DESALACION DE AGUAS SALOBRES Y DE MAR

OSMOSIS INVERSA

JOSE ANTONIO MEDINA SAN JUAN

DESALACION DE AGUAS SALOBRES Y DE MAR

OSMOSIS INVERSA

Ediciones Mundi-Prensa
Madrid • Barcelona • México
2000

Grupo Mundi-Prensa

• **Mundi-Prensa Libros, s. a.**
Castelló, 37 - 28001 Madrid
Tel. 914 36 37 00 - Fax 915 75 39 98
E-mail: libreria@mundiprensa.es
Internet: www.mundiprensa.com

• **Mundi-Prensa Barcelona**
• **Editorial Aedos, s. a.**
Consell de Cent, 391 - 08009 Barcelona
Tel. 934 88 34 92 - Fax 934 87 76 59
E-mail: barcelona@mundiprensa.es

• **Mundi-Prensa México, s. a. de C. V.**
Río Pánuco, 141 - Col. Cuauhtémoc
06500 México, D. F.
Tel. (+52)-5-533 56 58 - Fax (+52)-5-514 67 99
E-mail: 101545.2361@compuserve.com

Depósito legal: M. 47.007-1999
ISBN: 84-7114-849-8

IMPRESO EN ESPAÑA-PRINTED IN SPAIN

Imprime: Artes Gráficas Cuesta, S. A. - Seseña, 13 • 28024 Madrid

PROLOGO

Desalación, una técnica que en la última década ha devuelto la esperanza a numerosos pueblos que veían cómo sus recursos hídricos inexorablemente se iban agotando, limitando por tanto su desarrollo e incluso su supervivencia.

La escasez de agua y su mala calidad ha sido una constante preocupación en el devenir de numerosos pueblos a lo largo de la Historia, pero en la última década del siglo XX se ha hecho más patente, debido al crecimiento vegetativo de la población sobre la tierra, a la mejora de sus niveles de vida que demandan más agua, y a la importancia que los medios de comunicación han dado al tema, permitiendo su divulgación en todos los ámbitos, y concienciando a los ciudadanos sobre las consecuencias que en distintos lugares del mundo se derivan de este problema.

Pero aunque esa tendencia es previsible que vaya a continuar en las próximas décadas, a finales del presente siglo debemos ser más optimistas que hace 50 años, puesto que al menos en el mundo desarrollado ya se dispone de medios tecnológicos que pueden servir para paliar sus efectos.

Y es que la desalación, aunque utilizada con anterioridad, ha experimentado en las dos últimas décadas y especialmente en la última, unos avances notables y ha tenido en consecuencia un auge nunca antes conocido.

Sin embargo, siendo una tecnología con un espléndido presente y un todavía más prometedor futuro, no es demasiada la información que existe a disposición del técnico o interesado, y cuando éste la encuentra en la mayoría de los casos tiene que acudir a artículos o capítulos dispersos en diferentes publicaciones, libros y revistas técnicas principalmente, y generalmente, escrita en inglés.

Parece, pues, llegado el momento de recopilar esa información y ponerla a disposición de los técnicos de habla castellana, y eso es lo que se ha pretendido con este libro, reunir los conocimientos básicos sobre este tema que ayuden a la formación y perfeccionamiento de unos técnicos especializados, cuya demanda por parte de la sociedad va a aumentar de forma significativa en los próximos años.

No dudamos que la desalación de aguas despierta un gran interés, que se va a acrecentar a medida que se va haciendo más patente en muchos países la escasez de recursos hídricos naturales.

Ante esa perspectiva nos hemos atrevido a intentar responder en esta publicación a las preguntas más frecuentes que se hace el que se inicia en esta disciplina, aportándole la información precisa sobre el particular, pero también dándole a conocer los aspectos prácticos o descriptivos de las instalaciones, que el autor ha ido sedimentando a lo largo de los últimos 15 años de dedicación al tema.

Sin embargo, con el fin de animar al lector, se han tratado de exponer los distintos aspectos de una manera simple, prescindiendo en cuanto ha sido posible de complejos formulismos o teorías, que el estudioso podrá encontrar en otros tratados más académicos que el que aquí se trata de presentar.

El libro se ha estructurado de una forma lógica, de modo que el lector se inicia en el conocimiento del agua que se quiere desalar, para a continuación de una forma pausada irse adentrando en los distintos elementos que componen cualquier instalación, y seguidamente tratar de ilustrarle sobre los aspectos a tener en cuenta en el diseño de instalaciones, los principales parámetros que intervienen en el mismo o los criterios que deben manejarse.

Sin embargo, no solo el diseño de una instalación es importante, sino que en muchos casos la obtención de un rendimiento óptimo de la misma depende en gran medida de la forma en que se opera aquélla, por lo que se ha considerado necesario dedicar a ello un amplio apartado.

Por último, se abordan los aspectos económicos que deben presidir cualquier diseño o instalación y la especial consideración que en un mundo en que los recursos energéticos están en entredicho, debe darse al consumo de energía. Los dos últimos capítulos del libro se ocupan de estos aspectos.

Creemos que este libro es la mejor manera de contribuir a la expansión y mejora de la tecnología y de ayudar a la formación de nuevos profesionales, cuya aportación va a seguir siendo decisiva en los próximos años para avanzar en estos procesos, antes alejados, pero hoy al alcance de cualquier usuario.

EL AUTOR

INDICE

Capítulo 1

INTRODUCCION

1.1. Generalidades

Siendo el agua un factor esencial para la vida y para las actividades económicas que se desarrollan sobre la tierra, sólo ocupa un pequeño lugar, sin apenas importancia en las estadísticas macroeconómicas y en la geografía económica de las materias primas y de los recursos naturales.

El agua supone una limitación importante para el desarrollo de los pueblos, debido a la dependencia que respecto a la misma tienen tanto la agricultura, como la industria o la población.

Los países con mayores recursos hídricos son potencialmente los más ricos, sin embargo en la práctica no siempre es así, debido a que la tecnología juega cada vez un papel más importante para superar esa dificultad.

El ahorro de agua en los sectores más consumidores, la utilización de tecnologías de riego avanzadas, la depuración de aguas para evitar la contaminación, y por último la *desalación* como forma de incrementar los recursos hídricos permiten un desarrollo adecuado al margen de esa dependencia del agua, pero esto supone la inversión de enormes cantidades de dinero que no todos los países pueden hacer. En consecuencia se puede comprobar que en los países ricos los recursos económicos permiten superar los problemas de agua, mientras que en los pobres la falta de agua impide la generación de recursos económicos.

Para acercarnos un poco a la realidad de la desalación debe partirse de cual es la realidad hídrica del Planeta que en su mayor parte está ocupada por los mares y océanos, donde se encuentra el 97 % del agua disponible.

El restante 3 %, que no es agua de mar, sería el agua que podría utilizar la población de la tierra, estimada en unos 3.000 millones. La realidad nos dice que sin embargo, de esta pequeña cantidad, sólo un 13 % constituye el agua realmente disponible.

No resulta por tanto paradójico que existan problemas de agua en el mundo, aún cuando ésta constituye la mayor parte del mismo, pues la forma en que se encuentra el agua, en un gran porcentaje no permite su utilización de una manera directa por la población.

Si observamos cual es esa situación a nivel individual veremos que los nueve países del mundo con mayor disponibilidad de recursos de agua son (I. Shiklomanov. Unesco, 1996) los siguientes:

País	*Km³/año*
Brasil	6.220
Rusia	4.059
USA (con Alaska)	3.760
Canadá	3.290
China	2.800
Indonesia	2.530
India	1.200
Colombia	1.200
Perú	1.100

En comparación con éstos, la totalidad de la Unión Europea recibe 1.171 km³/año

En el otro extremo, los países más pobres en agua, según la misma fuente, son:

País	*Millones m³/año*
Kuwait, Bahrein	Recursos nulos
Malta	15
Gaza	46
Emiratos Arabes Unidos	500
Libia	600
Singapur	600
Jordania	680
Israel	750
Chipre	900

La escasez de agua es un fenómeno relativamente reciente en la historia. En los años 50 afectaba a un pequeño número de países, pero a finales de los 90 afecta ya a unos 26 países con una población de 300 millones, y las proyecciones que se hacen para el año 2050 estiman que el problema afectará a 66 países que concentrarán los 2/3 de la población mundial y algunos de estos países están bañados por el mar.

Pero, además, sus efectos se dejan sentir en la estabilidad social y consecuentemente en la estabilidad política y en la preservación de la vida.

En el pasado, esta limitación obligaba a la emigración de pueblos enteros y al abandono de sus hábitats, de forma que la Historia es abundante en ejemplos

de zonas de asentamiento de poblaciones al borde de las fuentes de agua, ríos o lagos, y que tras períodos de florecimiento emigran a otros lugares, no por la presión de pueblos vecinos, lo que en el pasado era frecuente, sino por el agotamiento del recurso, o lo que es más frecuente, el deterioro de la calidad del agua disponible hasta niveles en que su uso impide obtener cosechas en la agricultura básica de subsistencia o incluso hasta impedirle sus necesidades básicas de consumo.

La región del Tigris-Eúfrates es un ejemplo de hace siglos, que puede consultarse en los libros de Historia, ya que siendo la zona en que presumiblemente se desarrollan los primeros focos de civilización sobre la tierra, es abandonada posteriormente por no poder mantener la población existente, a causa de la salinización de los terrenos que se producen por las sales que se han ido incorporando a la tierra con el agua de riego.

Pero casos más recientes también existen, como las miles de hectáreas de los regadíos establecidos a principios de este siglo en la India, China o Pakistán.

La supervivencia biológica no es un problema en el mundo puesto que la totalidad de las necesidades domésticas (beber, lavarse y cocinar) pueden cubrirse con unos 100 litros por persona y día, aproximadamente la cantidad que se emplea en una ducha, y 100 l/día equivalen a 35 m^3 por persona y año.

Incluso los países más áridos del mundo tienen pocos problemas para proporcionar esta cantidad mediante recursos convencionales. Malta, que es uno de los países más secos del mundo, tiene el equivalente a 70 m^3/persona y año.

Sin embargo Malta, como tantos otros lugares, cubre el exceso sobre sus necesidades vitales, que son sus necesidades de desarrollo, mediante la desalación.

La escasez de agua además suele ir unida a la mala calidad de la misma y siendo el contenido del agua, es decir sus sales, lo que ha provocado estas situaciones y aunque a lo largo de los siglos existen referencias a intentos de obtener agua dulce a partir del agua salada, puede decirse que es realmente en este siglo cuando esos intentos se plasman en tecnologías que adquieren fiabilidad y que garantizan ese proceso de transformación.

Sin embargo, los avances tecnológicos en la desalación del agua han sido muy lentos, y además han resultado muy caros, no siendo asequibles durante años a la mayoría de las poblaciones que necesitaban de ellos.

Sólo en años más recientes se han superado esos grandes inconvenientes, de manera que hablar hoy día de desalación, especialmente en países áridos, es algo que se considera bastante normal.

La búsqueda de procesos o tecnologías que permitieran desalar agua se dirigieron inicialmente hacia la fuente más abundante, es decir el agua de mar, de manera que la palabra desalación estaba indisolublemente ligada a este tipo de agua.

Las tecnologías de evaporación empezaron a utilizarse en regiones completamente aisladas, sin otro tipo de recursos que no fuera el mar como ocurre en determinadas islas del Caribe o el Atlántico, o en aquellas otras que disponían de enormes recursos energéticos, dado que para desalar agua es necesario la utilización de energía en una u otra forma.

Pero ante la imposibilidad económica de acceder al agua de mar a través de la desalación que existía en numerosos lugares, la escasez de recursos de aguas superficiales y posteriormente la sobreexplotación de los recursos subterráneos, que no sólo desaparecieron en numerosos lugares sino que además quedaron deteriorados en su calidad en otros muchos, las investigaciones se volcaron posteriormente en la investigación de sistemas que permitieran la recuperación de estas aguas, cada vez más abundantes. Tras el descubrimiento de distintos tipos de membranas que permitían la «purificación» o desalación de dichas aguas, se prosiguió con el desarrollo de membranas similares que permitieran también hacer potable el agua de mar.

Superada esta fase, la tecnología de desalación se ha ido extendiendo por todo el mundo, de forma que en la actualidad se está familiarizado con términos relativos a estos procesos, que hace algunos años era incluso necesario buscar en los diccionarios, para entender con más precisión de qué se estaba hablando.

El principal contaminante del agua son las sales y dado que la agricultura es el sector que más volúmen de agua emplea, los problemas de contaminación por sales son muy frecuentes en el mismo.

