacarse dentro del **sector alimentario** la gran importancia que tienen las industrias de elaboración de bebidas en general, refrescantes, cerveceras, zumos, y todas aquellas en las que el agua es componente principal. En este tipo de industrias, las normativas de calidad han hecho progresar los tratamientos de desalación, al producir agua con una calidad óptima para los procesos donde es necesaria su aplicación.

La nanofiltración y la osmosis inversa, imponen por si mismos una mejora sustancial bajo el punto de vista de disminución de cargas contaminantes de los vertidos y en general, mejoran cualquier otro sistema de tratamiento al cumplir mejor los criterios de sostenibilidad, obligados hoy en nuestra sociedad en general, y en el desarrollo industrial en particular.

No debe olvidarse que además de la industria alimentaria citada anteriormente, es importante reseñar que innumerables **complejos hoteleros** aplican la desalación de agua de mar o salobre, utilizando recursos propios para producir el agua que posteriormente se utilizara en consumo humano, así como en diversos servicios.

El arco que determina el límite de aplicación y el tipo de membrana que debe emplearse, viene dado por dos factores principales; el primero, el tipo de contaminante o componente que debe ser eliminado, y segundo, la especificación propia de calidad del agua tratada, que deberá cumplir con lo legislado en materia de agua de consumo humano (actualmente el RD 140/2003) en relación con estos tipos de industria.

Dependiendo del origen del agua consumida, que puede provenir de la red de suministro público o de recursos propios, generalmente tomas de pozo, se establecerá el tipo de tratamiento adecuado que **contará siempre con un control de calidad prácticamente continuo de los factores básicos, y con un programa de control y prevención de los riesgos propios del sistema.**

Cuando debe eliminarse únicamente la dureza, parcialmente la salinidad y los compuestos orgánicos, como por ejemplo los polisacáridos, la aplicación del sistema de nanofiltración puede ser suficiente.

Cuando el agua es muy salina con elevado contenido de iones monovalentes y nitrato en particular, se emplean membranas de osmosis inversa para obtener un mayor grado de desalación.

Por lo demás, **las instalaciones de desalación en la industria alimentaria, hostelería y afines, deben cumplir esencialmente todo lo previsto con referencia a los sistemas de pretratamiento, postratamiento, mantenimiento, limpieza, conservación y control que se apliquen a un sistema de desalación para el agua de consumo humano.**

Deberá detectarse y registrarse cualquier situación anómala, iniciando inmediatamente las actuaciones correctoras que eviten el uso de agua en condiciones no aptas para el consumo humano.

Todo ello es responsabilidad del industrial, que deberá informar de las posibles incidencias y las medidas correctoras aplicadas a las autoridades competentes según lo previsto en la legislación vigente de agua de consumo.

Como se ha indicado en el capítulo 7, toda la información sobre sustancias químicas y productos de construcción empleados en las plantas de desalación en la industria alimentaria, deben ser entregados al gestor de la instalación siguiendo las pautas de esta guía, quien elaborará un informe para que esté a disposición de las Autoridades Sanitarias ante cualquier eventual inspección.

Se recuerda así mismo, que el empleo del Sistema de Información Nacional de Agua de Consumo¹ es perceptivo para este tipo de plantas.

9.1.2. Funcionamiento

Las instalaciones de desalación industrial suelen alimentarse con aguas salobres normalmente entre 1500 y 4000 mg/L de sales disueltas y temperaturas entre 10 y 25 °C.

Cuando la alimentación se produce con agua de la red pública, la salinidad estimada en términos de conductividad, normalmente está comprendida entre 200 y 2000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ y temperaturas de 6 a 20 °C.

Dependiendo del volumen de agua que deba ser producido, la recuperación de agua aplicando un sistema de nanofiltración suele situarse entre el 55% y el 80% con un rechazo salino del 50% al 70% y un 90-98% con la osmosis inversa.

Naturalmente estos datos son variables y dependen de la composición iónica del agua de aportación.

¹ SINAC. <http://sinac.msp.es>

La presión de trabajo puede oscilar entre 5 y 25 Kg/cm² y también dependerá de la salinidad, temperatura y condiciones de trabajo de la instalación diseñada.

Habitualmente, el agua tratada es sometida a un proceso de postratamiento que asegura el mantenimiento de su calidad microbiológica hasta el punto de uso y en un proceso de fabricación.

Normalmente se emplean membranas de poliamida aromática enrolladas en espiral, aunque en algunos casos se emplean membranas de triacetato de celulosa, u otras que deberán estar convenientemente homologadas. No se entra aquí en su descripción que ya ha sido tratado extensamente en el capítulo 4.

El agua que alimenta a membranas debe pretratarse para evitar ensuciamientos físicos, químicos y biológicos con colmataciones de la membrana que obliguen a lavarlas químicamente con excesiva frecuencia. Un buen pretratamiento alarga la vida de la membrana y mejora su forma de trabajo.

Hoy en día, es frecuente incorporar sistemas de micro y/o ultrafiltración antes de enviar el agua a desalación.

En función de las necesidades del sistema puede disponerse de un depósito de reserva de agua desalada o permeada, en el que se encuentra instalado un sistema de desinfección y se aplica un tratamiento complementario de seguridad, respecto a la calidad final del agua de uso.

Es necesario que la instalación pueda desinfectarse y lavar químicamente cuando en función del resultado de operación o el programa de control adoptado se estime conveniente. Para ello, se dispondrá de la instalación necesaria, y se ejecutará el proceso **sin que se pueda producir paso de ninguna sustancia al depósito de agua de reserva y/o consumo.**

Al hacer estas operaciones, la unidad afectada deberá estar necesariamente fuera de servicio. (Véase el capítulo 6).

No se podrá mantener la instalación en servicio normal hasta haber comprobado la calidad del agua tratada después de cualquier tratamiento de limpieza química y/o desinfección, tal y como se detalla en el apartado 8.1.4.

Debe tenerse cuidado en utilizar materiales de construcción que no sufran corrosión y aporten al agua tratada iones metálicos en solución. También se utilizarán materiales poliméricos que no liberen sustancias químicas que puedan generar problemas de migración o presencia de monómeros residuales en el agua tratada.

Normalmente la industria alimentaria emplea acero inoxidable, polipropileno y otros materiales que necesariamente cumplen lo indicado en el párrafo anterior.

9.1.3. Consideración de los factores sanitarios

Los factores sanitarios que deben considerarse afectarán a la calidad y estabilidad de todo el material empleado en la construcción de la instalación de desalación.

Básicamente se requerirán certificaciones de calidad, origen y normalización de:

- Membranas y módulos.
- Tubos de presión y componentes.
- Sustancias consumidas en el proceso de funcionamiento normal, incluidos los del pretratamiento.
- Sustancias consumidas en el lavado químico y/o desinfección y conservación.
- Sustancias consumidas en el postratamiento.
- Material de construcción y protección interna de recipientes a presión y depósitos.
- Materiales y medios filtrantes.
- Instalaciones y medios empleados en el postratamiento.
- Registro sanitario de la empresa fabricante y responsable de la instalación y componentes.

Otras recomendaciones sanitarias pueden consultarse en el capítulo 10.

9.1.4. Mantenimiento

La industria alimentaria que utilice un sistema de desalación, está obligada a disponer de un **libro de registro** o **archivo de datos funcionales, incidencias, actuaciones y medidas de corrección introducidas en el normal funcionamiento de las instalaciones.**

Normalmente debe exigirse al instalador un programa básico de mantenimiento del conjunto de materiales y equipo suministrado con un programa de control.

La industria alimentaria normalmente dispone de personal propio que controla la calidad del producto y el agua de consumo, disponiendo de los medios que hacen imprevisible cualquier riesgo sanitario, cumpliendo las especificaciones de uso que se facilitan por el suministrador en cualquier caso.

Si se diera el caso de subcontratación del sistema de producción, del control de calidad de la instalación o del agua producida por una entidad externa competente con arreglo a lo previsto en el RD 140/2003, se recuerda en cualquier caso que la responsabilidad última será del gestor de la industria alimentaria contratante de los servicios.

Es frecuente que se lleven a cabo auditorias funcionales y de calidad semestral o anualmente, siendo altamente recomendable su realización por la empresa instaladora o equivalente debidamente cualificada para ello.

9.1.5. Criterios habituales de calidad

Cada usuario, en función del uso del agua dentro del proceso, se ajustará como mínimo a las normativas de la legislación vigente.

En particular, y como ejemplo de gran relevancia en España, las industrias productoras de bebidas refrescantes, carbonatadas y no carbonatadas (zumos) y las cerveceras, además de cumplir con la legislación, mantienen criterios más estrictos en parámetros como la turbidez que se mantiene entre 0,1 y 0,5 UNF y los THM entre 25 y 50 µg/L como máximo.

Por otra parte, existen otros valores de referencia para este sector, como las sales disueltas totales, que se suele situar entre 200 y 500 mg/L, y la alcalinidad total expresada como carbonato cálcico, entre 10 y 85 mg/L.

Para el resto de los parámetros, cada fabricante debe ajustar los niveles de calidad mínima a los requerimientos de la Autoridad Sanitaria. En los casos en que esta legislación no exista, se toman como norma habitualmente los valores más rigurosos dentro de las directrices de la Organización Mundial de la Salud² (OMS).

Los sistemas de tratamiento del agua propios de estas industrias, cumplirán asimismo las normativas de diseño, construcción y aplicación de sustancias permitidas y materiales adecuados.

El amplio sector alimentario, incluye industrias con gran consumo de agua como las embotelladoras de bebidas refrescantes antes citadas, la cervecera, las productoras de zumos, las de licores y destilerías, productos lácteos, panificadoras, productos cárnicos, envasados vegetales, agua potable preparada, etc. En todas ellas la calidad del agua utilizada y su control son aspectos prioritarios en la práctica industrial.

9.2. Equipos domésticos

9.2.1. Aplicación

Las aguas de consumo humano suministradas a través de redes de distribución públicas cumplen obligatoriamente con lo establecido en la legislación

² 2004. Guías para la calidad del agua potable, tercera edición. Organización Mundial de la Salud. En línea [http://www.who.int/water_sanitation_health/dwq/guidelines/es/]

vigente de agua de consumo, actualmente el RD 140/2003, de 7 de febrero, por el que se establecen los criterios de la calidad del agua de consumo humano y, bajo ningún concepto, el usuario necesitará finalizar el tratamiento de potabilización en su propia casa. No obstante a lo anterior, existen usuarios que deciden instalar algún sistema domestico de osmosis inversa, por alguno de los motivos siguientes:

- Usuarios que por alguna razón no están conectados a la red pública de distribución y deben autoabastecerse a partir de alguna captación particular de agua. En parte, la situación de estos usuarios sería equiparable a la de las industrias alimentarias y hosteleras al que se ha referido el punto anterior.
- Usuarios de zonas de aguas duras o de relativamente alta mineralización que, aún estando conectados a la red pública, deciden instalarse algún equipo doméstico para conseguir una mejora adicional de la calidad del agua de bebida.

Estos equipos normalmente están aislados del circuito hidráulico principal de la vivienda y proporcionan agua a través de un grifo auxiliar.

Su producción es variable y se sitúa normalmente alrededor de 50 – 250 litros al día, por lo cual disponen de un depósito de acumulación, (normalmente presurizado) para satisfacer los consumos punta; no obstante, existen unidades dotadas de bombas de presión que proporcionan caudal mayores, por ejemplo, 1.000 litros al día, y que no requieren acumulación.

Su comercialización se produce de múltiples formas, en comercios, puerta a puerta, e incluso por Internet, utilizándose en ocasiones prácticas de publicidad engañosa y poco ética que hacen dudar a los consumidores de la calidad del agua potable suministrada. Entre estos métodos cabe destacar por su impacto y por su grado de utilización el precipitador eléctrico o hidroprecipitador.

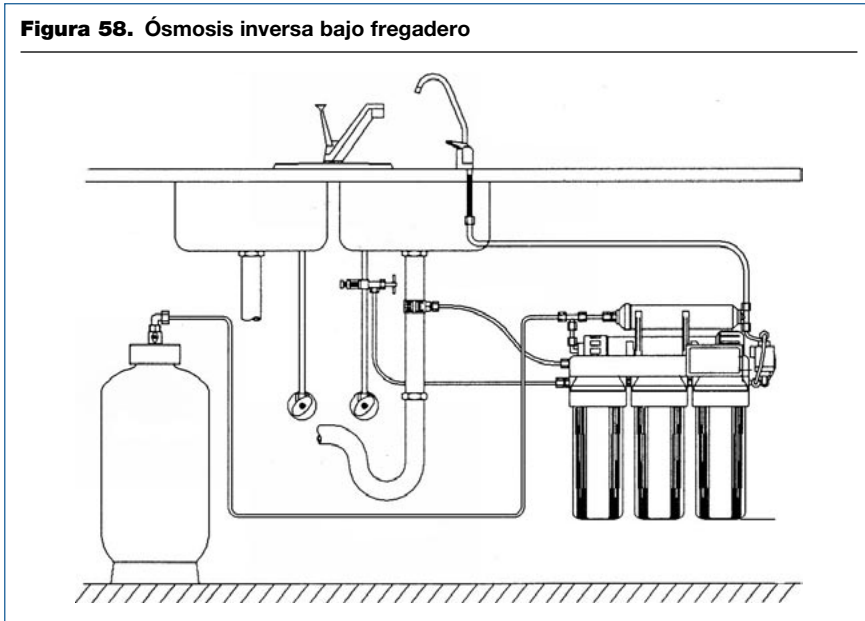
En cuanto a los **riesgos** que pueden comportar el uso de estos dispositivos, hay que señalar que **si no se eligen adecuadamente, no se controlan regularmente y no se hace el mantenimiento adecuado, podrían aparecer riesgos para la salud** (crecimientos bacterianos, desmineralización excesiva, concentraciones elevadas de sodio en el caso de intercambio iónico, contaminación por manipulación incorrecta, etc.) y su gravedad dependerá de la actuación inadecuada que se haya hecho de ellos.

En cualquier caso el fabricante del equipo debe garantizar la salubridad del agua producida siempre que el usuario realice el mantenimiento requerido y la sustitución de los elementos consumibles con la frecuencia indicada.

9.2.2. Funcionamiento

Los equipos de ósmosis inversa domésticos se suministran generalmente como un equipo compacto para situar debajo del fregadero (Fig. 58).

Figura 58. Ósmosis inversa bajo fregadero



Se conectan a la red hidráulica mediante un acoplamiento que se intercala en la tubería de agua fría y que generalmente se suministra incluido en el equipo.

Generalmente se diseñan para una conversión (rendimiento) alrededor del 15 – 20 %, es decir, por cada 15 ó 20 litros de agua osmotizada producida, rechazan al desagüe 80 – 85 litros de agua respectivamente. En una vivienda, el consumo de agua osmotizada es normalmente reducido (1-2 litros por persona y día) por lo cual la cantidad real de agua rechazada, no es muy elevada; no obstante, al instalar este tipo de equipos, la proporción de rechazo de agua debe ser siempre considerada.

Con esta baja conversión, la concentración de sales que se produce en la membrana es muy reducida (las sales se concentran aproximadamente un 18 – 25 %); este hecho influye principalmente en dos factores:

- La presión necesaria para que el agua atravesase las membranas es relativamente baja.
- Generalmente no se necesita un importante pretratamiento para evitar incrustaciones en las membranas.

Al precisar una baja presión de trabajo, estos equipos generalmente utilizan la propia presión de la red, si bien en algunos casos disponen de una bomba adicional de elevación de presión para aumentar el caudal de agua suministrada.

Al igual que ocurre con la conexión para el aporte de agua, generalmente se incluye en el suministro un accesorio para poder conectar el agua de rechazo a la tubería de desagüe.

El suministro de agua osmotizada a consumo normalmente se realiza a través de un grifo independiente incluido en el equipo.

9.2.3. Pretratamiento

Con los equipos de tipo industrial que trabajan con una conversión elevada (50 % o superior), se requiere normalmente un pretratamiento completo en función de las características del agua, para evitar incrustaciones en las membranas. Este pretratamiento debe contemplar los mismos conceptos que en los grandes equipos de ósmosis inversa, aunque a escala más reducida. Generalmente incluye una filtración, una eliminación de cloro residual (si se utilizan membranas de poliamida) y un tratamiento para evitar incrustaciones en las membranas.

Cuando se trabaja con una baja conversión, como es habitual en equipos domésticos, el pretratamiento es mucho más simple, no incluye la prevención de incrustaciones calcáreas, y se limita en la mayoría de los equipos a los siguientes conceptos:

a) Filtración de partículas en suspensión

Se utilizan normalmente elementos filtrantes de 5 μm que pueden estar dispuestos en un contenedor, o pueden ser simplemente un elemento intercambiable con una conexión de entrada y salida.

b) Decloración

La eliminación de cloro residual se realiza generalmente con carbón activo granular o compacto. Al igual que ocurre con el sistema de filtración puede estar situado en un contenedor, o pueden ser simplemente un elemento intercambiable con una conexión de entrada y salida.

En general el pretratamiento se realiza conexionando dos o más elementos intercambiables a criterio del fabricante. Existe en el mercado una amplia variedad de elementos; algunos combinan diversos tratamientos como filtración de 5 μm y decloración y otros incluyen resinas de intercambio iónico, polifosfatos, masas activas, etc. (Figura 59).

Figura 59. Elementos del pretratamiento



9.2.4. Membrana de ósmosis inversa

Normalmente se utilizan membranas de arrollamiento en espiral de poliamida que proporcionan una buena producción, pero que requieren un agua exenta de cloro para su correcto funcionamiento.

También existen en el mercado membranas de acetato de celulosa resistentes a la acción del cloro y que por este motivo no precisan su eliminación previa (ver apartado de pretratamientos).

La membrana se suministra normalmente conjuntamente con un contenedor que dispone de una entrada para el agua de aportación y de dos salidas, una para el permeado y otra para el rechazo.

La salida del permeado generalmente incluye una válvula de retención y la del rechazo un regulador de flujo si bien estos accesorios pueden estar separados y ser independientes del contenedor.

9.2.5. Acumulación

Existen equipos dotados de una o varias membranas de gran capacidad, que incluyen una bomba de presión y que suministran un caudal de agua instantáneo suficiente para cubrir el consumo sin acumulación; no obstante en la mayoría de los casos, el caudal de agua osmotizada que se suministra es muy reducido por lo cual se debe acumular en un depósito para proporcionar caudales punta significativos.

Los depósitos de acumulación pueden ser abiertos, pero lo más habitual es que sean depósitos cerrados presurizados. El agua osmotizada se acumula lentamente y se presuriza para poder suministrar, cuando se requiera, un caudal de agua tratada suficiente. Un dispositivo de seguridad cierra el aporte de agua al equipo cuando el depósito presurizado alcanza una determinada presión.

Existen depósitos de diversas capacidades, sin embargo, los volúmenes más utilizados son alrededor de 8 – 14 litros (Fig. 60).

Figura 60. Depósitos presurizados



9.2.6. Postratamiento

En los equipos domésticos sin depósito de acumulación normalmente no existe ningún postratamiento; el agua va directa a consumo.

En equipo con depósito abierto se pueden instalar sistemas de dosificación de hipoclorito sódico, aunque no es frecuente.

En equipos con depósito presurizado, es frecuente instalar un filtro desodorizador a la salida. Este filtro, normalmente contiene una masa de carbón activo para adsorber sabores procedentes de la goma del depósito. El contenedor tiene las mismas características que el de los filtros y decoloradores utilizados en el pretratamiento; el carbón activo que se emplea normalmente está lavado con ácido para evitar que contenga resto de óxidos del proceso de activación de carbón que podrían alcalinizar excesivamente el agua osmotizada.

El agua osmotizada es una agua agresiva de muy baja salinidad; en algunos equipos se dispone de una válvula mezcladora que incorpora al agua osmotizada una determinada proporción regulable de agua de aporta-

ción. De esta forma se puede reducir su agresividad y ajustar la salinidad final al valor deseado por el consumidor, siempre y cuando se cumpla lo relativo a lo establecido en la legislación vigente.

Cuando existe depósito de acumulación, como complemento opcional, en algunos casos se incluye un equipo de desinfección del agua osmotizada mediante radiación ultravioleta como último elemento previo al grifo de consumo.

Este sistema de desinfección por UV está permanentemente conectado y se utiliza para evitar la recontaminación del agua osmotizada.

Si el agua tratada por el equipo se mezcla con agua de abastecimiento, el cloro de ésta última contribuiría también a la desinfección del agua final.

9.2.7. Factores sanitarios

En este apartado se desarrollan los aspectos que podrían afectar a la calidad del agua ocasionando problemas organolépticos o sanitarios derivados de un incorrecto mantenimiento.

Como se ha indicado, el agua osmotizada en estos aparatos puede ser agresiva debido a su baja mineralización. Desde el punto de vista de cumplimiento de la normativa, se recomienda realizar una remineralización posterior mediante mezcla con agua de la red pública de distribución. En el caso de instalaciones en viviendas unifamiliares no conectadas a la red, con fuente o pozo propio, será necesario un postratamiento al agua osmotizada.

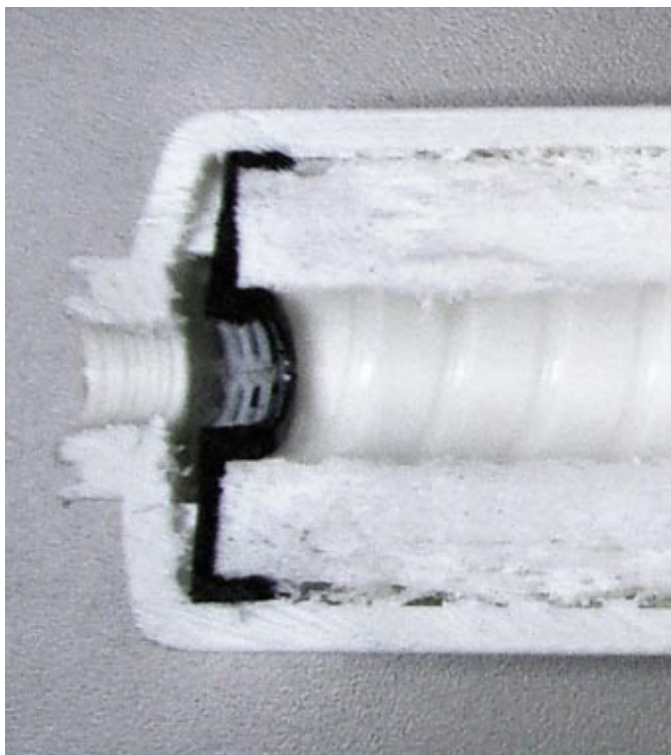
Todas las consideraciones que se describen a continuación deben extremarse en el caso de equipos que únicamente se utilizan en una época del año. Como norma general, deberán sustituirse los cartuchos agotados, realizarse una revisión y limpieza exhaustivas antes de la puesta en funcionamiento.

9.2.7.1. Pretratamiento

En los equipos de elevada conversión, donde se utiliza un pretratamiento completo, los materiales utilizados pueden ser muy diversos y se corresponden generalmente con los empleados en instalaciones de gran consumo.

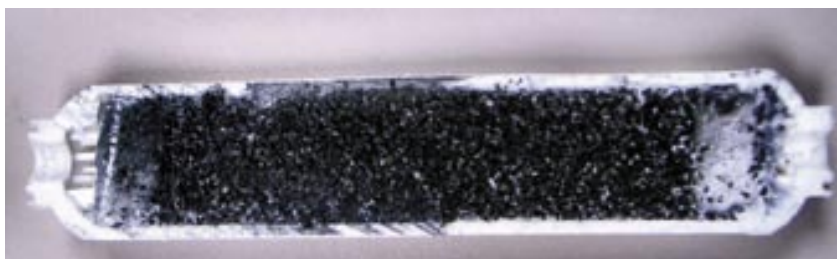
En los equipos compactos, los filtros de partículas también pueden utilizar una amplia gama de materiales, no obstante, en los elementos intercambiables que son los que se utilizan con mayor frecuencia, se trata de materiales poliméricos, acero inoxidable y cerámicos. (Fig 61)

Figura 61. Interior de un filtro de partículas



En los decoloradores, normalmente se utiliza carbón activo granulado. (Fig. 62).

Figura 62. Cartucho decolorador con carbón activo



9.2.7.2. Membrana de ósmosis inversa

La membrana es de poliamida aromática o de triacetato de celulosa normalmente, y se apoya sobre una capa de polisulfona. (Fig. 63).