Del enorme volumen de agua de mala calidad existente y que viene siendo utilizado con fines fundamentalmente agrícolas es fiel reflejo la existencia en la actualidad en el mundo de unos 50 millones de ha con problemas de salinidad.

La desalación se ofrece como una herramienta más de cara al futuro que puede ayudar a evitar la repetición de esos problemas, que han dejado no solo las tierras inservibles, sino a las poblaciones al borde de la miseria.

Pero no solo la agricultura está empezando a utilizar la tecnología de desalación para conseguir su supervivencia en determinadas zonas, sino que anteriormente la industria, más exigente en cuanto a la calidad del agua que precisa, y después los abastecimientos urbanos han sido los grandes beneficiarios de los avances conseguidos en el campo de la desalación.

El descubrimiento de membranas capaces de separar sales ha sido trascendental para el abaratamiento de los costes, pero además ha puesto a disposición de los técnicos una tecnología más accesible que las que se utilizaban anteriormente.

De éstas, conocidas en su sentido más amplio como membranas de ósmosis inversa, y de toda la tecnología desarrollada en torno a ellas, para permitir optimizar su uso, nos ocuparemos en los distintos capítulos de este libro.

1.2. Los procesos de separación

Hablar de desalación o eliminación de sales es hablar de los procesos de separación que buscan la eliminación de los elementos que contiene un agua, sean de naturaleza física o química, y que plantean dificultades para su utilización con unos u otros fines.

De acuerdo con esos sistemas, para producir la eliminación o separación es necesario que exista algún elemento que actúe de barrera. Estas barreras físicas son las que constituyen la base de la mayoría de los procesos de separación que se realizan en la actualidad.

El elemento separador se conoce en unos casos como filtro y en otros como membrana, en función del tamaño de las partículas que es capaz de separar. Cuando se trata de desalar, es decir separar los componentes químicos o iones del agua, su tamaño es tan pequeño que bajo esta perspectiva que hemos descrito son necesarias las membranas.

Pero la desalación no sólo se logra mediante la interposición de una barrera que obstaculice el paso de sales, otros procesos existentes no utilizan un elemento físico separador y sin embargo también realizan la separación de sales. En consecuencia, si los procesos de separación los circunscribimos al hecho de utilizar una barrera física, no podrían considerarse técnicas de separación las distintas tecnologías de desalación por destilación, también utilizadas en la actualidad, en las que solo la evaporación del agua y la posterior condensación del vapor formado producen la eliminación de sales, o la más experimental de cristalización.

Quizás por ello sea más oportuno referirse a procesos de separación por membranas frente a la separación por otros procedimientos. A estos primeros es a los que nos vamos a referir a lo largo de este libro.

Lo que se conoce por separación por membranas, o tecnología de membranas, incluye todos aquellos procesos que se han desarrollado a lo largo de los años y cuyo objetivo es la separación de algún componente de una solución, sea éste sólido en suspensión, elementos en solución o iones, mediante la utilización de algún tipo de membrana.

En esta gama tan amplia de procesos se incluyen por tanto desde las más elementales formas de filtración hasta las más sofisticadas de ósmosis inversa.

En muchas parcelas de la técnica en general, cuando se habla de procesos de separación se piensa fundamentalmente en la eliminación de elementos sólidos, de tamaño muy reducido si se quiere, pero que no superan el nivel macromolecular.

Los primeros sistemas de filtración de uno u otro tipo fueron ya introducidos en el siglo pasado y algunos de ellos se mantienen sin demasiados cambios, como no sea el mejor conocimiento de los procesos y una investigación de los equipos o materiales a utilizar, que ha redundado en un aumento de la eficiencia.

Sin embargo, los avances en este siglo dentro del citado campo han sido relevantes, de manera que la separación a nivel micromolecular o iónico es hoy día una realidad.

Por eso resulta imprescindible referirnos a los cuadros 1 y 2 que se incluyen a continuación, en los que se puede ver claramente el tamaño de las partículas existentes en el agua y el grado de separación que se cubre con las diferentes tecnologías y por consiguiente se deduce la aplicación de cada una de ellas.

CUADRO 1

Tamaño de los compuestos existentes en el agua

Componentes	*Dimensiones en micras*	*Tamaño*
Algas	700-1	Particular
Arenas	2000-100	Particular
Limos	100-20	Particular
Arcillas	10-0,1	Particular
Polen	60-20	Particular
Acidos húmicos	0,005-1	Macromolecular
Negro de humo	0,02-,08	Molecular
Bacterias	0,7-80	Macromolecular
Virus	0,003-0,03	Molecular
Sales disueltas	0,0008-0,004	Iónico
Iones metálicos	< 0,0006	Iónico

CUADRO 2

Selectividad de los procesos de separación

Proceso	*Grado de separación en micras*
Filtración multicapa	> 100
Filtración cartuchos	> 1
Filtración sobre precapa	> 0,5
Microfiltración	> 0,1
Ultrafiltración	> 0,01
Nanofiltración	0,001 - 0,01
Osmosis Inversa	< 0,04
Electrodiálisis	< 0,03

Aunque son los procesos de separación que realizan la eliminación de sales los que nos interesan, hay otros procesos que sin llegar a nivel de separación de iones han jugado también un importante papel en los procesos de adecuación de un agua para determinados usos.

Sin embargo, conviene hacer una distinción entre los distintos procesos que se enumeran.

En unos casos la totalidad o casi la totalidad del agua que se pasa por la membrana es recuperada como producto, respondiendo así al tipo que se considera tradicionalmente como filtración directa. La membrana deja pasar el líquido, pero no los elementos que lleva. A este tipo responden la filtración, microfiltración y ultrafiltración.

En otros el agua al llegar a la membrana incide en ella transversalmente *(cross-flow filtration)* y se divide en dos flujos o corrientes, una que atraviesa la membrana y otra que circula sobre la superficie de la misma.

La separación que realiza la membrana no es en este caso de elementos sólidos sino de iones. Nos encontramos pues con la ósmosis inversa y su variante de nanofiltración.

Por último, aparece en el citado cuadro la electrodiálisis, un proceso también de membranas que permiten el paso de iones con una determinada carga pero no los de carga contraria.

1.3. Introducción a la desalación

Aunque la desalación entendida en sentido amplio se considera como un proceso de separación de las sales de una solución, su extensión a las tecnologías existentes permite distinguir entre procesos que separan el agua de las sales y los que realmente efectúan la separación de sales de la solución.

Pero entendido en uno u otro sentido, el proceso de separación de sales, del agua en que se encuentran disueltas, requiere de una u otra forma energía y es precisamente la forma en que se aplica esta energía uno de los elementos diferenciadores de estos procesos.

En unos procesos se utiliza el vapor como fuente principal para eliminación de las sales. Se trata de los procesos conocidos con el nombre genérico de destilación y de los que se han desarrollado tres tecnologías principales: Destilación Súbita Multietapa (MSF), Destilación Multiefecto (MED) y Compresión de Vapor (CV), cada uno de ellos con distintas variantes. En otros casos la energía utilizada es la carga eléctrica, respondiendo a este tipo la Electrodiálisis (ED). Por último el sistema más divulgado utiliza la presión y tenemos la Osmosis Inversa (OI). Teniendo en cuenta los aspectos mencionados se ha confeccionado el cuadro 3 que recoge todas las tecnologías de desalación, algunas de ellas en plan experimental, que hoy día se utilizan.

Como su nombre indica desalar es el proceso contrario a salar, es decir quitar sales de un líquido.

En la literatura castellana, sin embargo, aparece con frecuencia otro término «desalinizar», también correcto gramaticalmente, pero que creemos puede inducir a confusión, especialmente cuando se mezcla o se analiza conjuntamente el agua con el suelo.

CUADRO 3

Clasificación de los procesos de desalación

Clase de separación	*Energía utilizada*	*Proceso*	*Sistema*
Separación agua de sales	Vapor	Evaporación	Destilación solar Destilación súbita simple Destilación en tubos sumergidos Destilación súbita multietapa Destilación multiefecto de tubos horizontales Destilación multiefecto de tubos verticales Compresión mecánica de vapor Termocompresión de vapor
	Frío	Cristalización	Formación de hidratos Congelación
	Presión	Membrana	Osmosis Inversa
Separación sales del agua	Carga eléctrica Atracción química	Membrana selectiva Resina	Electrodiálisis Intercambio iónico

Aunque según el diccionario de la Real Academia tanto un término como otro son válidos, precisa que se habla de desalar cuando se refiere... al proceso y de desalinizar cuando... es a la tecnología concreta. Vamos a emplear siempre en este texto el término desalar por otra razón que creemos importante.

En la literatura y ciencia agronómica, cuando un suelo tiene un contenido elevado de sales decimos que se ha salinizado, por tanto el proceso de lavado y drenaje del suelo, que lo que hace es reducir su contenido en sales, sería una desalinización. Es decir, aplicaríamos desalinizar para eliminar las sales de un suelo y desalar para eliminar las sales del agua.

Como las primeras civilizaciones fueron eminentemente agrícolas ellas fueron las que primero sufrieron los efectos de la salinización.

Del mismo modo que el agua de mar no se empleaba nunca para regar, porque tenía «algo» que impedía el crecimiento de las plantas, también se sabía que había otras aguas distintas, cuyo sabor era diferente, y que sí permitían el riego.

También se conocía que dentro de estas aguas distintas de la de mar que permitían el riego, no todas tenían el mismo efecto sobre los cultivos, y en consecuencia las plantas no respondían del mismo modo en su desarrollo ni tenían las mismas producciones.

Posteriormente se tuvo conocimiento acerca de lo que causaba ese descenso o incluso desaparición de las producciones, es decir de la existencia de sales disueltas en el agua; pero lo que seguía sin saberse en cambio era hasta qué nivel de salinidad las aguas podían ser utilizadas sin producir efectos perjudiciales en los cultivos.

Esto llevaba a utilizar aguas cada vez de peor calidad hasta que los efectos resultantes eran ya irreversibles, tanto en el suelo que quedaba «salinizado» como en los cultivos.

Los mismos problemas se presentaban respecto a ese agua cuando se utilizaba para beber. Es lógico por tanto que desde aquellos remotos tiempos existieran intentos de mejorar la calidad del agua, y existen referencias escritas al respecto, aunque consecuentemente los resultados que se obtenían no podían ser muy positivos.

Una primera fase de esta «desalación» fue la mezcla con otras aguas de mejor calidad que reducía el contenido salino medio del agua resultante. Sin embargo, ¿podría hablarse propiamente en estos casos de desalación? De acuerdo con el criterio expresado más arriba, no se trataría evidentemente de una desalación.

Lo que hoy en día y desde un punto de vista técnico consideramos como desalación es una tecnología o proceso tecnológico que permita esa separación de las sales del agua, lo que inevitablemente supone la utilización de alguna fuente de energía.

1.4. Evolución y situación actual

Desde esos primeros intentos, el desarrollo de la tecnología de la desalación ha sido muy importante a lo largo de los años. La escasez de recursos en muchos lugares del mundo junto al crecimiento de la población ha influido de forma importante en la implantación de estas tecnologías, pero además el progreso de la sociedad industrial ha llevado a exigencias cada vez más notables en todos los campos respecto a la calidad del agua.

La desalación, que inicialmente tuvo una aplicación fundamentalmente para usos urbanos o domésticos, ha derivado posteriormente hacia otros como la industria y posteriormente la agricultura y esto se ha debido principalmente a la irrupción de nuevas tecnologías más baratas y sencillas de implantación y de menor consumo energético. Debe resaltarse que éste ha sido el principal motor de la investigación. La dependencia energética que tienen todas las tecnologías llevó a partir de los años 60 a buscar un ahorro energético, que hasta entonces no había sido tenido muy en cuenta.

Las nuevas tecnologías han conseguido reducir a un tercio el consumo de energía en las instalaciones de agua de mar en los últimos 25 años y a una décima parte en las instalaciones de agua salobre.

Precisamente estos pasos adelante son los que han permitido que la desalación haya podido llegar a zonas aisladas y con recursos económicos limitados y al sector agrario donde el imput agua no tiene la repercusión que tuvo en tiempos pasados.

Aunque la desalación con fines de abastecimiento urbano, especialmente en el caso de agua de mar, sigue siendo la más importante por el tamaño de sus instalaciones y la capacidad total instalada, en los países industrializados las instalacio-

nes de desalación con destino a la industria son muy numerosas y desde luego más importantes que las de agua urbana.