Figura 63. Interior de una membrana

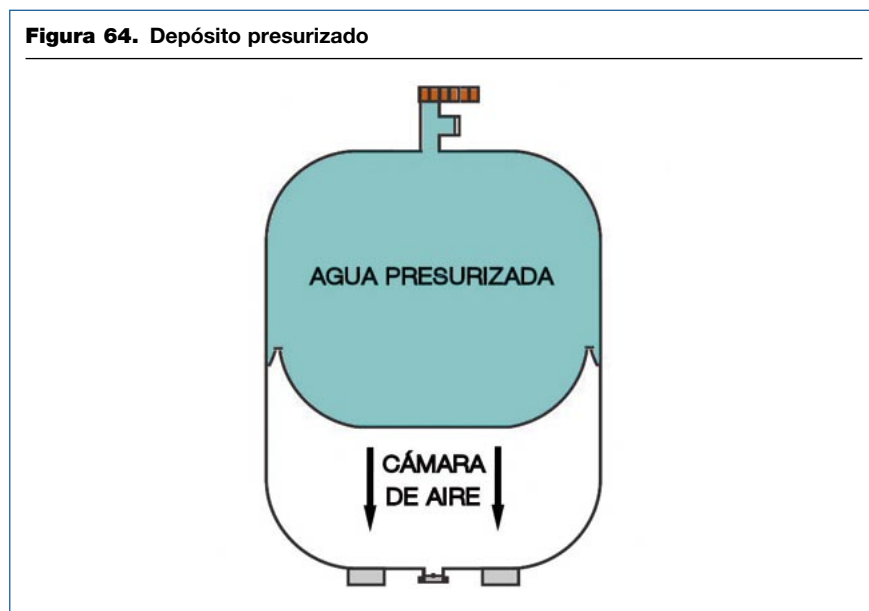


9.2.7.3. Acumulación

Cuando el agua osmotizada se acumula en depósitos abiertos, se deberían seguir los mismos criterios que para el agua de consumo humano y como mínimo realizar una cloración o desinfección de seguridad.

Si el agua osmotizada no se acumula sino que se consume directamente, el riesgo de una recontaminación microbiológica queda minimizado y es prácticamente inexistente.

Los depósitos presurizados están generalmente contruidos en chapa de acero con un recubrimiento alimentario (polipropileno), en material plástico o en acero inoxidable. La membrana que presuriza el agua debe ser adecuada para uso alimentario, por ejemplo, butilo / EPDM (Fig. 64).



Debido a la baja producción de la membrana de ósmosis, es prácticamente imposible dosificar un desinfectante en continuo y en consecuencia el agua se acumula normalmente sin ningún otro tratamiento.

Para garantizar la calidad microbiológica del agua en el interior del depósito, **se deben realizar limpiezas y desinfecciones periódicas** (ver apartado de mantenimiento). En estos casos además no existe ya barrera alguna hasta el consumo, (excepto si existe un sistema de desinfección posterior como se describe en el apartado correspondiente), por lo cual es un punto significativo del circuito que debe ser considerado.

9.2.7.4. Postratamiento

En equipos sin depósito de acumulación, el agua va directamente a consumo y no existe generalmente ningún postratamiento.

Cuando existe un depósito presurizado y un filtro desodorizador con carbón activo posterior, este elemento debe ser tenido en consideración, puesto que el agua osmotizada carece de desinfectante residual y **el carbón activo puede representar un hábitat muy adecuado para el desarrollo de microorganismos** si no se efectúa el mantenimiento y las sustituciones de elementos recomendadas por el fabricante.

Los equipos de radiación ultravioleta que se utilizan en la desinfección del agua osmotizada inmediatamente antes de su consumo, están contruidos generalmente en acero inoxidable.

En relación con su eficacia de desinfección, debe garantizarse que se cumpla con la dosis de radiación ultravioleta según la norma UNE-EN 14897³ (400 J/m²), y disponer de un sensor de radiación para poder verificar que la dosis realmente emitida es la correcta; así como detectar, por ejemplo, un ensuciamiento de la lámpara o que ha llegado al final de su vida útil.

Si se utilizan sistemas de desinfección mediante radiación ultravioleta, **el usuario debe exigir que el fabricante facilite información sobre la dosis de radiación en el agua osmotizada, así como sobre los sistemas de seguridad existentes para garantizar el correcto funcionamiento del equipo.**

Por otra parte, estos equipos están permanentemente conectados, lo que provoca **un calentamiento del agua** contenida en la cámara de irradiación, especialmente por la noche o en horas de consumo reducido o nulo. En estos casos, generalmente se recomienda dejar correr el agua unos segundos antes de su consumo para reducir su temperatura.

9.2.8. Mantenimiento

El grado de conservación del aparato es responsabilidad del usuario, que debe exigir al distribuidor o fabricante las instrucciones comprensibles de uso y mantenimiento.

El mantenimiento es esencial en un equipo de ósmosis inversa doméstico para poder garantizar la calidad del agua de consumo. En particular, se debe tener en cuenta que:

- **Los filtros de partículas y los de carbón activo del pretratamiento deben cambiarse con la periodicidad que especifica el fabricante, (generalmente como máximo cada 6 meses) para poder garantizar el correcto funcionamiento de la planta y especialmente de la membrana.**

³ UNE-EN 14897. Equipo de acondicionamiento del agua en el interior de los edificios. Dispositivos que utilizan radiadores ultravioletas de mercurio de baja presión. Requisitos de funcionamiento, seguridad y ensayo.

- Cuando existe un depósito de acumulación abierto, debe **vaciarse, limpiarse y desinfectarse periódicamente**.
- Cuando existe un depósito presurizado debe **desinfectarse** periódicamente para evitar cualquier riesgo de proliferación microbiológica.
- Cuando existe un sistema de desinfección por radiación ultravioleta, la lámpara debe cambiarse con la periodicidad indicada por el fabricante (generalmente cada año).

9.2.9. Normas UNE-EN

Son de aplicación las siguientes:

- UNE-EN 806-2. Especificaciones para instalaciones en el interior de edificios que transporten agua para consumo humano. Parte 2. Diseño.
- UNE-EN 14652. Equipos de tratamiento de agua en el interior de edificios. Sistemas de separación por membranas. Requisitos de características, seguridad y pruebas.
- UNE-EN 15161. Equipos de tratamiento del agua en el interior de los edificios. Instalación, funcionamiento, mantenimiento y reparación.
- UNE-EN 14897. Equipo de acondicionamiento del agua en el interior de los edificios. Dispositivos que utilizan radiadores ultravioletas de mercurio de baja presión. Requisitos de funcionamiento, seguridad y ensayo.

10. Posibles incidencias en las plantas de desalación

En aquellas ocasiones en que los tratamientos convencionales o clásicos de coagulación, floculación, decantación y filtración resulten insuficientes para convertir el agua bruta en apta para el consumo, las membranas podrían constituir una etapa añadida al pretratamiento convencional. En este sentido, y ante la aparición de incidencias en la planta de tratamiento o en algunas de las etapas del proceso, resulta conveniente la consulta y aplicación, en su caso, de las recomendaciones recogidas en el documento editado por el Ministerio de Sanidad y Política Social y la Asociación Española de Abastecimiento de Agua y Saneamiento, (AEAS), denominado «Recomendaciones de actuación ante incidencias en los abastecimientos de aguas», disponible en la interfaz profesional del Sistema de Información Nacional de Agua de Consumo¹ (SINAC). Por lo tanto, no se reproducirán en este apartado, aquellas incidencias comunes con las instalaciones de tratamiento convencionales, sino que se desarrollarán aquellas específicamente relacionadas con estas tecnologías de membrana.

En los capítulos 3 y 4 se ha tratado sobre las posibilidades de los diferentes tipos de membrana (ultrafiltración, microfiltración y nanofiltración), tanto en lo referente a eliminación de microorganismos como en lo concerniente a sustancias químicas. **En cuanto a la electrodiálisis, debe tenerse en cuenta que no se trata de un sistema de «membranas-barrera» como los anteriores, sino que las membranas sólo son atravesadas por los iones eliminados en el proceso, mientras que el agua circula tangencialmente a dichas membranas. Consecuentemente en el caso de la electrodiálisis el abanico de posibilidades de eliminación de contaminantes es inferior.**

El esquema general de las incidencias seguirá el siguiente guión:

- Descripción de la incidencia.
- Detección.
- Acciones inmediatas.
- Acciones correctoras.
- Acciones preventivas.
- Efectos sobre la calidad del agua.
- Efectos sobre la salud, inmediatos o a largo plazo.
- Información al consumidor.

¹ Acceso al SINAC: <http://sinac.msps.es>

Las incidencias en el uso de tecnologías de membranas se originan principalmente cuando tienen lugar o concurren algunos de los siguientes hechos:

- Alteraciones de la calidad del agua bruta respecto del tipo de membrana y los objetivos de calidad del agua producto.
- Daños en la estructura interna de la membrana. Acortamiento de su vida útil.
- Presencia en el agua producto de los agentes químicos utilizados en las operaciones de lavado y desinfección de las membranas.

El **análisis de las incidencias** que se realiza a continuación, así como su forma de detección y las medidas preventivas y correctoras que resulten de aplicación en cada uno de los casos, deberá recogerse en un **plan de gestión de riesgos**.

Este **plan deberá formar parte del conjunto de procedimientos y protocolos del plan general de operación y mantenimiento de la instalación de tratamiento de agua de consumo humano**.

Como regla general no se debe olvidar nunca la importancia y la responsabilidad del personal de operación de las plantas potabilizadoras, en especial su formación y motivación, como factor clave y básico para evitar las posibles incidencias que afectan a la calidad del agua tratada.

10.1. Alteraciones de la calidad del agua bruta

Las tecnologías de membrana tienen amplias posibilidades de aplicación: aguas de elevada dureza, salobres, de mar, etc; de ahí la existencia de los diferentes tipos de membrana, que en todos los casos establece la base del sistema de tratamiento, y que reposa sobre el binomio constituido por las características del agua bruta y los objetivos de calidad del agua producto.

Las características del agua bruta pueden verse alteradas ya sea por causas naturales como por contaminaciones de diversa índole.

La naturaleza y estructura de los suelos, en las aguas de procedencia superficial o subterránea, es la principal causa natural que puede modificar las características físico-químicas del agua bruta.

La contaminación del agua a tratar por vertidos de origen industrial, de aguas residuales urbanas, o los originados por las actividades agrarias son las causas de origen artificial que pueden afectar a la calidad de cualquiera de los recursos hídricos utilizados para la aportación del agua a la instalación.

Tabla 17. Incidencias debidas a alteraciones en el agua bruta por vertidos

Causas	Detección	Acciones inmediatas	Acciones correctoras	Medidas preventivas
<p>Alteración de la calidad del agua bruta por contaminación de acuíferos o fuentes superficiales en zonas contaminadas con vertidos de origen industrial.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Posible presencia de metales pesados. Ver nota 1. • Incremento de las presiones diferenciales y de la conductividad: <ul style="list-style-type: none"> - Transmembrana - Entre etapas • Descenso imprevisto del caudal de agua producto. 	<ul style="list-style-type: none"> • Control analítico de la calidad del agua bruta • Medición y control de caudales individuales de bastidores. • Medición y control de presiones y conductividad en: <ul style="list-style-type: none"> - Alimentación a membranas. - Permeado. - Salmuera. • Diferencia de presión entre la entrada y la salida de cada una de las etapas. • Investigar la sustancia causante de la contaminación y realizar controles periódicos de su presencia en agua bruta. 	<ul style="list-style-type: none"> • Establecer estrategia con las autoridades competentes para eliminar foco de contaminación o minimizar sus efectos. • Sustitución de la fuente de agua bruta. • Realizar acciones sobre el pretratamiento (ver nota 2). • Valorar si procede la limpieza química de las membranas. 	<ul style="list-style-type: none"> • Identificar foco u origen de contaminación. • Verificar que los límites de operación de las membranas son compatibles con la calidad del agua bruta.

.../...

.../...

Causas	Detección	Acciones inmediatas	Acciones correctoras	Medidas preventivas
Alteración de la calidad del agua bruta por contaminación de acuíferos, o fuentes superficiales en zonas contaminadas con vertidos de aguas residuales urbanas o de industrias agroalimentarias .	<ul style="list-style-type: none"> • Crecimiento biológico membranas. • Incremento de las presiones diferenciales y de la conductividad: <ul style="list-style-type: none"> - Transmembrana. - En las etapas. • Descenso de caudales del permeado. 	<ul style="list-style-type: none"> • Control analítico de la calidad del agua bruta. Investigación de la presencia de nutrientes: fósforo, nitrógeno, etc.... • Medición y control de caudales individuales de bastidores. • Medición y control de presiones y conductividad en: <ul style="list-style-type: none"> - Alimentación a membranas. - Permeado. - Salmuera. • Diferencia de presión entre la entrada y la salida de cada una de las etapas. 	<ul style="list-style-type: none"> • Establecer estrategia con las autoridades competentes para eliminar foco de contaminación o minimizar efectos. • Sustitución de la fuente de agua bruta. • Realizar acciones sobre el pretratamiento (ver nota 2). • Aplicar procedimientos de desinfección en membranas si procede. Ver nota 3. 	<ul style="list-style-type: none"> • Identificar foco u origen de contaminación química y/o orgánica. • Control de desinfección y dosificación de agentes biocidas.

Nota 1: La eliminación de metales pesados es factible mediante el uso de membranas. La tecnología más eficiente es la osmosis inversa.

Nota 2: Las acciones sobre el pretratamiento consisten en verificar las condiciones de funcionamiento de las etapas del pretratamiento. A modo de ejemplo se pueden citar:

- Verificación de las dosis de reactivos químicos: coagulantes, floculantes, agentes oxidantes (cloro, permanganato potásico).
- Modificación de las dosis de reactivos y de los parámetros de operación de los procesos.
- Comprobación del funcionamiento y de los equipos electromecánicos. Agitadores, bombas dosificadoras, bombas de fangos, bombas de proceso (consumos eléctricos, presiones, piezas internas tales como membranas de bombas dosificadoras, válvulas de bombas dosificadoras, palas de agitadores, placas (lame-las) de sedimentadores, estado de lechos filtrantes en filtros de arena, etc....)
- Validación periódica de la instrumentación de campo (pH-metro, conductivímetro, REDOX, etc.)
- Reingeniería del proceso, ampliación o modificación de instalaciones o equipos mecánicos. Incluir o ampliar técnicas de tratamiento tales como oxidación con ozono y permanganato potásico, o aplicación de carbón activo (según casos, tipo y grado de contaminación).

Nota 3: Para el control del crecimiento biológico es recomendable el seguimiento y la mejora de los procedimientos de desinfección: choques puntuales de cloro, radiación UV, y ozono en pretratamiento.

Las alteraciones de la calidad del agua bruta pueden afectar a la calidad del agua producto, si estos cambios escapan de las tolerancias establecidas en las bases de partida del diseño. Todos estos factores se trataron en los capítulos 2 y 3.

10.2. Daño estructural en el módulo de ósmosis inversa

Los elementos de membrana, indistintamente de su tipología, van perdiendo algunas de sus características más importantes con el paso del tiempo, tales como el caudal de producción o el rechazo de sales. El diseño específico de cada instalación prevé una tasa para su reposición, de modo que se asegure el mantenimiento de las condiciones requeridas en cuanto a la cantidad y a la calidad del agua producto. No obstante, el proceso normal de envejecimiento puede verse acelerado por incidencias en la operación. Las secuencias de arranque y parada deben realizarse según el procedimiento establecido al efecto, con el objeto de minimizar los efectos negativos que pueden producirse. Las caídas de tensión y los cortes del suministro eléctrico son factores indeseables que contribuyen al acortamiento de la vida útil de las membranas. Las membranas, según su naturaleza, presentan una mayor o menor sensibilidad a los reactivos químicos utilizados en el proceso, pudiendo llegar a dañar su estructura de una manera irreversible. La detección de estas incidencias es inmediata, al producirse en todos los casos un incremento del paso de sales, que se pone de manifiesto con un aumento de la conductividad del agua producto.

Tabla 18. Incidencias debidas a daños estructurales en el módulo de ósmosis inversa				
Causas	Detección	Acciones inmediatas	Medidas preventivas	Acciones correctoras
Fallo de la membrana por defecto de fabricación.	<ul style="list-style-type: none"> • Incremento de conductividad en el permeado. 	<ul style="list-style-type: none"> • Control analítico de la calidad de permeado. 	<ul style="list-style-type: none"> • Verificación y control del estado de las membranas a su recepción. 	<ul style="list-style-type: none"> • Sustitución de membranas defectuosas.
Agotamiento del ciclo de vida útil de la membrana. (La duración de una membrana generalmente es de tres a siete años).	<ul style="list-style-type: none"> • Desviaciones de los objetivos de calidad del permeado. • Incremento de conductividad en el permeado. 	<ul style="list-style-type: none"> • Control analítico de la calidad del permeado. 	<ul style="list-style-type: none"> • Registro histórico de control de la operación para la predicción del fin de la vida útil. 	<ul style="list-style-type: none"> • Sustitución de membranas.
Fallo del elemento de membrana por acortamiento de su vida útil debido a: choque hidráulico y plegamiento de membranas, deficiente desplazamiento de agua en paradas de planta, ataque químico o crecimiento biológico.	<ul style="list-style-type: none"> • Desviaciones de los objetivos de calidad del permeado. • Incremento inesperado de conductividad en el permeado. 	<ul style="list-style-type: none"> • Control analítico de la calidad del permeado. • Investigación de la presencia de bacterias indicadoras en el permeado. 	<ul style="list-style-type: none"> • Análisis de incidencias con objeto de identificar la causa de la deficiencia. • Análisis de averías para averiguar causas de roturas o deterioro de membranas • Análisis destructivo (autopsia) de los elementos de membranas. 	<ul style="list-style-type: none"> • Monitorizar parámetros. Revisión y mejora de la lógica del control del proceso. • Rediseño de la planta o de los procesos. • Sustitución de membranas dañadas. • Control y monitorización de parámetros analíticos, de proceso y operación de planta.
Fallo en la integridad del módulo de ósmosis.	<ul style="list-style-type: none"> • Incumplimiento de los objetivos de calidad del permeado. • Cambios imprevistos de conductividad en el permeado. 	<ul style="list-style-type: none"> • Control analítico de la calidad del permeado. • Sondeo interno del módulo en servicio. 	<ul style="list-style-type: none"> • Análisis de incidencias con objeto de identificar la causa de la incidencia. 	<ul style="list-style-type: none"> • Monitorizar parámetros. Revisión y mejora de la lógica del control del proceso. • Actuación en la instalación con sustitución de los elementos dañados y verificación

10.3. Incidencias debidas a la presencia de agentes químicos de limpieza en el permeado

La acumulación de las distintas sustancias contaminantes sobre la superficie de las membranas produce un descenso de caudal, una pérdida de calidad del producto y un aumento de la presión diferencial interior de las membranas.

Las membranas sucias deben lavarse para eliminar estos elementos depositados sobre ellas, pero si en el lavado no se emplean los productos adecuados, o si los lavados se retrasan exageradamente, se produce un ensuciamiento en ocasiones irreversible, y las sustancias quedan fuertemente adheridas a la membrana, resultando difíciles de eliminar. En estas condiciones, la membrana experimenta un fuerte descenso en sus prestaciones y se debe reemplazar.

La limpieza química consiste en recircular a través de los bastidores una serie de productos químicos capaces de disolver las precipitaciones, o de eliminar los depósitos existentes sobre las membranas.

Para desplazar los reactivos del interior de la planta cuando ésta se somete a una limpieza química, se emplea la operación conocida como «desplazamiento», que consiste en hacer llegar a las membranas, siguiendo el mismo camino que la solución a tratar, permeado exento de sustancias en suspensión y disueltas, susceptibles de depositarse sobre su superficie, o agua de buena calidad (conforme las especificaciones del fabricante en cada caso).

La operación de desplazamiento del sistema se prolongará hasta que la conductividad y el pH del agua que sale por la corriente de salmuera, se correspondan con las del agua de alimentación.

Aunque el lavado que se suele hacer es el específico para cada situación, en muchos casos no resulta fácil el conocimiento de la causa exacta del ensuciamiento. Para más indicaciones, puede consultarse el **capítulo 6**, dedicado íntegramente al mantenimiento, limpieza y conservación de las membranas.

Tabla 19. Incidencias debidas a la presencia de agentes químicos en el permeado

Causas	Detección	Acciones inmediatas	Medidas preventivas	Acciones correctoras
Deficiente desplazamiento tras la operación de lavado químico.	<ul style="list-style-type: none"> • Modificación de pH en el permeado. • Espumas (si el lavado ha sido con detergentes) en agua. • Aumento de conductividad en el permeado. • Aire en el sistema. 	<ul style="list-style-type: none"> • Control analítico de la calidad del agua en el depósito del permeado. • Revisión de la valvulería. 	<ul style="list-style-type: none"> • Control periódico de posibles agentes contaminantes en agua producto. • Optimización de operaciones de lavado y/o desplazamiento en plantas de tratamiento. • Establecimiento de procedimientos específicos de obligado cumplimiento. 	<ul style="list-style-type: none"> • Control y monitorización de parámetros analíticos, de proceso y operación de planta. • Formación y entrenamiento de personal para optimizar las acciones de operación y de mantenimiento de equipos. • Revisión y mejora de la lógica del control del proceso.
Deficiente desplazamiento tras la operación de desinfección.	<ul style="list-style-type: none"> • Aumento de conductividad en el permeado. 	<ul style="list-style-type: none"> • Control analítico de la calidad del agua en el depósito del permeado. • Revisión de la valvulería. 	<ul style="list-style-type: none"> • Control periódico de posibles agentes contaminantes en agua producto. • Optimización de operaciones de lavado y/o desplazamiento en plantas de tratamiento. • Establecimiento de procedimientos específicos de obligado cumplimiento. 	<ul style="list-style-type: none"> • Control y monitorización de parámetros analíticos, de proceso y operación de planta. • Formación y entrenamiento de personal para optimizar las acciones de operación y de mantenimiento de equipos. • Revisión y mejora de la lógica del control del proceso.

11. Aspectos medioambientales de la desalación

La aplicación de la tecnología de membranas en el tratamiento del agua es esencial hoy día en todo el mundo. En España se acentúa particularmente esa necesidad dadas sus peculiaridades en la disponibilidad, calidad y mantenimiento de los flujos de agua, normalmente escasa y con tendencia a incrementar el consumo.

Las técnicas de aplicación descritas, en particular la nanofiltración y fundamentalmente la ósmosis inversa, integran un proceso relevante en el tratamiento del agua en la industria en general y en particular la alimentaria, así como en la obtención de agua destinada a consumo humano.

Los vertidos de concentrados de sales van asociados a la corriente de rechazo producida en estos sistemas. Es necesario considerar la gestión de este rechazo como una parte integrada en el diseño de cualquier instalación por su posible impacto en el medio ambiente. Se tendrá en cuenta siempre que sea posible, el uso de las corrientes de rechazo en el lavado de las unidades de filtración en el pretratamiento, con el objetivo de ahorrar agua y de mejorar la eficacia del sistema.

Se deberán considerar las diferentes alternativas en la evacuación de los rechazos, distinguiendo claramente su procedencia, caudal, composición y concentración. Igualmente deberán tenerse en cuenta las características del sistema receptor, que podrá ser cerrado, en redes de alcantarillado municipal a depuradora, o abierto al medio natural, con el objetivo final de preservar el estado del medio donde se implante una instalación. Es importante señalar que **cualquier vertido deberá contar con la correspondiente autorización administrativa.** (Véase tabla 21)

Estas medidas de tratamiento deberán ser recogidas en el proyecto y aplicadas según el marco legislativo existente. En este sentido, desde el punto de vista ambiental, el principal requisito administrativo que requiere la construcción de una desaladora, es la obligación de realizar un **estudio de impacto ambiental**, tal y como establecen las leyes nacionales y autonómicas

En este capítulo se ofrece una orientación básica sobre las afecciones que una desaladora puede causar en el medio natural, mencionando resumidamente, los contenidos que debe contemplar el **Estudio de Impacto Ambiental de una desaladora.** Se desarrolla dentro del marco que ofrece el Real Decreto Legislativo 1/2008, de 11 de enero, por el que se aprueba el texto refundido de

la Ley de Evaluación de Impacto Ambiental de proyectos (BOE nº 23, de 06.01.08).

Se centrará primeramente en desglosar los factores característicos de las desaladoras susceptibles de repercutir en el medio natural. A continuación se expone brevemente el contenido de los estudios de impacto ambiental específico de este tipo de instalaciones y, posteriormente, se proponen algunas previsiones para la mitigación de impactos.

Figura 65. Tramo difusor del emisario de salmueras de la desaladora de Blanes (Girona). Por cortesía de Ecoproges S.L. Fotografos: Joan Carles Fluxà y Jordi Chías



11.1. Repercusiones ambientales de las desaladoras

Al igual que otras infraestructuras, las afecciones características de las desaladoras no son únicamente las derivadas de la edificación de la nave o el vertido de la salmuera. Algunas acciones frecuentes en estos tipos de pro-

yectos son: desbroce, desmante y explanación de la zona del proyecto, conexión a la red eléctrica y a la de saneamiento, construcción de las instalaciones y los caminos de acceso, toma de agua bruta, vertido del rechazo, transporte del agua desalada, producción de lodos ricos en materia orgánica, sustancias contaminantes, ruido y vibraciones principalmente.