En términos generales puede decirse que las instalaciones de desalación para el abastecimiento urbano están principalmente en los países del Golfo Pérsico, los países árabes del Mediterráneo y la zona sur de Italia y España, sobre todo las Islas Canarias en este último; mientras que las instalaciones industriales están preferentemente en Estados Unidos, Japón y los países de la Unión Europea.

Unas cifras que explican hasta qué punto la desalación se ha extendido por el mundo, vienen referidas en la actual capacidad de las plantas desaladoras instaladas que supera los 26 Hm^3/día o 9.000 millones de m^3 al año, y la construcción de nuevas instalaciones en países que hace algunos años apenas tenían problemas de suministro o en zonas fuera de las áreas de influencia tecnológica que han presidido el desarrollo de la desalación en tiempos pasados.

España no ha quedado al margen de estos desarrollos, ya que tratándose de un área geográfica con desequilibrios estacionales y locales importantes, desde muy pronto y en zonas aisladas como las islas, se empezaron a construir instalaciones para producir agua dulce a partir del agua de mar hace más de 30 años.

No es por tanto sorprendente que en conjunto, la desalación de aguas salobres y de mar supongan en nuestro país una aportación al ciclo hidrológico de más de 200 Hm^3/año.

Este total puede distribuirse de la siguiente forma:

— Agua de mar: 40 %

— Agua salobre: 60 %

Pero si nos hacemos eco a escala mundial, veremos que la mayor capacidad instalada del mundo se encuentra en estos momentos en los países árabes del Golfo Pérsico. En dicha área se dan simultáneamente dos circunstancias que han facilitado dicha construcción como son :

— La existencia de un clima desértico con escasez de recursos hídricos.

— La disponibilidad sin límites de petróleo, o lo que es lo mismo la existencia de fuentes de energía muy baratas.

Si las grandes instalaciones se construyeron a partir de los años 60 en aquellos países y con tecnologías de evaporación, tras unos años de transición, en los últimos cinco años se vuelven a construir grandes instalaciones pero donde ya no solo se utilizan tecnologías de vapor sino también de membranas.

Estas grandes instalaciones, generalmente de agua de mar, dedicadas al abastecimiento urbano contrastan con las existentes en Estados Unidos, que es el cuarto país del mundo en cuanto a capacidad instalada, pero en el que predominan las instalaciones más pequeñas, de aguas salobres, y dedicadas a usos industriales.

En nuestro país, donde las primeras instalaciones eran de agua de mar y con destino al abastecimiento urbano y turístico, también se ha producido un cambio en la tendencia y aunque las grandes construcciones continúan teniendo dicho objetivo, las instalaciones industriales y especialmente las dedicadas a riego agrícola son muy numerosas. Es de destacar la importancia de la utilización de la desalación con fines agrícolas en nuestro país, a consecuencia de la sequía de los últimos años, ocupando un puesto preeminente en la desalación mundial en este sector.

1.5. Cifras características

Aunque el inicio en forma comercial de las distintas tecnologías no se ha producido de forma simultánea, siendo bastante más antigua la destilación y desarrollándose posteriormente la ósmosis inversa y por último la electrodiálisis, a lo largo de los años cada tecnología se ha ido adaptando en lo posible a las necesidades del momento, tratando de responder de la forma más eficiente mediante el aprovechamiento de sus propias peculiaridades.

En una primera etapa se produce un desarrollo muy importante de los procesos de destilación, que se implantaron sobre todo en países en los que no era posible disponer de otra fuente de agua natural, y fundamentalmente para abastecer poblaciones y en menor escala industrias.

Posteriormente se ha ido evolucionando hacia otra situación en la que la desalación se contempla, no como una fuente única, sino como una fuente alternativa de abastecimiento, que aunque más cara que otras, puede justificarse en función de una serie de circunstancias de tipo social.

La última fase se desarrolla ya en nuestros días en que la desalación se extiende a otros sectores como el agrícola y donde ya su implantación se realiza en función de unos supuestos económicos, que la hacen como el sistema más adecuado para desarrollar un tipo de agricultura, que sin el concurso de un agua de buena calidad sería insostenible.

En este proceso se pasa de un comienzo en el que el factor energético no es relevante, y por ello se construyen sobre todo sistemas de destilación y fundamentalmente en países que disponen de energía barata, a etapas posteriores en que la tecnología de desalación se va extendiendo por numerosos países que, siendo dependientes del exterior en recursos energéticos, se ven obligados a tratar de reducir ese consumo.

Se comprende por todo lo dicho que las instalaciones de destilación se concentren sobre todo en los países árabes del Golfo, mientras que las de membranas tanto de ósmosis como de electrodiálisis están más repartidas entre todos los países, incluidos los citados.

Aunque las cifras están cambiando constantemente y tampoco es algo que tenga demasiada relevancia, puede decirse que a título meramente informativo puede estimarse que a finales de 1997 la capacidad de desalación instalada en el mundo ascendía a unos 26 Hm^3/día, de los cuales 14 Hm^3 eran de agua de mar y 12 Hm^3 de agua salobre.

En cuanto a tecnologías, aproximadamente un 52 % era destilación, un 40 % ósmosis inversa y el restante 8 % otras tecnologías, entre las que la electrodiálisis tiene un papel destacado.

Sin embargo, en cuanto al número de plantas, las de destilación suponían el 30 %, frente a la ósmosis que representaba el 58 % y la electrodiális y otras el 12 %.

España, por su escasez y mala distribución de recursos hídricos, se introdujo muy pronto en estas tecnologías, muy particularmente en lugares sin otro tipo de alternativas, como las islas Canarias y su uso principal ha sido satisfacer la demanda urbana.

A lo largo de los años otros sectores como el industrial y agrícola han crecido de forma importante, de manera que en la actualidad la distribución aproximada por usos en cuanto a volúmenes producidos es:

— Usos turísticos y urbanos: 50 %.

— Usos agrícolas: 30 %.

— Usos industriales: 20 %.

1.6. Comparación de tecnologías

Los procesos de destilación necesitan calor para provocar el cambio de estado de líquido a vapor, que prácticamente es independiente de la salinidad que tenga el agua.

La ósmosis inversa aplica una presión para superar la presión osmótica del agua a tratar, por tanto cuanto mayor sea la salinidad del agua, mayor será su presión osmótica a superar.

Del mismo modo el desplazamiento de los iones que componen el agua mediante la aplicación de una carga eléctrica, en el proceso de electrodiálisis, exigirá una intensidad de corriente mayor a medida que aumenta el número de iones o concentración de la solución.

Por todo ello se entiende que la destilación se emplea únicamente a nivel comercial para desalar agua de mar, la electrodiálisis para desalar agua salobre y la ósmosis inversa tanto para agua salobre como para agua de mar.

Pero además de esta característica diferenciadora, se trata de concepciones completamente diferentes, dado que el segundo y el tercero emplean para realizar

la separación una membrana y además efectúan el proceso a temperatura ambiente, mientras que la destilación hace uso del vapor producido en el calentamiento del agua.

Los procesos de destilación requieren un cambio de estado en el cual existe una pérdida importante de energía; por ello, siendo los más antiguos en el tiempo, han ido perdiendo importancia en la última década en favor de los de membrana, más eficientes energéticamente.

Pero además del aspecto energético, que como veremos en otro capítulo supone en la mayoría de los casos el mayor de los costes de explotación, existen otros aspectos de estas tecnologías que a grandes rasgos deben ser conocidas, pues en situaciones concretas puede resultar ventajosa la elección de una frente a las otras.

Como simple referencia de sus características podemos decir que:

- La destilación:
  - — Tiene un elevado consumo energético.
  - — Requiere una elevada inversión inicial.
  - — Precisa de una extensión de terreno importante.
  - — Su eficiencia es baja.
  - — No depende de la salinidad del agua.
  - — Necesita una fuente de vapor que según los casos puede o no ser independiente del proceso.
  - — Produce un agua de calidad casi pura.
  - — Puede acoplarse a una central eléctrica productora de energía.
- La ósmosis inversa:
  - — Tiene el menor consumo energético.
  - — Se puede utilizar tanto en agua salobre como de mar.
  - — La inversión precisa está muy ligada a las características del agua que se pretende desalar y en general es inferior a la de los otros sistemas.
  - — Precisa pretratamientos físico-químicos que a veces pueden ser importantes.
  - — Precisa una extensión de terreno de tipo medio.
  - — Necesita una fuente exterior de energía.
  - — Además de iones separa bacterias y virus por lo que también tiene aplicaciones como sistema de desinfección.
  - — La presencia de iones específicos limita sus posibilidades de aplicación eficiente.
  - — Su manejo se complica en función de las características físico-químicas del agua.

- La electrodiálisis:
  - — Tiene un consumo energético de tipo medio que para aguas de salinidades bajas puede ser similar a la ósmosis inversa.
  - — Necesita menores tratamientos químicos que los otros sistemas.
  - — Sus necesidades de espacio e inversión son intermedias entre las de los otros sistemas.
  - — Su coste de instalación es superior a la ósmosis inversa.
  - — El agua producto es de inferior calidad a la de las otras tecnologías.
  - — Su consumo de reactivos es menor que en los otros sistemas.
  - — Su manejo es sencillo en todos los casos.

1.7. Otras aplicaciones de la desalación

La principal aplicación de la desalación es la eliminación de sales o potabilización para adecuarla a las necesidades de la población o agrícolas.

Pero no es ésta la única aplicación y de hecho la extensión de estas tecnologías a campos cada vez más amplios tiene más relación con las aplicaciones industriales que con los usos urbanos o agrícolas.

En el sector industrial existen numerosas industrias que requieren de un agua de una elevada calidad para sus procesos como la industria alimentaria o la electrónica y asimismo existen otras en que el agua es utilizada como refrigerante y en este proceso se evapora, depositándose las sales sobre tuberías, calderas u otros equipos y reduciendo la eficiencia de los distintos procesos.

Se trata de aguas que podrían ser perfectamente utilizables en la agricultura o en los abastecimientos urbanos, pero que esos requisitos especiales exigen una eliminación más selectiva de iones. En muchas de estas aguas el proceso comúnmente utilizado hace unos años era el intercambio iónico. La utilización de ósmosis inversa como fase previa al intercambio, reduce de manera considerable la regeneración de resinas prolongando su vida útil, a la vez que se rebajan de forma notable los costes de los reactivos químicos y se reducen los vertidos altamente contaminantes de los procesos de regeneración.

Procesos más específicos como el decapado de pinturas, la eliminación de los taninos de los curtidos y cualquier otro tipo de vertidos industriales contaminantes están cada vez más en la órbita de los procesos de desalación mediante membranas.

Los procesos de ablandamiento de aguas, consumidores de importantes cantidades de productos químicos, especialmente cal, están siendo sustituidos de forma ventajosa por la ósmosis inversa y más concretamente por la nanofiltración que trabaja a presiones muy bajas y elimina la manipulación y uso de esos reactivos.

Por último, la reutilización de las aguas residuales de las estaciones depuradoras es una alternativa cada vez más viable frente a otros recursos convencionales, cada vez más escasos, distantes y caros de obtención.

Las membranas de ósmosis no sólo eliminan iones sino que su reducido tamaño de poros permite la eliminación de bacterias y virus, y colabora en consecuencia en la desinfección de aguas.

Asimismo en las zonas costeras el agua depurada es salobre y requiere ulteriores tratamientos para poder ser utilizada en la agricultura.

La utilización de membranas de ósmosis inversa, nanofiltración y electrodiálisis, según los casos, precedidas de un pretratamiento bastante sofisticado para eliminación de sólidos en suspensión, es también una alternativa cada vez más en uso.

CAPITULO 2

EL AGUA A DESALAR

2.1. Introducción

Dado el diferente origen del agua que es susceptible de ser desalada y por consiguiente sus distintas características físico-químicas, es conveniente antes de seguir adelante repasar, aunque sea de una manera muy somera, algunos aspectos de la misma que pueden tener incidencia en la forma de realizar el diseño y/o en las precauciones que deben tomarse, para lograr un funcionamiento continuo y sin grandes alteraciones de la instalación desaladora.

Cuatro son las características básicas que definen un agua desde el punto de vista químico:

— Conductividad eléctrica o salinidad.

— Dureza.

— pH.

— Anhídrido carbónico libre.

Puede decirse que aunque las cuatro están relacionadas con la composición química del agua, la primera es una característica más general que proporciona una idea de conjunto, mientras las otras tres recogen aspectos más concretos que, en relación con la desalación, deben tenerse en cuenta en el diseño y operación de las instalaciones desaladoras.

2.2. La salinidad del agua

La salinidad de un agua es el contenido total de sales del mismo.