Entre los valores ambientales más significativos que se suelen evaluar en un estudio de impacto ambiental de cualquier proyecto, destacan la biodiversidad y los hábitats. Las desaladoras de agua de mar, por razones de optimización de costes energéticos, suelen situarse en zonas muy próximas a la costa, mientras que las desaladoras de agua salobre, pueden encontrarse a cualquier distancia de la costa; con el único requisito de situarse en las proximidades de una fuente de agua bruta.

Dadas las diferentes características de las desaladoras de agua de mar y de las de agua salobre en cuanto al emplazamiento, la toma de agua y el vertido del rechazo, se considerarán sus afecciones más características en apartados diferentes.

11.1.1. Desaladoras de agua de mar

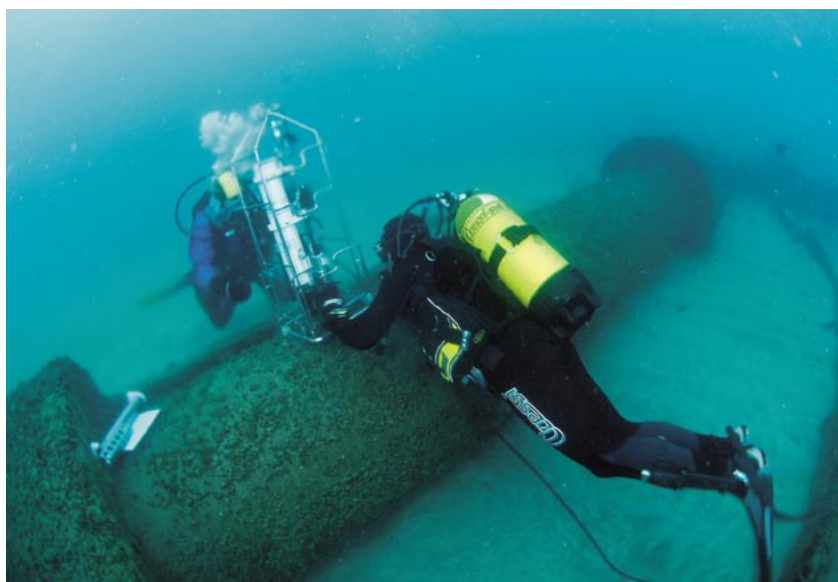
La riqueza biológica de las zonas costeras se debe a su elevada diversidad ambiental, con ecosistemas de tamaño en general pequeño, formando mosaicos con abundantes ecotonos (zonas de confluencia de ecosistemas caracterizadas por una mayor biodiversidad). La franja litoral concentra numerosos «Tipos de hábitats naturales de interés comunitario cuya conservación requiere de la designación de zonas de especial conservación», que vienen definidos en el anexo I de la Directiva 92/43/CEE, relativa a los hábitats. Por otra parte, lo que resta de territorio está sometido a una fuerte presión urbanística a causa de la cual los inconvenientes que suponen la instalación de una desaladora, aunque de naturaleza muy diferente (principalmente la simple ocupación de un espacio potencialmente edificable), no son menores que en los territorios protegidos medioambientalmente.

Además, la diversidad de los hábitats y las condiciones ambientales que podemos encontrar en el medio receptor, han dado lugar a la protección de muchas especies mediante leyes de ámbito regional, nacional o europeo.

En relación con el emplazamiento, al igual que cualquier otra infraestructura, debe tenerse en consideración la posible afección a los hábitats de la red Natura 2000, habitualmente abundantes en las zonas costeras. Se trata de acantilados, cordones dunares y arenales marítimos, playas, humedales más o menos ligados a la influencia marina o continental (lagunas, ramblas, marismas) y comunidades bentónicas marinas significativas. La conservación del patrimonio arqueológico y paleontológico también debe ser considerada.

En relación con el impacto de los **vertidos de salmueras** sobre las comunidades biológicas sumergidas, es sabida la escasa tolerancia de *Posidonia oceanica* a leves aumentos de salinidad. Según los estudios realizados hasta la fecha, y atendiendo al principio de precaución, incrementos de la salinidad a partir de 39,1 PSU producen reducción en el crecimiento, aparición de necrosis en los tejidos y caída prematura de las hojas. Por otra parte, otras especies características de estos ambientes (por ejemplo: erizos y misidáceos) también pueden verse afectadas igualmente.

Figura 66. Medición de parámetros en tramo difusor del emisario de salmueras de la desaladora de Blanes (Girona) mediante CTD. Por cortesía de Ecoproges S.L. Fotógrafos: Joan Carles Fluxà y Jordi Chías



En ocasiones, el vertido de la salmuera en zonas de rompiente, en playas rocosas muy batidas, etc., puede resultar una medida efectiva para favorecer su dilución. Como medida similar también se ha utilizado la evacuación de la salmuera en arroyos de carácter muy torrencial, pero en estos casos hay que tener en cuenta la posible alteración de zonas húmedas por modificación de los cauces próximos con motivo de dichos vertidos. También debe analizarse la alteración de estos ecosistemas por salinización de las aguas superficiales y subterráneas.

11.1.2. Desaladoras de agua salobre

Un efecto desfavorable de este tipo de instalaciones, se debe a la posible sobreexplotación de los acuíferos de donde se toma el agua salobre. En este caso de acuíferos ya de por sí sobreexplotados, pueden incrementarse los fenómenos de intrusión marina o de descenso piezométrico. Paralelamente, se puede afectar a los ecosistemas y el paisaje a causa de la alteración de la calidad del agua en zonas húmedas, por la salinización de las aguas superficiales y subterráneas.

También debe tomarse en consideración la posibilidad de contaminación de masas de agua (superficiales y subterráneas), y la afección a comunidades vegetales y animales como consecuencia de vertidos accidentales de salmuera, o agua con concentraciones de sales superiores a las naturales de la zona.

11.1.3. Contenido de los estudios ambientales

Un estudio ambiental de cualquier infraestructura, debe evaluar el proyecto en todas sus fases (diseño, ejecución, funcionamiento o desmantelamiento). El proyecto y su correspondiente estudio ambiental deben tener un desarrollo coetáneo, siendo muy recomendables los procesos de retroalimentación entre ambos.

A continuación se detallan los contenidos básicos de un estudio ambiental, tomados del Art. 7.1 del Real Decreto Legislativo 1/2008 por el que se aprueba el texto refundido de la Ley de Evaluación de Impacto Ambiental de proyectos:

- a) Descripción general del proyecto y exigencias previsibles en el tiempo, en relación con la utilización del suelo y de otros recursos naturales. Estimación de los tipos y cantidades de residuos, vertidos y emisiones de materia o energía resultantes.

Este apartado debe incluir:

Antecedentes: Introducción muy breve.

Justificación legal: Motivos legales a los que está sujeta la actividad, haciendo referencia a la legislación aplicable.

Descripción del proyecto y sus acciones: Localización, descripción de la actuación, objetivos, descripción de materiales empleados, movimientos de tierras previstos, suelo que se ocupará y otros recursos naturales, descripción de los tipos, cantidades y composición de residuos, vertidos y emisiones.

Descripción del contexto del proyecto: Planes locales, regionales o nacionales con implicaciones en el proyecto original (regadíos, urbanización, líneas para el transporte de agua, etc.) Inducción de actividades y nuevos proyectos, como consecuencia de la localización de la desaladora, de los que puedan derivarse sinergias o efectos acumulativos sobre otros recursos.

- b) Una exposición de las principales alternativas estudiadas y una justificación de las principales razones de la solución adoptada, teniendo en cuenta los efectos ambientales.

Examen de alternativas: Debe permitir mediante criterios objetivos elegir las opciones técnicas más favorables del diseño de la desaladora desde el punto de vista del medio natural, pero integrando a la vez otros criterios de tipo económico, de oportunidad, etc. En los proyectos de desaladoras, además de presentar las clásicas alternativas a su localización (ubicación de la nave), deberán ir acompañadas de diversas alternativas en cuanto el trazado de los emisarios submarinos para salmuera, siempre que sean necesarios. Como en principio, el punto final en estos últimos no está fijado, las alternativas de localización del punto final de vertido también deberán considerarse. **Es recomendable que el punto de vertido sea accesible para su seguimiento y control posterior.** Las alternativas se refieren a los aspectos de ubicación, que también puede afectar al diseño tecnológico, como por ejemplo, la instalación de dispositivos de vertido en emisarios submarinos de salmuera que favorezcan la mezcla con agua de mar. A la hora de discernir cuál será el trazado más correcto para una obra de construcción de un emisario para salmuera, cabe destacar las siguientes consideraciones:

- a. Proximidad de zonas de baño.
 - b. Presencia de caladeros de pesca o la presencia de polígonos destinados a la acuicultura.
 - c. Presencia o cercanía de Espacios Naturales Protegidos (LIC, ZEPIM, reservas marinas, etc.).
 - d. Formaciones de vegetación cartografiadas como hábitats prioritarios (por ejemplo, la presencia de praderas de *Posidonia oceanica*).
 - e. Morfología de la costa y el régimen de corrientes de la zona.
 - f. Presencia de polígonos destinados a la producción piscícola
 - g. Presencia de áreas de interés faunístico.
 - h. Presencia de zonas húmedas que experimenten intercambios de agua con el mar y que pueden verse afectados por incrementos de la salinidad.
- c) Evaluación de los efectos previsibles directos o indirectos del proyecto sobre la población, la flora, la fauna, el suelo, el aire, el agua, los factores climáticos, el paisaje y los bienes materiales, incluido el patrimonio histórico artístico y el arqueológico. Asimismo, se atenderá a la interacción entre todos estos factores.

Este apartado puede seguir la siguiente **metodología de análisis:**

- a. Estudio de la documentación del proyecto.
- b. Recopilación de la información bibliográfica.

- c. Visitas de campo preliminares.
- d. Puesta a punto del trabajo de campo.
- e. Trabajo de campo.
- f. Trabajo de gabinete.
- g. Redacción de conclusiones.

Inventario ambiental y descripción de las interacciones ecológicas y ambientales clave:

Resultan de gran ayuda los indicadores cuantitativos, como distancia, superficie, número de pies de plantas o concentración. Este apartado incluirá información relativa a:

- a. Análisis y valoración del medio físico.
- b. Análisis y valoración del medio biótico.
- c. Análisis y valoración del paisaje.
- d. Análisis y valoración de la calidad ambiental del medio natural.
- e. Análisis y valoración del medio socioeconómico, territorial y cultural.
- f. Patrimonio arqueológico, histórico, cultural y etnológico.
- g. Planeamiento urbanístico: Planeamientos Urbanísticos de los diferentes Ayuntamientos de la Región.
- h. Usos y aprovechamientos: compatibilidad de la desaladora especialmente con los aprovechamientos de carácter primario (agrícola, ganadero, forestal, pesquero), y algunos de carácter terciario (turístico, cinegético).

Identificación de acciones capaces de producir efectos sobre el medio natural:

Los estudios de impacto ambiental deben considerar la planta desaladora y las partes que la acompañan susceptibles de causar un impacto significativo sobre el medio natural, como son la evacuación de la salmuera, la captación del agua, el tendido eléctrico, las conducciones y depósitos de agua desalada exteriores a la planta. En algunos casos, el impacto de estas partes pueden ser incluso superiores a los previstos para la planta desaladora. Por tanto, los estudios ambientales deben hacer referencia y analizar todas las actuaciones previstas en el proyecto y sus modificaciones posteriores, si es que se producen. La tabla 20 identifica las acciones más importantes. En los estudios ambientales se deben observar también los impactos indirectos tanto positivos como negativos, tendiendo a la sostenibilidad.

- d) Medidas previstas para reducir, eliminar o compensar los efectos ambientales significativos.

Propuesta de medidas mitigadoras (preventivas, correctoras, protectoras y compensadoras):

- a. Definición de la medida.

- b. Objetivo (sistemas del medio natural afectados y tipos de afección).
- c. Parámetros (representatividad, fiabilidad, número reducido y fácilmente medible).
- d. Muestreo (adecuada distribución espacio-temporal).
- e. Entidad responsable de su gestión.
- f. Momento y documento de su inclusión: presupuesto, pliego de condiciones, del proyecto sustantivo o de otro específico para las medidas correctoras.
- g. Costes de ejecución.
- h. Costes de mantenimiento.

Impactos residuales de proyectos con afección sobre el medio natural: Se consideran afecciones residuales a aquéllas que persisten después de aplicar las medidas preventivas, correctoras, protectoras o compensadoras, bien porque carecen de medidas específicas, porque son mitigadoras, o bien porque son consecuencia de las mismas.

- e) Programa de vigilancia ambiental.
Establece el proceso de seguimiento y control de los factores del medio natural afectados en cada fase del proyecto, que debe garantizar el cumplimiento de las prescripciones y medidas establecidas en el estudio ambiental y definir la Vigilancia Ambiental. Ésta a su vez establecerá los parámetros de seguimiento y sus sistemas de control.
- f) Resumen del estudio y conclusiones en términos fácilmente comprensibles. En su caso, informe sobre las dificultades informativas o técnicas encontradas en la elaboración del mismo.

Tabla 20. Principales acciones capaces de producir efectos sobre el medio natural de un proyecto tipo e información que debe ser detallada

Acción	Información detallada necesaria
Movimientos de tierras.	Materiales empleados.
	Procedencia y zonificación.
	Medios e itinerarios de transporte.
	Puntos de vertido.
Eliminación de vegetación.	Especies afectadas.
	Superficie.

.../...

.../...

Acción	Información detallada necesaria
Voladuras.	Localización.
	Superficie afectada.
	Época de voladuras y posible afección a la ecología de las especies de la zona.
Olores.	Procedencia.
Ruidos y vibraciones.	Niveles de inmisión.
	Afección a la población. Afección a la fauna.
Afecciones a fauna.	Especies potencialmente afectadas.
	Época de afección.
Tipo y número de estructuras necesarias	Red eléctrica y de telefonía.
	Alcantarillado.
	Red vial.
	Edificaciones.
	Pistas y accesos adicionales.
Necesidades de ocupación de suelo.	Extensión de la nave, servicios anexos y accesos.
	Operaciones auxiliares durante la construcción (acopio de materiales, parque de maquinaria).
Cambio de uso del suelo.	Alteración de usos actuales.
Tipo de materiales proyectados.	Materiales necesarios para la fase constructiva.
	Materiales relativos al tratamiento del firme de accesos.
Plan de obra.	Tiempo estimado de duración y época previsible de realización (posible afección a ecología de ciertas especies en la zona).
Necesidades de desvíos, canalizaciones u otras actuaciones que puedan incidir en la red de drenaje natural.	Provisionales.
	Definitivos.

.../...

.../...

Acción	Información detallada necesaria
Otras infraestructuras o servicios afectados.	Red eléctrica.
	Caminos.
	Vías pecuarias.
	Colectores, acequias y drenajes.

Figura 67. Durante la construcción de las desaladoras debe cuidarse de que los cursos de agua no queden obstruidos por materiales de las obras, y de ese modo disminuir los riesgos hidrológicos



Figura 68. Los edificios deben ir revestidos utilizando los materiales y técnicas tradicionales de la zona en la que se construyen. Edificio de bombeo de la desaladora de Camp de Mar (Mallorca)



11.1.4. El Programa de Vigilancia Ambiental de las desaladoras

El Programa de Vigilancia Ambiental (en adelante PVA) sobresale a lo largo del desarrollo del procedimiento de la evaluación de impacto ambiental (en adelante EIA), ya que desarrolla en campo todo lo que hasta este momento se ha desarrollado sobre determinado proyecto en gabinete.

Esta fase consiste básicamente en poner en práctica las directrices marcadas en el propio EIA para el PVA, (las medidas protectoras y correctoras que figuran en el EIA y valorar la eficacia de las mismas) y ajustarse al condicionado de la declaración de impacto ambiental (en adelante DIA).

El primer paso que conviene darse en el PVA es mostrar el estado ecológico inicial, previo a la construcción del proyecto, de las zonas que se verán afectadas según el proyecto constructivo. Esta fase preliminar es conveniente por doble motivo. Primero, porque no tiene por qué coincidir la empresa que realizó el EIA y la que desarrollará el PVA y de este modo se garantizará que la segunda tenga un buen conocimiento del terreno sobre el que se desarrollará el proyecto. En segundo lugar es conveniente también porque eventualmente pueden haberse producido actuaciones u otros sucesos durante el tiempo transcurrido entre la elaboración del EIA y el inicio de la fase de construcción.

Entre los aspectos que conviene tratarse en el citado estado inicial, se pueden señalar un breve resumen del objeto del proyecto, un inventario de los sectores del ámbito de ejecución y explotación del proyecto, una mención de la DIA y su condicionado y la metodología a seguir para el establecimiento del estado inicial en cada zona. Dentro del inventario de los sectores afectados, debe desarrollarse brevemente:

- Emplazamiento del proyecto.
- Características del medio natural: sistema hidrológico, análisis de los riesgos naturales (inundación, erosión, deslizamiento e incendio), niveles de ruido, flora y vegetación, fauna, especies catalogadas y distribución en los sectores afectados por el proyecto y periferia, sectorización y análisis del ámbito de actuación (captación, planta principal, entrada de la conducción de la salmuera en la costa, zona submarina afectada, conducciones de agua bruta, de agua desalada y de salmuera) acompañada de información fotográfica aérea y sobre el terreno.

Es frecuente que se precise de información adicional a la recogida durante la redacción del EIA, ya que se pueden detectar aspectos ambientales de interés muy local y que, por una cuestión de escala, no se encuentren suficientemente claros. Entre los estudios específicos más comunes se encuentra la realización de prospecciones arqueológicas, distribución de determinadas especies de flora o fauna endémicas o amenazadas, inventario de puntos de cría o nidificación, mapas de ruido o estado de las aguas subterráneas en los sectores afectados por el proyecto y zonas aledañas.

Como metodología se recomienda que se desarrolle una valoración del estado inicial a partir de una serie de puntos de control e indicadores ambientales sobre los diferentes sectores afectados. Es necesario que ya desde esta fase se produzca una buena coordinación entre la vigilancia ambiental y la dirección de obra, ya que facilita el desarrollo de las labores propias de cada uno y redundan en una ejecución eficaz del proyecto y su posterior explotación.

El PVA, una vez definido el estado previo al inicio de las obras, puede plasmarse en inspecciones programadas e imprevistas de diferentes sitios e

instalaciones, incluyendo observación visual, toma de fotografías y cumplimentación de los formularios de seguimiento en el ámbito de la actuación.

Con el objeto de establecer criterios e indicadores adecuados de evaluación, deben realizarse entrevistas y reuniones con el personal en las diferentes fases del proyecto. Normalmente, en función de la fase en que se encuentre el proyecto, se mantendrán reuniones periódicas entre la auditora ambiental y la dirección de obra para conocer las actuaciones previstas, los problemas que puedan ir surgiendo, y evaluar la eficacia de las medidas correctoras.

Se plantean tres tipos de informes que se remiten a la autoridad competente en materia de medio ambiente:

- Informes ordinarios, mensuales, en los que se reflejan las labores de seguimiento ambiental. Facilitarán valorar la evolución de los aspectos del PVA.
- Informes extraordinarios, que se emitirán cuando exista alguna afección imprevista importante que precise una acción urgente.
- Informe final, que contendrá el resumen y conclusiones de todas las actuaciones de vigilancia.

Los informes ordinarios deben evaluar preferiblemente de un modo cuantitativo el grado de cumplimiento de los objetivos marcados en el PVA. Una metodología aconsejable consiste en desarrollar unos formularios de seguimiento que detallen las diferentes acciones, (la Tabla 21 sirve como referencia), que se mantienen a lo largo de cada fase del proyecto y que se puntúan. De este modo se obtiene una puntuación final cada mes que permitirá seguir la evolución de la obra y de la explotación hasta donde esté convenido en el EIA. Tras el formulario, se justificará la valoración de cada acción explicando brevemente las observaciones oportunas. Los informes irán firmados tanto por la auditora ambiental como por el constructor, de modo que se mantenga la confianza necesaria entre los diferentes actores del proyecto.

En las desaladoras, el PVA suele polarizarse, durante la fase de ejecución de la obra, hacia las afecciones sobre el medio terrestre, limitándose en el medio marino a conocer el estado inicial de las comunidades submarinas costeras que podrían verse afectadas por el vertido de salmuera. Sin embargo, en la fase de explotación las afecciones al medio terrestre pierden importancia cobrándola el seguimiento de las comunidades submarinas, por ejemplo de *Posidonia oceanica*.

Las DIA de las desaladoras ya establecen, dentro de los PVA, un protocolo de parada para evitar que la salinidad del medio receptor supere el umbral de tolerancia de las especies bentónicas. Así, en la construcción de las instalaciones se incluye un conductivímetro para medición y registro en continuo, que determinará la salinidad de la mezcla resultante entre salmuera y el agua de dilución antes de realizar su vertido. Si se superasen los

límites en la pradera de *Posidonia oceanica*, se procederá a corregir esta desviación. Algunas alternativas posibles, según el caso, son:

- a) Dilución del vertido con agua tratada de una depuradora, cuando transcurran paralelos los emisarios de salmuera y de una estación depuradora de aguas residuales, mediante una arqueta de dilución.
- b) Dilución del vertido de salmuera con agua de mar con objeto de rebajar la salinidad del efluente y aumentar el caudal por los difusores para potenciar el efecto dilución. Para esto se exige que la planta pueda tener una capacidad de dilución del efluente superior a 2:1 (agua de mar: agua de rechazo).
- c) Otras alternativas tecnológicas para facilitar la dilución de la salmuera.

11.2. Relación de los permisos principales solicitados en desaladoras

Los permisos necesarios para la situación y puesta en marcha de una estación desaladora, se recogen en la tabla 21. Esta relación de permisos variará en función del tipo de instalación y su ubicación.

La mayor parte de los permisos son consecutivos, lo que conlleva un largo período de tramitación administrativa, como sucede en cualquier obra pública.

Además de los permisos descritos, pueden existir otros dependiendo del tipo de promotor, características de la obra, Comunidad Autónoma, Municipio, ubicación, pueden variar e incluso ampliarse.

Dichas infraestructuras pueden ser tuberías de muy diferentes tipos: impulsión, transporte, desagüe, etc., o líneas de alta tensión, por ejemplo.

Tabla 21. Lista de los principales permisos y solicitudes		
Entidades afectadas	Concepto	Fase
Ayuntamiento/s	Autorización para la ubicación, entrada o cruce, de obras e infraestructuras, en carreteras, viales o terrenos municipales.	Proyecto
	Licencia municipal de apertura de actividad.	Proyecto

.../...

.../...

Entidades afectadas	Concepto	Fase
Comunidad Autónoma. Servicio de Costas.	Autorización para realizar sondeos de reconocimiento.	Ejecución
Comunidad Autónoma. Consejería de Sanidad.	Informe sanitario vinculante.	Proyecto
	Informe sanitario a la puesta en funcionamiento.	Puesta en funcionamiento
Comunidad Autónoma. Consejería de Obras Públicas. Dirección General de Carreteras.	Autorización para la ubicación, entrada o cruce de obras e infraestructuras bajo carreteras autonómicas.	Proyecto
Comunidad Autónoma.	Provisión de los terrenos.	Proyecto
Comunidad Autónoma. Dirección General de Industria.	Registro/Autorización de instalaciones industriales.	Puesta en funcionamiento
Comunidad Autónoma. Dirección General de Patrimonio o Cultura.	Autorización para ejecución de obra.	Ejecución
Servicios públicos o privados diversos, por ejemplo: ADIF, comunidad de regantes, etc.	Autorización para la ubicación, entrada o cruce a través de caminos de servicio, de obras, infraestructuras o zona de servidumbre. Afecciones, por ejemplo, a canales, caminos de comunidades de regantes, vías férreas, teléfonos, gas, agua, telégrafos, red eléctrica, etc.	Proyecto
Ministerio de Fomento. Unidad de Carreteras.	Autorización para la ubicación, entrada o cruce, de obras e infraestructuras bajo autopista o carretera nacional.	Proyecto
MMA. Dirección General de Costas.	Autorización para la ocupación de la zona marítimo-terrestre en las obras de toma de agua de mar y en las obras de vertido de aguas hipersalinas.	Proyecto
MMA. Organismo de Cuenca.	Autorización de extracción de aguas subterráneas o de mar abierto para la captación de agua de mar.	Ejecución

.../...

.../...