Al hablar de la salinidad es necesario saber de qué tipo de agua estamos hablando. No es lo mismo un agua de mar con un contenido en sales totales de

40.000 ppm, que un agua salobre de 4.000 ppm. Incluso un agua de una salinidad determinada como 2.000 ppm tiene un comportamiento o aplicación muy diferente según que esa salinidad la determinen los cloruros o sea causada por carbonatos o sulfatos.

A lo largo de los años se han establecido diferentes clasificaciones del agua, basadas fundamentalmente en el tipo de aplicación que se le va a dar a la misma. Son lógicamente diferentes las que se establecen con fines agrícolas, que aquellas para aguas dedicadas a la industria o al abastecimiento urbano.

En el siguiente cuadro se recoge un espectro de las diferentes salinidades que puede tener un agua, que no tiene otro sentido que indicar las grandes variaciones a que puede estar sometida y de ella debe inferirse que cada una de ellas tendrá unas aplicaciones concretas o unas limitaciones en función del uso que se quiera hacer de la misma.

CUADRO 4

Espectro de salinidades del agua

	Salmuera	300.000	ppm
	Agua de mar	30.000	ppm
Espectro	Agua salobre	3.000	ppm
de	Agua potable	300	ppm
Salinidades	Agua industrial	30	ppm
TDS	Agua desionizada	3	ppm
	Agua pura de calderas	0,3	ppm
	Agua ultrapura	0,03	ppm

Aunque la mayoría de las instalaciones de ósmosis inversa se realizan para tratar aguas que corresponden a los espectros nominados como agua salobre o de mar, también las aguas potables o las industriales suelen ser objeto de estos tratamientos, aunque con fines bastante distintos de la simple reducción del contenido de sales a niveles de aguas de consumo humano.

La salinidad se expresa como residuo seco a 105 °C o TDS y se mide normalmente en mg/l o ppm.

Su determinación se realiza pesando una muestra de agua, que se lleva a una estufa en la que se calienta hasta la temperatura de 105 °C. Se pesa la muestra nuevamente y la diferencia en peso de la muestra antes y después es el valor buscado.

Como esta determinación es lenta y requiere la toma de una muestra y su traslado a un laboratorio de análisis, en los procesos industriales en que se precisa tener un control instantáneo del proceso no se determina este valor, sino la conductividad eléctrica, dado que este parámetro, al contrario del anterior, sí puede medirse de forma rápida y bastante precisa «in situ».

La conductividad eléctrica es, al contrario de la resistencia eléctrica, la facilidad o habilidad que tiene una sustancia para conducir la corriente eléctrica.

Un agua químicamente pura no conduce la corriente, pero a medida que se van disolviendo en ella distintos elementos se va haciendo conductora y cuanto mayor cantidad de elementos disueltos contiene, más conductora será.

Pero la conductividad eléctrica de un agua determinada no es un parámetro constante sino que depende de la temperatura, aumentando su valor al hacerlo ésta. Por ello, para poder realizar comparaciones es preciso una referencia y, así, la conductividad queda definida a una temperatura determinada, que según los Métodos Oficiales vigentes es de 20 °C. En muchas publicaciones, sin embargo, se habla de conductividades a 25 °C, que era la temperatura que se consideraba anteriormente. No obstante, existen tablas de convertibilidad de una a otra temperatura.

A medida que aumenta la conductividad de un agua, también lo hace su poder de corrosión, de modo que las aguas con alta conductividad son muy corrosivas a pesar de que otras de sus propiedades puedan no indicar tales problemas.

Como unidad de conductividad se utiliza el S/cm, pero como esta unidad resulta muy grande es más frecuente expresar las lecturas en sub-unidades más pequeñas como mS/cm o incluso en µS/cm. Lógicamente existe una relación entre la conductividad eléctrica y la salinidad, lo que permite el paso inmediato de una a otra unidad, aunque dicha relación no es rigurosamente fija y exacta.

En un agua natural, por ejemplo, el coeficiente de paso aproximado entre una y otra magnitud es de 0,64 o múltiplos de este valor según cuales sean las unidades elegidas, es decir que:

$$\text{TDS (mg/l)} = \text{CE } (\mu\text{S/cm}) \times 0{,}64 = \text{CE mS/cm} \times 640$$

Pero esta relación es algo distinta en otros tipos de aguas, en función de la composición química de éstas.

Por ejemplo en las aguas desaladas por ósmosis inversa, como dichas aguas contienen más sodio y cloruros que calcio, magnesio y sulfatos, al rechazar mejor las membranas los iones divalentes o trivalentes que los monovalentes, las concentraciones de aquellos suelen ser de 2,13 y 2,14 µmho/cm.

Por esta razón, de forma aproximada, puede obtenerse el TDS de un agua producto dividiendo su conductividad por 2, o multiplicando por 0,5 (valores de 0,51 a 0,53 son más exactos).

La forma más exacta de determinar esta relación consiste lógicamente en tomar una muestra de agua y determinar tanto la salinidad total en laboratorio, como la conductividad instantánea, estableciendo entre ambos resultados el coeficiente de paso adecuado.

De hecho, cuando se empieza a operar una instalación desaladora es necesario realizar desde el principio esta determinación, para que sirva de referencia futura, dado que los contratos y otro tipo de condiciones que se suelen establecer en torno al agua desalada vienen expresados indistintamente en una u otra unidad.

2.3. Composición química del agua

Dada la variedad de elementos que pueden encontrarse en el agua y que son los causantes de la salinidad, conviene repasar cuales son estos elementos, su origen o las causas que provocan su presencia en el agua, sus efectos en el usuario final del agua, principalmente la agricultura y el consumo humano y por último la importancia de su contenido en relación con su posible efecto sobre las membranas.

No todos los elementos se encuentran en las mismas proporciones por lo que debe hacerse una primera separación entre elementos principales, que son los más abundantes, y elementos secundarios o microelementos, que aún encontrándose en pequeñas proporciones pueden ser negativos para la salud humana, las plantas o las propias membranas de desalación por los precipitados que pueden provocar sobre las mismas. Entre los primeros se encuentran:

2.3.1. Sodio

Es el metal alcalino más frecuente en la composición de las aguas y además el único presente en cantidades significativas en las aguas naturales. Todos los compuestos sódicos son solubles, por lo que el sodio lavado de rocas y suelos permanece siempre en solución. Esto significa que los compuestos de sodio no precipitan sobre las membranas.

En el agua de mar es con mucha diferencia el ión metálico más abundante, en concentraciones de alrededor de 10.000 mg/l. En otras aguas, en cambio, pueden existir otros iones metálicos como calcio o incluso magnesio que predominen. El sodio se encuentra en el agua en forma de cloruro, carbonato o bicarbonato sódico. No contribuye a la dureza del agua, sin embargo las aguas subterráneas que contienen cantidades importantes de carbonato y bicarbonato sódico son alcalinas y pueden tener pH de 9 o superiores.

Según que el uso que vaya a dársele al agua desalada sea el abastecimiento humano o la agricultura, existen unos contenidos máximos que no deben rebasarse y que vienen determinados por la influencia del sodio en los problemas cardiovasculares, para el primero, y su contribución al deterioro e impermeabilidad de la estructura del suelo, en el segundo. El actual reglamento sanitario fija el contenido máximo de sodio en 150 mg/l.

En cuanto a su incidencia agrícola, aunque la mayoría de los cultivos arbóreos y plantas leñosas, como cítricos, aguacate, etc., son sensibles al sodio, existen di-

versos criterios que en general analizan el contenido del sodio en relación con otros iones que pueden estar presentes en el agua.

La clasificación más reciente de Ayers y Weiscott de la FAO utiliza la relación de absorción de sodio SAR, como indicador de toxicidad potencial pero muestra también su dependencia de la conductividad total del agua. Un agua con un índice SAR mayor de 16 puede considerarse de mala calidad. Cánovas (1986) y Cerdá (1980) consideran como mala para usos agrícolas el agua con contenido en sodio superior a 0,6 g/l. Además la tolerancia de los distintos cultivos respecto al sodio no es la misma; por ejemplo en la vid se producen problemas de toxicidad para contenidos de sodio superiores a 15 meq/l.

2.3.2. Calcio y Magnesio

Se encuentran en todas las aguas y son especialmente abundantes en las aguas subterráneas. Forman parte de numerosas sales por lo que su influencia en las características depende del tipo de sales en que estén presentes.

Contribuyen conjuntamente al establecimiento de la *Dureza* del agua, que está causada fundamentalmente por las sales que forman estos dos elementos con los bicarbonatos, sulfatos, cloruros y nitratos.

Ambos son responsables en gran medida de las incrustaciones que se producen cuando el agua experimenta cambios en la temperatura, pH y presión.

Las precipitaciones se desarrollan cuando se rebasan los límites de solubilidad de las citadas sales, rompiéndose el equilibrio de la solución y dando lugar a la formación de los carbonatos insolubles de estos metales y en ocasiones de sus sulfatos. Los iones bicarbonatos se encuentran en el agua subterránea como resultado del dióxido de carbono disuelto, que ayuda a la disolución de la cal y dolomita.

El CO_2 está ligeramente unido al ión bicarbonato, perdiéndose parte del mismo al calentar el agua, en forma de gas. Cuando esto ocurre parte de los bicarbonatos pasan a carbonatos. Estos a su vez reaccionan con el Calcio y Magnesio y precipitan. Primero lo hace el carbonato cálcico que es más insoluble y posteriormente el de Magnesio.

El contenido máximo de magnesio de un agua destinada al consumo humano no debe sobrepasar los 50 mg/l, pero para el calcio no existe límite alguno en la Reglamentación Técnico Sanitaria.

El Calcio es necesario para el organismo, siendo sus necesidades diarias de 800 mg por persona y día. Como no es un elemento tóxico no existen límites claros, aunque a niveles de 1.000 mg/l se han encontrado problemas.

Desde el punto de vista agrícola los problemas que generan el calcio y magnesio en el riego son indirectos, puesto que bloquean la absorción de otros elementos por la planta y favorecen las incrustaciones de carbonatos en los elementos de riego como aspersores y goteros.

2.3.3. Cloro

Es el elemento más abundante en el agua de mar, donde alcanza concentraciones medias de unos 20.000 mg/l.

Su origen es difícil de explicar, aunque algunas teorías sostienen que procede del ácido clorhídrico o de las sales volátiles de cloro procedentes de las erupciones volcánicas, géyseres o aguas termales, así como de aguas juveniles o magmáticas.

El contenido de cloro de las aguas subterráneas de las regiones húmedas suele ser bajo, inferior a 5 ppm, a menos que las aguas hayan sido contaminadas por agua de mar.

Respecto a los niveles de cloro deseable en un agua, son bastante variables en función del destino final que se vaya a dar a la misma, aunque en general valores de unos 150 ppm se consideran adecuados para la mayor parte de usos.

Pero al igual que en el caso del sodio hay unas limitaciones al contenido máximo de este elemento que según la ya citada Reglamentación Sanitaria no debe ser superior a 250.

Respecto al agua para usos agrícolas, el cloro produce quemaduras en las hojas de las plantas, por lo que los niveles que se consideran tolerables son muy distintos según se trate de sistemas de riego que mojen o no las hojas. En el primer caso 100 mg/l son valores excesivos mientras que en el segundo puede llegarse hasta 350 mg/l.

2.3.4. Sulfatos

Proceden fundamentalmente del yeso o anhidrita, siendo los más frecuentes el sulfato sódico y el magnésico. Contribuyen a la salinidad de las aguas y a veces alcanzan concentraciones tan elevadas como 2.000 mg/l.

Desde el punto de vista sanitario su contenido no debe sobrepasar los 250 mg/l. Los contenidos elevados pueden provocar problemas intestinales. En cuanto a usos agrícolas, concentraciones superiores a 1,2 g/l se consideran negativas. El principal problema de los sulfatos en cuanto a la desalación por ósmosis inversa es, como ya se ha indicado anteriormente, su posibilidad de formar precipitados de calcio y magnesio sobre las membranas cuando se rebasan ciertos niveles, por lo que deben vigilarse.

2.3.5. Carbonatos y Bicarbonatos

Ya hemos explicado su relación con el calcio y magnesio. Se encuentran en todas las aguas y a veces en proporciones muy elevadas. También son frecuentes los carbonatos en función del pH de ésta.

Como las membranas de OI tienen un elevado rechazo de estos iones, se concentran en el rechazo y pueden precipitar.

Incluso en el caso de las membranas de acetato de celulosa, la elevada concentración de bicarbonatos en las proximidades de la superficie de éstas puede elevar el pH hasta cerca de 10, favoreciendo la hidrólisis de las citadas membranas.

El agua de mar contiene iones bicarbonato que están en equilibrio con iones carbonato e hidroxilo.

$$2HCO_3^- = CO_3^= + CO_2 + H_2O$$

$$CO_3^= + H_2O = 2OH^- + CO_2$$

Alta temperatura o elevado pH desplazan el equilibrio hacia la producción de iones carbonato e hidroxilo y cuando esto ocurre precipitan el calcio y/o el magnesio en forma de hidróxidos.

Para evitar esto se trata el agua con ácido para mantener la reacción de equilibrio hacia la izquierda, y con más ácido para eliminar los bicarbonatos.

$$CO_3^= + H^+ = HCO_3^-$$

$$HCO_3^- + H^+ = H_2O + CO_2$$

Sin embargo incluso en el caso de la acidificación del agua, debe tenerse cuidado para evitar la formación de sulfato cálcico, que no es afectado por el tratamiento ácido.

Un aspecto importante a considerar desde el punto de vista de la ósmosis inversa es lo que se conoce como efecto del ión común, que no es otra cosa que el cambio de la solubilidad de una sal como consecuencia de la presencia en la solución de otras sales que no tienen iones comunes con ella y que se encuentran en altas concentraciones.

Este efecto que se emplea por ejemplo en el ablandamiento o suavización de aguas, mediante la dosificación de un exceso de $Ca(OH)_2$ para eliminar el Mg^{++} como $Mg(OH)_2$, hace que en el caso del agua de mar el carbonato cálcico sea varias veces más soluble que en agua dulce, reduciéndose por tanto los riesgos de precipitación sobre las membranas.

Pertenecen al segundo grupo:

2.3.6. Nitratos

La variación del contenido de nitratos en el agua es grande y en muchas aguas subterráneas no tiene relación con ninguna formación geológica.

Los nitratos del agua proceden de distintas fuentes. En algunos casos, de plantas leguminosas, en otros, de residuos de plantas o animales y de fertilizantes añadidos al suelo. En otros, de las propias aguas residuales.

Generalmente un contenido elevado de nitratos en un agua subterránea tiene una relación directa con el agua superficial, que contamina por percolación el acuífero.

Un alto contenido de nitratos puede indicar polución y ser considerado como un indicador y un aviso que debe ser tenido en cuenta para comprobar la presencia de bacterias peligrosas.

Los nitratos en concentraciones mayores de 45 ppm son indeseables en aguas para usos domésticos por el posible efecto tóxico sobre los niños. Esto se conoce como cianosis.

Es importante hacer notar que los nitratos no se eliminan del agua por ebullición, debiéndose recurrir a la desmineralización o a la separación por membranas.

2.3.7. Hierro

Prácticamente todas las aguas contienen hierro en mayor o menor cantidad, cuyo contenido puede ser problemático para determinados usos, domésticos o industriales.

Contenidos de 0,5 ppm son normalmente perjudiciales, e incluso algunos procesos industriales no permiten contenidos superiores a 0,1 ppm.

La química del hierro en el agua es bastante compleja. Hay dos tipos de iones de hierro, el ferroso y el férrico. El primero es inestable en presencia de aire y cambia al estado férrico.

El ión ferroso puede ser disuelto en cantidades de hasta 50 ppm en aguas que son casi neutras e incluso en cantidades mayores en aguas ligeramente ácidas. En contraste el ión férrico es casi completamente insoluble en agua alcalina o débilmente ácida. En las aguas subterráneas son normales concentraciones de 1 a 5 ppm. Para la eliminación del hierro, puede procederse a la aireación del agua, con la que se consigue bajar dicho contenido hasta 0,1 ppm.

Las aguas con hierro también favorecen el crecimiento de bacterias de hierro, como la crenothrix.

Los organismos pueden cambiar ciertas formas de hierro disuelto al estado férrico insoluble. El hierro insoluble se deposita en la capa de los organismos o en los huecos de la arena.

Las bacterias de hierro se desarrollan mejor en la oscuridad y se encuentran más frecuentemente en agua conteniendo poco o ningún oxigeno y una considerable cantidad de dióxido de carbono junto con hierro disuelto.

Con el hierro y los carbonatos forman precipitados sobre las membranas, que reducen la eficiencia de la instalación aunque se eliminan fácilmente.

2.3.8. Manganeso

Tiene un comportamiento químico similar al hierro y se presenta en las mismas condiciones que éste. Aparece como bicarbonato manganoso soluble que cambia a hidróxido de manganeso insoluble cuando reacciona con el oxígeno del aire. Las manchas causadas por el manganeso son más intensas y difíciles de eliminar que las ocasionadas por el hierro.

El mejor pretratamiento para ambos elementos consiste en evitar su oxidación utilizando bombas sumergibles, que impulsan directamente el agua a tratar, desde el punto de la captación hasta la aspiración de la bomba de alta presión, sin exponerla al aire.

Cuando los iones Fe^{+3} y Mn^{+2} aparecen simultáneamente en el agua, el primero puede catalizar la oxidación del segundo por lo que es muy conveniente la utilización de antiincrustantes. El hexametafosfato sódico, utilizado como antiincrustante del sulfato cálcico, retarda también la oxidación y subsiguiente precipitación del hierro y el manganeso.

Cuando se producen precipitados de hierro y manganeso sobre las membranas, se consiguen buenos resultados en su limpieza bajando el pH por debajo de 3. Los ácidos cítrico y acético resultan muy adecuados para estos casos, pudiendo utilizarse también el ácido nítrico.

2.3.9. Sílice

El silicio es junto con el oxígeno el elemento más abundante en la corteza terrestre. La combinación de ambos forma el SiO_2 que se denomina comúnmente sílice.

Se puede encontrar en algunas aguas subterráneas en cantidades de hasta 100 ppm y contenidos de 20 ppm son bastante normales.

No contribuye a la dureza del agua, pero es una parte importante de las incrustaciones formadas por muchas aguas.

La solubilidad de la sílice en agua es de unos 110-125 mg/l, pero esta solubilidad está bastante relacionada con la temperatura del agua.

Como la sílice es rechazada en un porcentaje superior al 99 % por las membranas, se concentra en el rechazo.

Cuando las concentraciones superan estos valores pueden producirse precipitados, normalmente silicatos de calcio y magnesio, que no son fácilmente disueltas por los ácidos por lo que presentan problemas insolubles. No conviene superar concentraciones en el rechazo superiores a 150 mg/l.

2.3.10. Flúor

Aparece sólo en pequeñas concentraciones en el agua subterránea. Puede proceder de la fluorita, el principal mineral fluorado de rocas ígneas.

El rechazo de este elemento por las membranas de ósmosis inversa es variable en función de la composición completa del agua.

Es uno de los componentes más problemáticos del agua en los procesos de desalación, ya que su rechazo por las membranas es elevado y la solubilidad de sus sales que se concentran en la salmuera muy baja, siendo los riesgos de precipitación altos. Contenidos en el agua tan bajos como 5-7 ppm pueden resultar peligrosos.

En la Reglamentación Técnico Sanitaria se admiten contenidos máximos de flúor en el agua de 1.500 µg/l.

2.3.11. Bario y Estroncio

Aunque no son elementos abundantes, su presencia se detecta en determinadas aguas subterráneas.

Los sulfatos de estos dos elementos son mucho menos solubles que los de calcio por lo que pueden precipitar. El hexametafosfato sódico actúa eficazmente como inhibidor o antiincrustante de ambos.

2.3.12. Aluminio

No se encuentra normalmente ni en aguas subterráneas ni superficiales, a no ser que se haya producido una contaminación de tipo industrial o vertido.

El hidróxido de aluminio tiene una solubilidad variable en función del pH, siendo menor a un pH de 5.

Los valores de pH a que se trabaja más frecuentemente en ósmosis inversa, entre 6,5 y 7,5, no representan por tanto un peligro.

Unicamente en el caso de utilizar membranas de acetato de celulosa cuyo pH de funcionamiento suele estar entre 5 y 6 es más fácil dicha precipitación.

Los precipitados, en caso de producirse, se eliminan mediante acidificación y el hidróxido de aluminio puede eliminarse por filtración.

2.4. Gases disueltos

Pero además de sus iones constituyentes, las aguas de distinto origen pueden tener también gases disueltos.

Aunque su contenido no se determina en los análisis rutinarios, su presencia en cantidades importantes tiene un especial significado en el uso del agua en ciertos sectores.

Los gases disueltos más comunes son oxígeno, sulfhídrico, dióxido de carbono, nitrógeno, anhídrido sulfuroso y amonio.

Como la solubilidad de los gases es inversamente proporcional a la temperatura y aumenta con la presión, los gases disueltos intervienen frecuentemente en problemas de corrosión y de precipitación.

2.4.1. Oxígeno disuelto

Su contenido en aguas subterráneas profundas es generalmente bajo. Se supone que la mayor parte del aire contenido en el agua que percola en el suelo se emplea en los procesos de oxidación de los materiales orgánicos, aunque una pequeña cantidad puede estar presente incluso a grandes profundidades.

Las aguas superficiales de buena calidad, por el contrario, están casi saturadas de oxígeno disuelto. El contenido de oxígeno de un agua varía además de forma inversa con la temperatura, es decir, cuanto más elevada es ésta, menor será su contenido en oxígeno.

La concentración de oxígeno disuelto en el agua es un índice significativo de su calidad sanitaria. Los tests de oxígeno disuelto indican la cantidad de oxígeno molecular disuelto en agua.

El oxígeno disuelto acelera el ataque corrosivo sobre el hierro, acero y otros metales. Si la temperatura aumenta, también lo hace la corrosión, pero como hemos indicado, la cantidad de oxígeno en solución desciende y esto contrarresta el otro efecto, a menos que el agua calentada esté bajo presión.

El agua que contiene oxígeno disuelto corroe los metales más rápidamente cuando el pH es bajo. El pH tiene una importante influencia en la velocidad del ataque, sin embargo un agua con una conductividad eléctrica relativamente alta y que también contiene oxígeno disuelto, será agresiva, aunque el pH sea 8 o más.

Pero además la presencia de O_2 en el agua de alimentación favorece la proliferación de bacterias aerobias y por tanto la contaminación de las membranas.

2.4.2. Sulfhídrico

Proporciona un olor característico. Cantidades tan pequeñas como 0,5 ppm forman un ácido débil y el agua es generalmente corrosiva.

Está presente en algunas aguas subterráneas y su exposición al aire produce finos precipitados de azufre que ocasionan importantes ensuciamientos de las membranas difíciles de eliminar. Para evitarlos hay que aislar las aguas que lo contienen. Como gas pasa a través de las membranas y puede eliminarse mediante torres de desgasificación o por cloración.

El SH_2 también puede aparecer como resultado de la acción de bacterias sulfato reductoras, que ven favorecido su crecimiento en aguas con ausencia de oxígeno

y con un elevado contenido de sulfato. Estas bacterias cambian los sulfatos a sulfídrico.

2.4.3. Dióxido de carbono

Su presencia en distintas aguas está en relación con los contenidos en materia orgánica, de forma que si existe una importante actividad biológica en un suelo, el agua en contacto con él experimenta un aumento en la concentración de CO_2, pero un descenso en la de O_2.

Pero además es un gas que se libera en las aguas carbonatadas como consecuencia de la regulación de pH que se realiza en el pretratamiento de ósmosis inversa.

La liberación de CO_2 ocasiona un descenso del pH del agua y la hace más corrosiva. Como gas atraviesa las membranas de OI y por tanto aparece en el agua producto, a las que confiere agresividad y por tanto la exigencia de post-tratamientos para evitar daños a la red de conducción o distribución posterior.

La liberación del CO_2 de las aguas freáticas puede provocar la precipitación de los carbonatos, por lo que cuando se han de desalar estas aguas es recomendable la utilización de un depósito intermedio.

2.5. Temperatura

La temperatura del agua varía bastante no sólo en función de la zona, sino también según se trate de aguas subterráneas o superficiales, o aguas de mar, e incluso de la época del año de que se trate.

En nuestras latitudes las temperaturas medias del agua del mar varían entre 18 y 24 °C entre el invierno y verano, pero a medida que se desciende hacia el sur podemos encontrarnos con temperaturas entre 8 y 18 °C, como ocurre en Sudáfrica, Namibia, o Chile; por el contrario en los países del Golfo Pérsico las temperaturas son más elevadas pudiendo alcanzar temperaturas superiores a 30 °C.