Entidades afectadas	Concepto	Fase
MMA. Dirección General de Calidad y Evaluación Ambiental.	Según el tamaño de la desaladora será necesario un estudio de impacto ambiental y la intervención de la CCAA especialmente en aplicación de la Ley 16/02 de prevención y control integrados de la contaminación.	Proyecto
Organismo de Cuenca intercomunitarias (MMA). Organismo de Cuenca intracomunitarias (CCAA).	Autorización para la ubicación, entrada o cruce, de obras e infraestructuras a través de cauces, canales, zona de policía o afecciones a instalaciones o terrenos del Organismo de Cuenca.	Proyecto
	Autorización para realizar el vertido de aguas hipersalinas por medio de un emisario submarino ¹ .	Proyecto
Autoridad municipal.	Autorización para realizar el vertido de aguas salinas en el alcantarillado municipal.	Proyecto

12. Definiciones, acrónimos y bibliografía

12.1. Definiciones

1. **Abastecimiento:** Conjunto de instalaciones para la captación de agua, conducción, tratamiento de potabilización, almacenamiento, transporte y distribución del agua de consumo humano hasta las acometidas de los consumidores, con la dotación y calidad previstas en la normativa vigente.
2. **Ablandamiento:** Es el proceso por el que se reduce la dureza del agua.
3. **Acometida:** La tubería que enlaza la instalación interior del inmueble y la llave de paso correspondiente con la red de distribución.
4. **Agua agresiva:** Se dice que un agua es agresiva cuando presenta tendencia a disolver el carbonato cálcico. Las aguas agresivas suelen ser también corrosivas.
5. **Agua de aportación:** Es la solución que llega a las membranas de ósmosis inversa. También se le llama «aporte», «agua de entrada», «agua bruta», «solución de aporte o solución a tratar», «agua cruda», «agua de alimentación» y «alimento».
6. **Agua de consumo humano:** Todas aquellas aguas ya sean en su estado original, ya sea después del tratamiento que cumpliendo la legislación vigente en esa materia se utilizan para beber, cocinar, preparar alimentos, higiene personal y para otros usos domésticos y se suministran al consumidor, a través de redes de distribución públicas o privadas, de cisternas, de depósitos públicos o privados, etc.
Todas aquellas aguas utilizadas en la industria alimentaria para fines de fabricación, tratamiento, conservación o comercialización de productos o sustancias destinadas al consumo humano, así como, a las utilizadas en la limpieza de las superficies, objetos y materiales que puedan estar en contacto con los alimentos.
Todas aquellas aguas suministradas para consumo humano como parte de una actividad comercial o pública, con independencia del volumen medio diario de agua suministrado.
7. **Agua destinada a la producción de agua de consumo humano:** aquellas aguas que independientemente de su origen, sufran o no un tratamiento, vayan a ser utilizadas para la producción de agua de consumo humano.

8. **Agua incrustante:** Se dice que un agua es incrustante cuando presenta tendencia a precipitar el carbonato cálcico que contiene.
9. **Agua producto.** Es el agua obtenida en cualquier proceso de desalación.
10. **Anión:** Ión cargado negativamente.
11. **Aparatos de tratamiento en edificios:** Cualquier elemento o accesorio instalado tras la acometida o llave de paso, o en la entrada a la instalación interior o en el grifo del consumidor, con el objeto de modificar u optimizar la calidad del agua de consumo humano.
12. **Autoridad Sanitaria:** Es la administración sanitaria autonómica competente u otros órganos de las Comunidades Autónomas en el ámbito de sus competencias.
13. **Biocidas:** Preparados que contengan una o más sustancias activas, presentados en la forma en que son suministrados al usuario, destinados a destruir, contrarrestar, neutralizar, impedir la acción o ejercer un control de otro tipo sobre cualquier organismo vivo por medios químicos o biológicos.
14. **Catión:** Ión cargado positivamente.
15. **Cianobacterias:** Grupo de microorganismos procariontes (núcleo sin membrana) fotosintéticos con aspecto de algas microscópicas verde-azuladas. Algunos grupos y cepas producen biotoxinas. Pueden desarrollarse en las aguas dulces, salobres, marinas y en humedales.
16. **Conducción:** Cualquier canalización que lleva el agua desde la captación hasta la ETAP, o en su defecto, al depósito de cabecera.
17. **Corte molecular:** Es el peso molecular, expresado en Daltons, a partir del cual una sustancia de tipo macromolecular, es retenida en un 90 % por una membrana.
18. **Depósito:** Todo receptáculo o aljibe cuya finalidad sea almacenar agua de consumo humano ubicado en la cabecera o en tramos intermedios de la red de distribución.
19. **Desalación: También denominada desalinización.** Proceso de separación del agua y las sales de una disolución acuosa. Para el caso de agua salobre puede llamarse también **desalobración**.
20. **Desmineralización:** Eliminación de todos los cationes y aniones de una solución.
21. **Dureza:** Es la suma del contenido en iones calcio y magnesio de una solución.
22. **EDAM: Estación desaladora de agua de mar**
23. **EDAR: Estación depuradora de aguas** residuales.
24. **EDAS: Estación desaladora de aguas** salobres.
25. **Electrodialisis:** Separación de un solvente y un soluto mediante una membrana semipermeable utilizando un campo eléctrico como fuerza

- impulsora. Cuando la polaridad del campo eléctrico cambia periódicamente de sentido se denomina «Electrodiálisis reversible» (EDR)
26. **Estación de tratamiento de agua potable (ETAP):** Conjunto de procesos de tratamiento encaminados a la obtención de agua potable que están situados antes de la red de distribución y/o depósito. Si la planta sólo tiene un proceso simple de desinfección no se considera ETAP.
 27. **Flujo específico:** Caudal de agua que atraviesa la membrana por unidad de superficie.
 28. **Fuente natural:** Las captaciones no utilizadas con fines comerciales y no conectadas a depósitos, cisternas o redes de distribución.
 29. **Gestor y/o Gestores:** persona o entidad pública o privada que sea responsable del abastecimiento o de parte del mismo, o de cualquier otra actividad ligada al abastecimiento del agua de consumo humano.
 30. **IDAM:** Instalación desaladora de agua de mar.
 31. **IDAS:** Instalación desaladora de agua salobre.
 32. **Índice de Langelier (IL):** Medida de la tendencia incrustante o agresiva de un agua. Si $I < 0$ el agua es agresiva. Si $I > 0$, el agua es incrustante.
 33. **Instalación interior:** Es el conjunto de tuberías, depósitos, conexiones y aparatos instalados tras la acometida y la llave de paso correspondiente que enlaza con la red de distribución.
 34. **Membrana semipermeable:** Barrera física selectiva que separa dos sistemas multicomponentes, limitando el transporte de alguna de las especies químicas presentes en una determinada dirección. La separación se produce porque uno o varios componentes pasan en mayor proporción que otros a través de la membrana.
 35. **Microcistinas:** Biotoxinas hepatotóxicas generadas por algunas especies y cepas de cianobacterias (algas verde-azuladas).
 36. **Módulo de ósmosis:** Conjunto de cajas de presión, elementos de membrana, accesorios de interconexión y cierre, etc.
 37. **Nanofiltración:** Proceso similar al de ósmosis inversa pero que utiliza membranas semipermeables menos restrictivas.
 38. **Ósmosis Inversa (OI):** Difusión mediante presión del solvente a través de una membrana semipermeable desde la solución de mayor concentración a la de menor concentración.
 39. **Ósmosis:** Difusión del solvente a través de una membrana semipermeable desde la solución de menor concentración a la de mayor concentración.
 40. **Permeado:** Es la solución que se obtiene al otro lado de la membrana de ósmosis inversa y nanofiltración después de atravesarla. También se le suele llamar «agua osmotizada» o «agua nanofiltrada».
 41. **Plaguicida:** Son los insecticidas, herbicidas, fungicidas, nematocidas, acaricidas, alguicidas, roenticidas, molusquicidas orgánicos; sus meta-

bolitos, productos de degradación o reacción y los productos relacionados como los reguladores de crecimiento.

42. **Porcentaje de recuperación:** Es el cociente, expresado en tanto por ciento, entre el caudal de permeado y el caudal de aportación que llega a las membranas. También se suele llamar «factor de conversión».
43. **Potabilización: Conjunto de procesos físicos y/o químicos que permiten que un agua** captada en la naturaleza se pueda consumir con seguridad y que resulte organolépticamente apropiada.
44. **Potencial REDOX.** Medida, expresada en voltios (V) o en milivoltios (mV), de la capacidad de una especie química para oxidar o ser oxidada por otras. Se toma como valor de referencia cero, el valor correspondiente a la reacción de reducción del hidrógeno: $2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \leftrightarrow \text{H}_2$.
Una masa de agua en la que abunden las especies reductoras (materia orgánica, nitritos, etc.) será más reductora (potencial REDOX más bajo) que otra con pocas especies reductoras y mucho oxígeno disuelto.
45. **Producto de construcción en contacto con agua de consumo humano:** todo producto de construcción, de revestimiento o utilizado en los procesos de montaje de las captaciones, conducciones, ETAPs, redes de abastecimiento y distribución, depósitos, cisternas e instalaciones interiores que estén situadas desde la captación hasta el grifo del consumidor. A los efectos de esta guía, y en este sentido, una desaladora sería equiparable a una ETAP si el agua producida se destina total o parcialmente a consumo humano.
46. **Punto de muestreo:** El lugar preciso donde se toman muestras de agua de consumo humano para el control de su calidad.
47. **Rechazo o Concentrado:** Es la solución, más concentrada que la de aportación, que no puede atravesar la membrana. También se suele llamar «salmuera».
48. **Red de distribución:** Conjunto de tuberías diseñadas para la distribución del agua de consumo humano desde la desaladora, la ETAP o desde los depósitos hasta la acometida del usuario.
49. **Resultado:** El valor cuantificado de un parámetro de calidad físico, químico o microbiológico, realizado con un método de ensayo concreto, y expresado en las unidades de medida fijadas en la normativa de agua de consumo humano.
50. **Retrolavado:** Limpieza de filtros por descarga de agua en contracorriente.
51. **Salmuera:** Agua cargada con sales que se libera como rechazo del proceso de desalación.
52. **SPE:** Polisacáridos extracelulares segregados por microorganismos (bacterias, hongos, levaduras).

53. **Sustancia:** Todo producto (sustancia o preparado) que se agregue al agua o sea empleado en su potabilización o mejora, así como los utilizados para la limpieza de superficies, equipos, recipientes o utensilios que estén en contacto con el agua de consumo humano.
54. **Turbidez:** Aspecto que adquiere un agua cuando contiene partículas coloidales en suspensión. Aunque no todas las partículas provocan turbidez, ésta magnitud puede considerarse como una medida indirecta de los sólidos en suspensión de un agua. La turbidez se mide con un nefelómetro (turbidímetro) y el resultado se expresa en Unidades Nefelométricas de Formacina (UNF), también expresado como NTU (Unidades Nefelométricas de Turbidez). Norma ASTM: D6698-01 Test Method for On-Line Measurement of Turbidity Below 5 NTU in Water. D1889-00 Test Method for Turbidity of Water. UNE-EN ISO 7027: 2001. Calidad del agua. Determinación de la turbiedad.
55. **UPS (Unidades Prácticas de Salinidad):** Dada la dificultad que entraña determinar con exactitud y rapidez la fracción másica de las sales de un agua de mar, se introdujo en 1978 la «Escala Práctica de Salinidad», basada en una Salinidad obtenida a partir del valor de la conductividad del agua marina medida a 15°C y 1 atmósfera de presión. Dicha salinidad práctica no tiene asignada unidades de medida, sin embargo en la literatura científico-técnica suele emplearse la UPS (PSU en inglés).
56. **Valor Paramétrico:** La concentración o el nivel máximo o mínimo fijado por la legislación para cada uno de los parámetros de calidad de agua de consumo humano.
57. **Zona de abastecimiento (ZA):** Área geográficamente definida y censada por la Autoridad Sanitaria a propuesta del gestor del abastecimiento o partes del mismo, no superior al ámbito provincial, en la que el agua de consumo humano provenga de una o varias captaciones y cuya calidad de las aguas distribuidas pueda considerarse homogénea en la mayor parte del año.

12.1.1. Terminología específica de sistemas térmicos de desalación

1. **Agua de mar:** Es la corriente de agua procedente del mar que es introducida en la sección de rechazo de calor ó últimas etapas. Esta corriente una vez caliente y a la salida de la sección de rechazo de calor, se divide a su vez en dos corrientes que son el **rechazo** y la **aportación**. La primera es el de mayor caudal y es la parte de dicha corriente que es

devuelta al mar. La segunda es la parte del agua de mar que es incorporada al ciclo, después del tratamiento químico adecuado.