La influencia de las temperaturas en el funcionamiento de las membranas es importante desde tres puntos de vista, por lo que deben ser tenidas en cuenta:

- De un lado, la solubilidad de determinadas sales aumenta con la temperatura y por tanto a temperaturas más elevadas se reducen sus riesgos de precipitación.
- Por otro, la temperatura influye en la viscosidad del agua y en la dilatación de los materiales que constituyen las membranas, por lo que tal como veremos más adelante deben tenerse en cuenta en el diseño y partir de aquellas que son más perjudiciales para el proceso.
- Por último, la elevación de la temperatura favorece la actividad biológica de los microorganismos que ocasionan el ensuciamiento de las membranas.

2.6. Otros parámetros característicos del agua

Pero además de los iones que hemos analizado de forma individual hay otros parámetros que deben ser tenidos en cuenta desde el punto de vista global.

Nos referimos al pH y otros índices.

2.6.1. pH

Es el logaritmo negativo de la concentración de iones hidrógeno del agua y es consecuencia de las sales que lleva en solución. Su valor es un índice indicativo de las características del agua.

Desde el punto de vista de la desalación por membranas, ejerce dos tipos de acciones:

- Influye en la solubilidad de los carbonatos y regula por tanto su precipitación.
- Limita el empleo de las membranas de acetato de celulosa que a valores inferiores a 5 o superiores a 5, pueden experimentar hidrólisis.

La Reglamentación considera que las aguas para consumo humano deben tener un pH entre 6,5 y 8,5.

2.6.2. Alcalinidad

Es la capacidad de un agua para neutralizar un ácido. Un agua con un pH ligeramente inferior a 7 puede tener al mismo tiempo algunas sales que neutralizan el ácido y manifestar por tanto una alcalinidad que se puede medir.

Los iones carbonato y bicarbonato contribuyen a la alcalinidad, pero los iones cloruro, sulfato y nitrato no. Los iones OH afectan a la alcalinidad pero normalmente las aguas presentan valores tan bajos de este ión que apenas tiene importancia.

2.6.3. Dureza

La dureza puede ser de dos formas:

a) Carbonatada, causada por los carbonatos, que incluye la porción de Calcio y Magnesio que se combina con el bicarbonato y las pequeñas cantidades de carbonato presente.

Se llama también temporal porque desaparece al hervir el agua.

b) No carbonatada o permanente, causada por los nitratos, cloruros y sulfatos de Ca y Mg y que es la diferencia entre la dureza total y la dureza carbonatada.

Las aguas para consumo humano deben tener una dureza de 60 mg/l expresada en Ca.

2.7. Características generales del agua en relación con las membranas

El agua es una solución de diversas sales, cuyo conjunto determina las características de la misma.

Es importante conocer su composición, cuando se trata de someterla a un tratamiento de separación o desalación mediante membranas, por cuatro razones principales, a saber:

a) No todas las membranas tienen el mismo rechazo de sales.

b) Una misma membrana rechaza los distintos iones de forma también distinta.

c) Existen iones específicos que presentan limitaciones a su separación.

d) El pH óptimo, tanto de funcionamiento como de rechazo de sales de una membrana, está claramente determinado.

Por ello conviene hacer un breve repaso de los distintos componentes químicos que se encuentran tanto en el agua salobre como en el agua de mar, en relación con la desalación.

Como se ha dicho, las sales se encuentran disociadas en el agua en forma de iones positivos y negativos.

Los principales cationes que se encuentran en el agua son Calcio (Ca^{++}), Magnesio (Mg^{++}), Sodio (Na^{+}) y potasio (K^{+}), mientras los aniones más abundantes son el cloruro (Cl^{-}), sulfato ($SO_4^{=}$), carbonato ($CO_3^{=}$) y bicarbonato (CO_3H^{-}).

En menor cuantía aparecen otros como hierro, manganeso, aluminio o nitrato, fosfato, fluoruro, etc.

El predominio o abundancia de unos sobre otros hace que el agua pueda ser utilizada directamente o que requiera algún tratamiento previo.

Las propiedades químicas de un agua salada dependen de su concentración total y sólo en menor cuantía de la proporción relativa de unos iones sobre otros. Sin embargo en los procesos de desalación por ósmosis inversa, estas proporciones son importantes por su incidencia en la precipitación o incrustación de sales sobre la membrana.

2.7.1. Agua salobre

La composición de las aguas salobres es muy diferente según se trate de aguas superficiales, ríos o lagos, o de aguas subterráneas, siendo generalmente las primeras de mejor calidad y más equilibradas desde el punto de vista iónico.

Sin embargo, pueden encontrarse variaciones importantes y significativas que es conveniente comentar.

Aguas superficiales de ríos

Aunque existe la creencia de que las aguas de los principales ríos conocidos son de buena calidad, esto no es completamente seguro.

Generalmente sus salinidades son bajas, pero en determinados tramos de los ríos pueden producirse aumentos importantes de la misma.

En general la salinidad de los ríos se incrementa desde su nacimiento a su desembocadura, aunque el tipo de sales que crean esa salinidad puede variar.

Esta salinidad inducida está relacionada con el tipo de terrenos que atraviesa el río a lo largo de su recorrido.

No son raros los ejemplos en que en los cursos alto y medio de un río predominan los carbonatos y posteriormente aumentan los sulfatos y cloruros.

Pero incluso a lo largo de un año las salinidades pueden variar bastante, dado que las sales procedentes de una zona determinada quedan diluidas por el arrastre de las aguas de lluvia que se produce en determinados meses.

CUADRO 5

Calidad del agua de los ríos españoles

Cuenca	*Estación*	$SO_4^=$	Cl^-	Na^+	*CE*
Ebro	Ega	119-246	90-339	54-211	798-3312
	Martin	780-828	88-95	57-82	1949-2830
	Zaragoza	78-421	69-372	42-224	619-2222
	Gállego	430-482	370-410	252-274	1862-2760
Guadiana	Balbuena	130-590	75-205	25-79	735-1940
	Guadajira	40-75	55-423	28-289	535-2490
	Ciguela	210-1665	17-219	25-131	1380-2950
	Záncara	590-1140	32-538	22-258	1870-4050
Guadalquivir	Carmona	728-763	1160-1240	650-790	1550-5900
	Puente Viejo	323-478	250-688	187-488	1880-3590
	Alcalá del Río	71-280	58-400	44-246	650-2400
	Tarfía	353-2401	870-6291	598-1000	4300-20100
Pirineo Oriental	Cardoner	150-212	1043-2690	678-1235	2580-8750
	Llobregat	120-288	383-1157	197-640	1822-4240
	Mogent	134-201	280-497	177-396	1380-2410
	Ripoll	204-384	639-908	366-698	2670-4350
Segura	Mundo	259-320	34-44	13-18	83-1055
	Archena	255-654	84-378	48-240	928-2320
	Orihuela	569-1015	355-947	167-648	2470-4664
	E. De Fuentes	813-935	304-323	207-253	2027-2715
Tajo	Bolarque	199-392	28-21	13-24	482-600
	Aranjuez	680-840	74-217	88-188	1325-1776
	Toledo	116-885	41-147	39-120	485-1776
	Talavera	14-905	8-136	30-139	160-1623

Sin embargo no es ésta la única causa del incremento de la salinidad de los ríos, pues además, en tramos puntuales, el río puede tener una elevada salinidad producida por causas exógenas, como pueden ser determinados vertidos industriales.

El cuadro de la página anterior recoge distintos análisis de aguas de ríos españoles, en donde puede comprobarse no sólo las diferencias de unos a otros, sino incluso lo que hemos citado de las variaciones a lo largo de su recorrido.

Vemos que en los ríos de la vertiente Mediterránea y en los del sur de la Península, en alguna época del año o al menos en algún tramo, se alcanzan valores elevados de cloruros y sodio, y por tanto deberían ser sometidos a desalación si quieren ser utilizados en los abastecimientos urbanos.

Puede verse también el llamativo caso del río Guadalquivir, en el que existe una aportación ascendente de agua de mar que determina salinidades muy elevadas en el último tramo de su recorrido, que además varían ampliamente según se trate de mareas alta o baja.

Aguas superficiales de lagos, presas o depósitos

En los lagos y embalses los problemas de salinidades no son preocupantes en general, y suelen estar limitados a pequeños depósitos, pero los problemas de eutrofización que, aunque no es propiamente una salinización, incrementa los contenidos de nutrientes como nitratos y fósforo, sí son dignos de consideración.

Las causas de estas salinidades son muy variadas y van desde fuertes evaporaciones a características del terreno en que se han ubicado, o incluso a filtraciones desde algunas zonas o riachuelos próximos de elevada salinidad.

En el mundo existen importantes lagos conocidos por su elevada salinidad, como el Aral en Rusia, el Mar Muerto en Israel, o el Salton Sea (California) y Salt Lake (Utah) en Estados Unidos.

Sin llegar a esos extremos, en el siguiente cuadro puede verse que también en España existen lagos o lagunas con una salinidad sorprendentemente elevada.

CUADRO 6

Calidad del agua de embalses

Nombre	*Conductividad*	*Alcalinidad*	*pH*
Guadalhorce	6395	95	8,35
Cuevas de Almanzora	2017	37	8,2
Benageber	1053	85	7,45
Sichar	766	135	7,5

Aguas subterráneas

Constituyen la tercera fuente importante de aportación de aguas en general y consecuentemente de aguas salinas en particular.

Las causas de la contaminación por sales de las aguas subterráneas son mejor conocidas. Se trata de procesos físico-químicos y hasta biológicos de alteración de los materiales que forman el terreno y en los que el agua queda almacenada hasta que es extraída (meteorización, oxidación-reducción, lavado, etc).

La composición de las aguas subterráneas es más variable que la de los ríos y además de los iones normales como Na^+, K^+, Mg^{++}, Ca^{++}, Cl^-, $CO_3^=$, CO_3H^- ó $SO_4^=$, aparecen en mayores cantidades PO_4^{3-} o NO_3^- y algunos microelementos como B, Fe^{+++} , SiO_2 ó F^- que pueden ser importantes en función del ulterior uso o tratamiento que se quiera hacer de ese agua.

Pero además de este incremento de la salinidad de las aguas subterráneas por causas más o menos naturales, también se produce con frecuencia por causas inducidas externamente y generalmente ligadas a un bombeo excesivo.

Esta contaminación por intrusión es más frecuente en las zonas costeras, pues una extracción excesiva en pozos playeros crea una depresión en el cono de agua dulce, que es reemplazada por agua de mar (intrusión marina).

En zonas del interior el incremento se produce al tener que profundizar cada vez más el pozo para poder seguir manteniendo la producción, alcanzándose aguas fósiles o movilizándose reservas subterráneas de otras zonas de peor calidad.

Sin embargo, así como en el primer caso el empeoramiento de la calidad va ligada a un aumento importante del contenido en sodio y cloruros, en el segundo puede estarlo al de sulfatos, carbonatos, Calcio y Magnesio.

En el siguiente cuadro pueden verse diferencias de composición química importantes entre distintos pozos.

CUADRO 7

Calidad del agua subterránea

Pozo	*PH*	*CE*	*TDS*	Ca^{++}	Mg^{++}	Na^+	K^+	$CO_3^=$	CO_3H^-	$SO_4^=$	Cl^-	NO_3^-	F^-	SiO_2
1	7,9	4235	2751	34,9	139	597	52	0	904	122	842	1,24	0	60
2	8	7680	4597	48	227	1250	35	0	623	234	2121	8	0	51
3	6,9	7260	4013	263	275	759	51	0	305	168	2184	8	0	28
4	6,9	9220	5068	413	340	966	55	0	360	223	2925	9	0	40
5	7,6	5800	3424	10,4	11,5	1176	23	0	306	252	1617	17	0	13
6	7,1	1924	1916	11,6	58,3	368	58	0	1245,2	114	24,1	7,4	1,5	30
7	7,1	2280	1988	2,2	109	371	33	0	1114,6	154	168	11,8	0,2	25
8	8,5	2540	2258	0,4	95,2	449	52	58,5	1194,6	203	149	14,9	0,2	51
9	8	1627	1516	0,8	170	160	12	0	904,2	157	80,8	9,3	0,2	21
10	8,8	3070	3004	2,4	113	665	27	72,9	1615,5	277	200	3,1	0,3	28
11	6,6	5750	3600	118	270	727	47	0	358	298	1691	2,48	0	32
12	8,6	4690	4063	7,21	19,5	1250	43	113	1601	526	504	2,2	0,1	38

2.7.2. Agua de mar

La salinidad total y el contenido de sales concretas de un agua de mar es menos variable que el de un agua salobre.

Las variaciones se producen fundamentalmente en el contenido total de sales entre unas y otras zonas de nuestro planeta aunque no en el tipo de iones, con especial significación en los mares cerrados de las regiones cálidas, sin embargo para un lugar determinado las características del agua de mar varían muy poco no sólo según la época del año, sino a lo largo de los años.