2. **Bomba de producto:** Es la Bomba que saca el caudal de agua de producto obtenido en el evaporador para enviarlo al tanque de almacenamiento de la planta.
3. **Bomba de purga de salmuera:** Es la bomba que saca el caudal de purga de salmuera del evaporador para devolverlo al mar.
4. **Bombas de reciclado:** Son las bombas que introducen el **reciclado** por el interior de los tubos de la Sección de Recuperación de calor y el **recalentador**.
5. **Condensado:** Es el resultado de condensar en el recalentador de salmuera el vapor motriz, ya que el calor que se aprovecha de este es el calor latente de condensación. Este condensado es devuelto de nuevo al ciclo de vapor del que procede, mediante la **bomba de condensado**.
6. **Equipo de vacío:** Es el equipo que sirve para extraer los gases no condensables del evaporador. Puede ser mediante eyectores de vapor o mediante bomba de vacío de anillo líquido.
7. **Evaporador:** Es el conjunto de cámaras o etapas donde tiene lugar las transferencias de calor y el proceso de evaporación y condensación del vapor. Este a su vez se divide en dos secciones, la sección de rechazo de calor y la sección de recuperación de calor. La primera está formada por las últimas cámaras o etapas del evaporador y es donde está el foco frío del ciclo térmico, es por donde se saca el calor introducido en el foco caliente. La sección de recuperación incluye varias cámaras o etapas, es donde se va evaporando el reciclado y recuperando el calor latente de condensación de dicho vapor, para calentar el reciclado que circula por el interior de los tubos y continuar el proceso.
8. **Factor de concentración:** Se define así al cociente de dividir la concentración del Reciclado, entre la concentración del agua de mar, ambas expresadas en mg/L ó p.p.m.
9. **Gases no condensables:** Mezcla de anhídrido carbónico y aire que se extrae del evaporador para evitar su acumulación en el interior del mismo y por tanto la pérdida de rendimiento.
10. **Producto:** Es la corriente de agua desalada que sacamos del evaporador, es el objeto de la planta desaladora.
11. **Recalentador de salmuera:** Es en realidad un **condensador**, es el foco caliente del ciclo térmico y es donde se aporta la energía necesaria para mantenerlo.
12. **Reciclado:** Es la mezcla de la Aportación con parte de la salmuera procedente de la última etapa y que es introducido en el interior de los tubos de la **sección de recuperación de calor**, por el **recalentador** y

luego en el interior del evaporador para comenzar su evaporación y la producción de agua.

13. **Relación de Economía o Economía o Rendimiento o Economy Ratio (ER):** Se define como la relación entre la cantidad de producto obtenida por cada unidad de calor introducida en el evaporador. Dado que esta definición procede del mundo anglosajón y no es una unidad adimensional, sus unidades son lb-producto/1000 BTU (unidades térmicas británicas). Estas unidades son difíciles de manejar, pero aproximadamente coinciden con kg-producto/kg-vapor, cuando este vapor está en condiciones de saturación y entre 95 y 120°C, que suele ser habitual.
14. **Salmuera o purga de salmuera:** Es la corriente extraída del evaporador para mantener el equilibrio salino, ya que estamos introduciendo constantemente un caudal de agua de mar, la Aportación, que aporta sales al evaporador, si no se saca igual cantidad de sales que se aportan, se irían concentrando en el interior provocando su precipitación. Por ello se extrae una cantidad de salmuera del punto del evaporador donde está más concentrada, que es la última etapa en este caso.
15. **Vapor motriz o vapor de baja o vapor de calentamiento:** Es el vapor procedente de una fuente externa de vapor que se utiliza como alimentación de energía en el foco caliente del ciclo térmico para mantenerlo. Es el trabajo externo que hay que dar al ciclo. Se introduce en el **recalentador de salmuera**.

12.2. Índice de acrónimos

AASS	Autoridades Sanitarias.
CE	Conductividad eléctrica, expresada habitualmente en $\mu\text{S}/\text{cm}$. Mide la capacidad del agua para conducir la corriente eléctrica. Es una valoración indirecta de la concentración salina (STD).
COT	Carbono orgánico total. Medida de la materia orgánica presente en el agua, expresada en mg de C/L. También es conocido por sus siglas en inglés TOC (Total Organic Carbon).
EIA	Evaluación de impacto ambiental.
ED	Electrodiálisis.
EDR	Electrodiálisis reversible.
ISL	Índice de saturación de Langelier o Índice de Langelier.
MES	Materia en suspensión. En ocasiones se utiliza el concepto análogo de SST (Sólidos en suspensión totales).

MTBE	Éter metil terc-butílico. Aditivo empleado con las gasolinas para subir el octanaje.
NF	Nanofiltración.
OI	Ósmosis inversa.
PPM	Partes por millón.
PTM	Presión transmembrana.
PVA	Programa de Vigilancia Ambiental.
SAR	Sodium Adsorption Ratio. Son las siglas, en inglés, de la relación de adsorción de sodio (RAS en español). Expresa la concentración relativa de sodio respecto al calcio y al magnesio de un agua. Se emplea para valorar la aptitud de un agua para riego y se calcula mediante la expresión siguiente:

$$RAS = \frac{[Na^+]}{\sqrt{([Ca^{+2}] + [Mg^{+2}])/2}}$$

donde la letra r, indica que las concentraciones iónicas vienen dadas en meq /L.

SDI - SDI₁₅	Silt Density Index, Índice de fouling o Índice de atascamiento. Es una medida indirecta de la presencia de materia particulada o coloidal en el agua capaz de colmatar o atascar las membranas. Ver definición completa en el apartado 3.1.
SDSI	Índice de saturación de Stiff y Davis. Igual que el índice de Langelier, pero aplicado al agua de mayor salinidad, como el agua de mar.
STD	Sólidos Totales Disueltos. Medido en mg/L de la cantidad de elementos disueltos en el agua.
THM	Trihalometanos. Compuestos orgánicos halogenados. Cloroformo, bromoformo, diclorobromometano y dibromoclorometano.
UFC	Unidades formadoras de colonias.
UNF	Unidad nefelométrica (unidad de medida de la turbidez muy utilizada).
VOCs o COVs	Sustancias organohalogenadas volátiles o Compuestos orgánicos volátiles

12.3. Bibliografía

- American Water Works Association Research Foundation, Lyonnaise des Eaux, Water Research Commission of South Africa (1998). «Tratamiento del agua por procesos de membrana». Mc. Graw Hill. Madrid.
- AWWA, Lyonnaise des Eaux, Water Research Comisión of South Africa. (1998). Tratamiento del agua por procesos de membrana. Principios, procesos y aplicaciones. McGraw Hill.
- Brun, J.P ; (1989). Procédés de séparation par membranes. Ed. Masson.
- Casañas González, Antonio. (2001). «Curso de Desalación AEDyR: Membranas de O.I. Evolución de la tecnología, composición y gama de membranas». Dow Liquid Separations.
- Custodio,E; Llamas, MR. (1983). «Hidrología Subterránea». Editorial Omega, 2ª edición.
- Dow Liquid Separations. (2003). «Dowex Ion Exchange Resins: Water Conditioning Manual».
- Fariñas Iglesias, Manuel. (1999). «Ósmosis Inversa. Fundamentos, tecnología y aplicaciones». Mc. Graw Hill/Iberdrola/Ente Vasco de la Energía.
- FilmTec - Dow Liquid Separations (2004). «FILMTEC™ Membranes Technical Manual».
- Fondo documental de Hydranautics.
- Fondo documental de Koch.
- Fondo documental de Nalco.
- Fondo documental de Osmonics.
- Fondo documental de Veolia Water Systems.
- Grasshoff, K; Kremling, K; Ehrhardt, M. (1999). «Methods of Seawater Analysis». WILEY Verlag– VCH, third edition.
- Guidance to applicants seeking approval of products and processes for use in the treatment and provision of public water supplies». 2002. Committee on products and processes for use in public water supply. Drinking Water Inspectorate. DEFRA. Department for Environment, Food & Rural Affairs. 86 pp.
- Medina San Juan, José Antonio. (1999). «Desalación de aguas salobres y de mar. Ósmosis Inversa». Mundi Prensa. Madrid.
- Mulder, Marcel. Basic Principles of Membrane Technology.(1997) Kluwer Academic Publishers.
- Ninyerola M, Pons X y Roure JM. (2005). «Atlas Climático Digital de la Península Ibérica. Metodología y aplicaciones en bioclimatología y geobotánica». ISBN 932860-8-7. Universidad Autónoma de Barcelona, Bellaterra. En línea: [<http://www.opengis.uab.es/wms/iberia/index.htm>] Último acceso: 22/09/2008.

- Norma ASTM Método D 4472-89 «Recordkeeping for Reverse Osmosis System».
- Norma ASTM: D6698-01 «Test Method for On-Line Measurement of Turbidity Below 5 NTU in Water. D1889-00 Test Method for Turbidity of Water». UNE-EN ISO 7027: 2001. Calidad del agua. Determinación de la turbiedad.
- Nosenzo, G. «Ultra and Microfiltration with FLAMEC FILTER». FILTERPAR Bergamo (Italy).
- Pérès, J.M. y colaboradores. «La Polución de las aguas marinas». Versión en lengua española del original en lengua francesa a cargo de J. Ripoll Ricart. Ediciones Omega, S.A., Barcelona 1980.
- Schäfer, A.I; Fane, A.G; Waite, T.D. (2005). «Nanofiltration. Principles and Applications». Elsevier.
- Technical Manual FILMTEC Membranes. Dow Liquid Separations.

12.3.1. Normativa de referencia

- Real Decreto 140/2003, de 7 de febrero, por el que se establecen los **critérios sanitarios de la calidad del agua de consumo humano**. (BOE 45 del 21/02/2003).
- Corrección de erratas Real Decreto 140/2003 (BOE 54 del 4/03/2003).
- Orden SCO 1591/2005, de 30 mayo sobre el **Sistema de Información Nacional de Agua de Consumo**. (BOE 131 del 2/06/2005).
- Orden SCO 2967/2005, de 12 de septiembre por la que se amplía la de 21/07/1994, que regula los ficheros de datos de carácter personal, gestionados por el Ministerio Sanidad y Consumo, y se crea el fichero del Sistema de información nacional de agua de consumo. (BOE 229 del 24/09/2005).
- Orden SCO 3719/2005, de 21 de noviembre sobre **sustancias para el tratamiento del agua destinada a la producción de agua de consumo humano**. (BOE 287 del 1/12/2005).
- Reglamento (CE nº 1907/2006) de 18 de diciembre del Parlamento Europeo y del Consejo relativo al **Registro, Evaluación, Autorización y Restricción de las sustancias y preparados químicos (REACH)**.
- Real Decreto Legislativo 1/2008, de 11 de enero, por el que se aprueba el texto refundido de la Ley de Evaluación de Impacto Ambiental de proyectos (BOE nº 23 de 06/01/2008).

12.3.2. Recursos útiles en Internet

- Ministerio de Sanidad y Política Social. (MSPS) <http://www.msps.es>
- Asociación Española de Abastecimiento y Saneamiento. (AEAS). <http://www.aeas.es>

- Asociación Española de Normalización. (AENOR) <http://www.aenor.es>
- Asociación Española de Empresas de Tratamiento y Control de Aguas. (AQUAESPANA) <http://www.aquaespana.org/>
- Asociación Española de Desalación y Reutilización. (AEDyR). <http://www.aedyr.com>
- Hispagua. Sistema Español de Información sobre el agua. <http://hispagua.cedex.es>
- Desalination. Water Sanitation and Health. Organización Mundial de la Salud. http://www.who.int/water_sanitation_health/gdwqrevision/desalination/en/

Madrid, 28 de noviembre de 2008.

El control sanitario del agua de consumo humano es un objetivo prioritario de la salud pública. Las enfermedades relacionadas con la contaminación del agua de consumo tienen una gran repercusión sobre la salud de las personas. Las medidas destinadas a mejorar la calidad del agua, mejoran significativamente la salud y por ello la finalidad principal de esta guía es la de elevar la protección de la salud pública.

Al tener la desalación una presencia muy significativa en nuestro país, el Ministerio de Sanidad y Política Social, consciente de la gran importancia que está cobrando la producción de agua destinada al abastecimiento humano por medio de la desalación en España, ha querido aportar mediante el presente trabajo información práctica sobre sus aspectos sanitarios y técnicos.

El presente trabajo no pretende ser un manual de desalación ni un libro técnico, sino que su objetivo es el de plantear una introducción práctica de como tienen lugar los procesos de desalación, y de que manera incidir para salvaguardar la salubridad del agua destinada a consumo humano producida mediante estas tecnologías. La motivación principal ha sido desarrollar una guía práctica especialmente dedicada a técnicos sanitarios de las Comunidades Autónomas y a los abastecedores de agua de consumo.