Como ejemplo de salinidades medias de distintas zonas podemos señalar entre otras:

— 28.000 ppm en el Báltico.

— 34.000 ppm en el Mar del Norte.

— 35.000 ppm en el Atlántico Sur.

— 36.000 ppm en el Mediterráneo.

— 38.000 ppm en las Islas Canarias.

— 42.000 ppm en Arabia Saudita.

— 44.000 ppm en el Mar Rojo.

Como excepción, en zonas del Atlántico y el Pacífico Sur sometidas a corrientes marinas singulares, como las conocidas Benguela y El Niño respectivamente, se han detectado variaciones en la composición entre el verano y el invierno que pueden oscilar entre 35.000 y 38.000 mg/l.

En el cuadro siguiente se recogen análisis típicos de agua de mar de distintas zonas, pudiéndose comprobar de forma más precisa la variación de la salinidad y en la misma proporción el contenido de distintos iones.

CUADRO 8

Análisis de aguas de mar

	Arabian Gulf	*Mediterráneo*	*Golfo Pérsico*	*Omán-Mascate*	*Pacífico*	*Atlántico*
Na^+	17572	11177	12300	11800	12.220	11520
K^+	486	478	470	490	286	460
Ca^{++}	620	471	570	472	300	450
Mg^{++}	2098	1355	1700	1355	730	1320
Cl^-	25600	20530	24500	21772	18.760	20600
$SO_4^=$	4277	2488	3400	2880	3.890	2910
CO_3H^-	122	208	185	160	170	134
PH	8,2	7,9	8,2	8,06	7,6	8,1
TDS	55775	36720	47000	39510	35.860	37830

2.8. Formas de expresar un análisis

Por último, al estar dedicado este libro a temas relacionados con el agua, el lector interesado puede encontrarse con que a menudo los resultados de los análisis que caracterizan un agua viene expresado en distintas unidades, según cuál sea la salinidad de la misma o el laboratorio que realice el análisis.

Con el fin de no crear equívocos es conveniente conocer pues las relaciones o conversión de un tipo de unidades en otras.

Así como ya se ha indicado que el contenido total de sales de una solución se expresa en TDS o conductividad, la concentración individual de cada ión viene expresada generalmente en mg/l o sus equivalentes g/m^3 o ppm, y también en meq/l.

Respecto a las primeras unidades dichos contenidos se expresan en cuanto al total de sales o en cuanto a la concentración en CO_3Ca.

Una ventaja de expresar los análisis en mg/l como CO_3Ca, es que cuando las concentraciones de dos sustancias se expresan en esta unidad, un mg/l de una sustancia determinada reacciona completamente con otro mg/l de otra sustancia y por tanto no se necesita establecer constantemente el balance de la correspondiente ecuación química.

Para poder realizar la conversión entre unas unidades y otras es preciso conocer además de los pesos atómicos o moleculares y sus valencias, los siguientes conceptos:

CUADRO 9

Pesos atómicos de los principales iones del agua

Ión	*Peso atómico*	*Valencia*	*Peso equivalente*
Ca^{++}	40,08	2	20,04
Mg^{++}	24,32	2	12,15
Na^{+}	22,997	1	23
K^{+}	39,069	1	39,1
Sr^{++}	87,63	2	43,81
NH_4^{+}	18,04	1	18,04
$CO_3^{=}$	60	2	30
CO_3H^{-}	61,01	1	61,01
$SO_4^{=}$	96,06	2	48,03
NO_3^{-}	62	1	62
F^{-}	19	1	19
Cl^{-}	35,457	1	35,46
PO_4^{3-}	94,98	3	31,66
SiO_2	60	2	30
Fe^{3+}	55,85	3	18,61
Al^{3+}	26,98	3	9
Ba^{++}	137,36	2	68,68
B^{+3}	10,82	3	3,6
Mn^{3+}	54,94	3	18,31

- Peso equivalente es el peso atómico o molecular del compuesto dividido por la valencia.
- Equivalente gramo es el peso equivalente expresado en gramos.

Al ser los contenidos en esta unidad muy pequeños se emplea su submúltiplo meq/l.

$$ppm = mg/l = g/m^3 = meq/l \times \text{peso equivalente}$$

$$uS/cm = 10^3\ mS/cm = 10^3\ dS/m = 10^{-4}\ S/m$$

$$S/m = 10\ mS/cm$$

$$CE = meq/l/12$$

2.9. Solubilidad de las sales

Aunque la solubilidad de las sales depende como hemos indicado a lo largo de este capítulo de una serie de factores, es necesario conocer a título al menos orientativo las solubilidades aproximadas de las principales sales con las que nos vamos a encontrar en el agua.

Como las sales se concentran en el rechazo y pueden precipitar, podemos actuar en el diseño mecánica o químicamente para evitarlo.

CUADRO 10

Solubilidad de sales

Sal	*Mg/l*	*T °C*
Cl_2Mg	353	
CO_3Ca+CO_3Mg	10 meq/l	
$SO_4Ca.H_2O$	2,04	
CO_3Na_2	122-371	10°-30°
CO_3HNa	80-104	10°-30°
SO_4Mg	262	
SO_4Na_2	90-373	10°-30°
ClNa	318	
NO_3Na	686	
NO_3K	279	

CAPITULO 3

OSMOSIS INVERSA

3.1. Descripción del proceso

La tecnología de la ósmosis inversa se basa en el proceso de ósmosis, que es un fenómeno natural que se produce en las células de los seres vivos, por el cual dos soluciones de distinta concentración salina puestas en contacto a través de una membrana semipermeable tienden a igualar sus concentraciones.

Para ello se produce un movimiento desde la solución más diluida hacia la más concentrada, que se detiene cuando se alcanza 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. El proceso queda esquematizado en las figuras 3.1 y 3.2.

Cuando dos soluciones de diferente concentración o salinidad están colocadas en dos recipientes separados por una pared impermeable, cada una de ellas alcanza en el depósito correspondiente una altura que es función únicamente del volumen de la solución y del diámetro del depósito. Si igualamos la altura de las soluciones en los dos recipientes, tendríamos la figura 3.1.a.

Si sustituímos la citada pared por una membrana semipermeable (permeable al agua, no a las sales) se produce un movimiento a través de la membrana desde la solución más diluida a la más concentrada, tal como el que aparece representado en la figura 3.1.b, que se detiene cuando se alcanza un desnivel entre ambos tubos, Δh, que corresponde a la presión osmótica de la solución más concentrada, o más propiamente a la diferencia de presiones osmóticas entre ambas soluciones.

Este valor Δh es la presión diferencial que impulsa el agua a través de la membrana. Si invertimos el proceso aplicando una presión en el tubo de la solución más concentrada, figura 3.2.a, el movimiento se produce desde ésta hacia la más diluida.

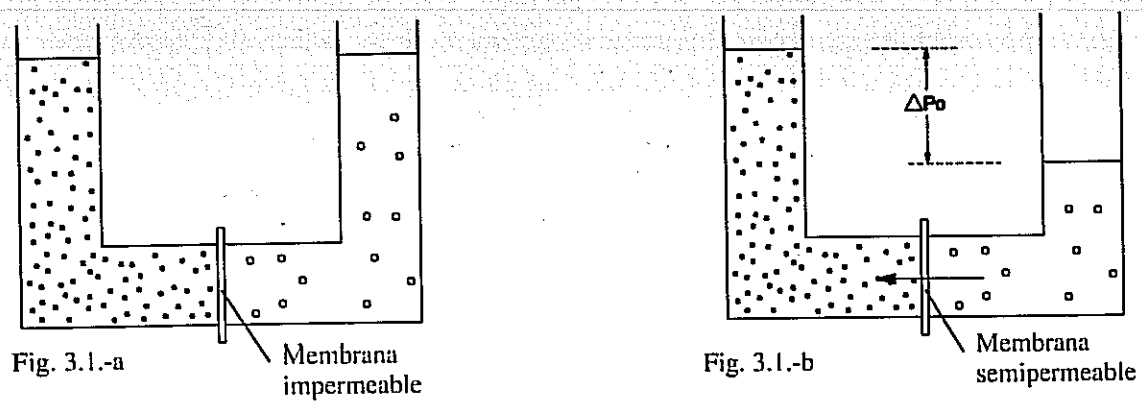


Figura 3.1. Principios del proceso de ósmosis.

Finalmente se alcanza una posición de equilibrio como el de la figura 3.2.b. La altura que alcanza la solución en el nuevo equilibrio es función de la presión aplicada, de las características de la membrana y de las concentraciones de ambas soluciones.

Este proceso es lo que constituye la ósmosis inversa.

Se le llama así porque para conseguir un flujo de solvente a través de la membrana hay que ejercer al menos una presión suficiente para vencer la presión osmótica de la solución.

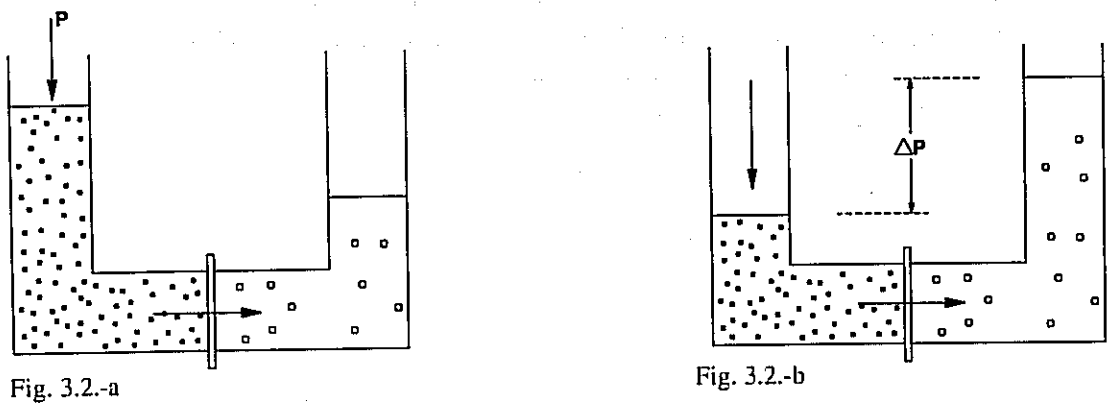


Figura 3.2. Principios del proceso de ósmosis inversa.

En la práctica, sin embargo, no es necesario vencer la presión osmótica de la solución de alimentación, sino sólo la diferencia de presión osmótica entre las soluciones de alimentación y producto. Esta presión depende del flujo de agua a través de la membrana y cambia de cero hasta un límite dado por las características de la membrana.

Con las membranas reales puede producirse flujo con diferencias de presión que son pequeñas comparadas con la presión osmótica de la solución de alimentación, pero la desalación, o mejor dicho el caudal desalado, es en estas circunstancias, prácticamente despreciable.

Si analizamos las distintas fases de este proceso vemos que los elementos fundamentales para poder reproducir este fenómeno a escala industrial lo constituyen la bomba necesaria para aplicar la presión y la membrana capaz de realizar la separación de sales.

Como se comprende, el elemento diferenciador de la ósmosis inversa frente a otros procesos es la membrana, la cual debe reunir una serie de características:

— Debe ser capaz de resistir las presiones a que se va a someter la solución para invertir el proceso.

— Suficientemente permeable al agua para que el flujo que proporciona sea elevado.

— Rechazar un porcentaje de sales elevado para que el producto sea de buena calidad.

Quizás pueda existir una cierta duda o ambigüedad respecto a cuál es el proceso de ósmosis normal y cuál el inverso.

Parece que el normal debería ser aquél en que el solvente fluye a través de la membrana desde una solución diluida hasta otra más concentrada y el flujo de soluto es despreciable. Sin embargo, con las membranas reales también hay un flujo de soluto en dirección opuesta al flujo del solvente.

El contraste con la ósmosis inversa en que los flujos son en la misma dirección, es por tanto incompleto y el término es en consecuencia impreciso.

3.2. Diferencias entre ósmosis y otros procesos de membranas

Aunque en ocasiones se ha querido ver la ósmosis inversa como un proceso de filtración a escala molecular, se comprende fácilmente que la ósmosis inversa es un fenómeno claramente diferente de la filtración o microfiltración.

Los tres aspectos que marcan más claramente la diferencia son:

— En la filtración todo el caudal atraviesa el elemento separador, que impide únicamente el paso de partículas sólidas de un determinado tamaño.

  En la ósmosis inversa en cambio, sólo una parte del caudal de alimentación atraviesa la membrana constituyendo el producto, mientras el resto es eliminado sin atravesar la membrana y constituye el rechazo.

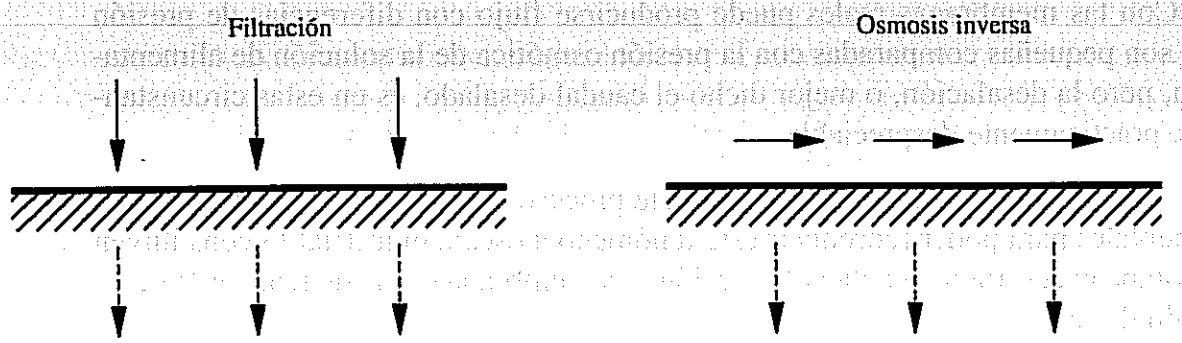


Figura 3.3. Direcciones del flujo en procesos de separación.

— En la ósmosis inversa no se produce la acumulación del material separado sobre la superficie de la membrana, como ocurre en el otro proceso, pues precisamente el rechazo produce el arrastre de dicho material.

— En la filtración el flujo de agua a tratar es perpendicular a la membrana, mientras que en la ósmosis es paralelo a ella.

Podría en cierta medida considerarse la ósmosis como una extensión de la ultrafiltración, en la que las partículas de dimensiones coloidales son separadas de sistemas dispersos, pasándolas a través de una membrana adecuada o filtro. Pero también existen diferencias entre ósmosis y ultrafiltración.

En este último proceso la forma en que se realiza la separación puede interpretarse como si se tratara de un cribado de partículas a través de una película o matriz provista de poros de las dimensiones adecuadas.

Sin embargo la separación de sales del agua no puede reducirse a unos términos geométricos tan simples, porque no hay una diferencia substancial entre el tamaño de las moléculas de agua y el tamaño de muchos iones inorgánicos.

También es preciso separar claramente la desalación por ósmosis inversa del otro proceso de desalación que como ya se ha citado anteriormente también utiliza membranas, que es la electrodiálisis.

Así, en la ósmosis, el agua es separada de las sales, mientras que en la electrodiálisis son los iones que constituyen las sales los que abandonan el agua, atraídos por electrodos de distinta carga.

Por otra parte la fuerza que rige el proceso de ósmosis inversa es la presión, mientras que en la electrodiálisis es el potencial eléctrico.

3.3. Teorías de la ósmosis

La membrana de ósmosis debe pues ser capaz de afectar a las propiedades termodinámicas y de transporte del agua y de las sales, mediante fuerzas que no de-

penden en principio del tamaño de los iones o moléculas que han de separarse. Estas fuerzas pueden ser de rango corto como las de Van der Waals o de rango largo como las de Coulomb.

La forma en que se produce el paso de agua a través de la membrana responde a dos teorías:

— Según Sourirajan, existe un flujo convectivo de agua a través de los poros de la membrana, que se produce en dos etapas:
  - En la primera el agua es absorbida preferencialmente sobre la superficie de la membrana.
  - En la segunda, esta capa con el agua absorbida es drenada a través de los poros en la membrana.

Según este modelo, el tamaño molecular de los materiales del agua de alimentación juega un importante papel en la determinación de su rechazo por la membrana.

— La teoría alternativa propuesta por Merten parte de que la membrana no tiene poros y por tanto el flujo convectivo no puede existir.

En su lugar el agua se disuelve en la capa superficial de la membrana y después se difunde a través de una capa sin poros de la misma.

En este segundo modelo el rechazo es función de la solubilidad relativa del soluto y del solvente.

Este modelo de solución-difusión parece que permite predecir correctamente el comportamiento de las soluciones compuestas de una sola sal iónica, que actúan frente a la ósmosis como si se tratara de una filtración. Sin embargo su capacidad de predicción del comportamiento para los solutos orgánicos es menos fiable. Ambos modelos predicen con bastante exactitud el flujo neto de agua, que desciende al aumentar la presión osmótica a causa de la acumulación de solutos cerca de la superficie.

3.4. Ecuaciones fundamentales

El proceso de desalación que acabamos de describir queda enmarcado por una serie de ecuaciones que definen o aclaran los distintos aspectos que deben conocerse, y que en última instancia permiten realizar el proyecto o diseño de las distintas instalaciones.

Si partimos de los flujos o caudales que se generan en el proceso podemos distinguir:

— Flujo o caudal de alimentación, que es el que se pretende desalar y se aplica en un lado de la membrana: F_a (F_f en la bibliografía anglosajona).

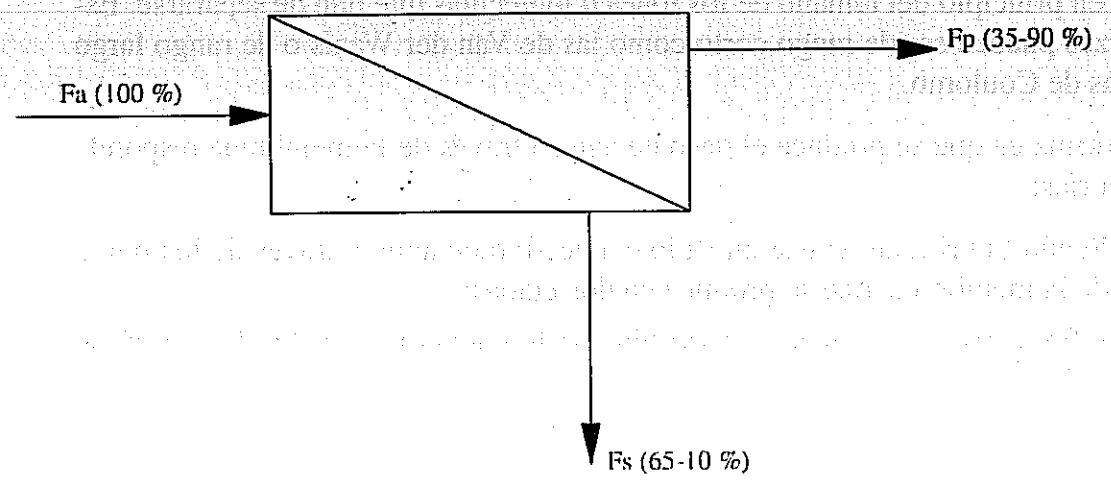


Figura 3.4. Flujos en el proceso de ósmosis inversa.

— Flujo o caudal de producto, que corresponde al agua a la que se le han eliminado o reducido las sales: F_p.

— Flujo o caudal de concentrado (rechazo), que arrastra las sales que han sido separadas por la membrana y que se depositarían sobre ella: F_r (F_b en la citada bibliografía).

La relación entre las citadas magnitudes es:

$$F_a = F_p + F_r \qquad [1]$$

Del mismo modo tendremos las concentraciones del agua de alimentación, C_a (C_f), producto, C_p; y rechazo, C_r (C_b), relacionados entre sí también mediante:

$$C_a \cdot F_a = C_p \cdot F_p + C_r \cdot F_r \qquad [2]$$

A partir de aquí se consideran las dos ecuaciones principales que hacen referencia a la membrana que son:

3.4.1. Ecuación de flujo de agua

$$F_a = A\,(P_m - \Delta Ø_m) \qquad [3]$$

siendo:

F_a = el caudal de agua que atraviesa la membrana en $l/m^2/hora$.

A = coeficiente de transporte de la membrana en $l/m^2/hora\,atm$.

P_m = presión diferencial a través de la membrana en atm, o Kg/cm^2.

$\Delta Ø_m$ = presión osmótica diferencial a ambos lados de la membrana, en atm o Kg/cm^2.

El coeficiente A es característico de cada membrana y depende de varios factores como son, el espesor de la membrana, la temperatura, o la composición química de la solución.

De esta ecuación se deduce que el caudal es directamente proporcional a la presión neta aplicada, es decir, a la diferencia de presiones que aparece entre paréntesis en la fórmula, y al coeficiente de transporte; es decir, a una característica propia de la membrana y a otra propia del funcionamiento.

Por ello, si el coeficiente de transporte aumenta, el caudal también lo haría, sin que fuera preciso aumentar la presión neta. En esas condiciones mantendríamos el mismo caudal aplicando una presión menor. Esta es la característica principal que se busca, junto con el rechazo de sales, en el proceso de mejora de membranas.

Como, de los dos caudales en que se bifurca el caudal a tratar, uno de ellos, la salmuera, concentra las sales rechazadas, éstas en mayor o menor cantidad se van acumulando sobre la superficie de la membrana, produciendo el fenómeno conocido como concentración de la polarización que será tratado más adelante.

Este fenómeno incrementa la presión osmótica de la solución de concentrado y por tanto, de acuerdo con la ecuación anterior, haría disminuir la presión neta y en consecuencia el flujo o caudal de agua a través de la membrana.

Pero además el caudal de una membrana depende de otros factores como:

— Espesor de la membrana.

— Dimensión de los poros y su distribución en la superficie de la membrana.

— Condiciones hidrodinámicas.

La disminución del espesor de la membrana ha sido una constante de la investigación a lo largo de los años, pero esta característica debe conjugarse con un tamaño de poros adecuado para rechazar un porcentaje suficientemente elevado de sales, y con una resistencia adecuada para soportar las presiones de funcionamiento.

En los últimos tiempos se han conseguido mejoras muy notables en membranas de agua salobre, que funcionan a bajas presiones; sin embargo, las membranas de agua de mar que deben soportar presiones muy elevadas no han logrado avances de la misma magnitud.

El caudal que atraviesa la membrana queda definido en unas condiciones de presión y temperatura predeterminadas, y en cada situación deben aplicarse las correcciones oportunas para adaptarlo a las condiciones reales de funcionamiento; esto es lo que se conoce como normalización de la membrana.

3.4.2. Ecuación del transporte de sales

$$F_s = K_s \cdot (C_a - C_p) \qquad [4]$$

donde:

F_s = flujo de sales, en g/cm²/seg.

K_s = coeficiente de transporte de sales en cm/seg.

C_a = concentración de sales en el agua de alimentación, en g/cm³.

C_p = concentración de sales en el agua producto, en g/cm³.

El coeficiente de transporte de sales es una característica de cada membrana.

La polarización aumenta la concentración de sales en el agua de alimentación, C_a, a medida que el caudal avanza a lo largo de la membrana. Por tanto aumenta el flujo de sales F_s y hace empeorar la calidad del producto.

En esta ecuación se ve que no existe dependencia directa entre la presión y el flujo de sales; es decir, al aumentar la presión no mejora el transporte de sales, ni por tanto tampoco el rechazo de sales.

Sí mejora en cambio el caudal de permeado, por lo que el efecto resultante es una mejora de la calidad, dado que la misma cantidad de sales se disuelven en un volumen mayor.

3.4.3. Rechazo de sales

$$RS\ (\%) = (1 - C_p/C_a) \times 100 \qquad [5]$$

Es el parámetro más importante de la membrana y se basa en el proceso de fabricación y en los polímeros que forman la membrana, constituye el *know-how* de cada fabricante. Sin embargo, este valor para cualquier membrana varía para los distintos iones. Los iones trivalentes, por ejemplo, son rechazados mejor que los divalentes y estos a su vez mejor que los monovalentes. El disminuir el peso molecular en este sentido es lo que ha llevado a veces a considerar la ósmosis inversa como una especie de filtración a escala molecular.

La sílice coloidal es también rechazada en un porcentaje muy elevado.

3.4.4. Paso de sales

$$PS\ (\%) = C_p/C_a \times 100 \qquad [6]$$

por tanto también

$$RS = 100 - PS \qquad [7]$$

La determinación de todos estos parámetros se hace en condiciones específicas determinadas por cada fabricante, aunque suelen standarizarse en cuanto a presión, temperatura, salinidad del agua preparada artificialmente, y en ocasiones recuperación.

3.4.5. Recuperación

También conocida como conversión o recobro del sistema *(recovery)*, es el porcentaje de producto que se obtiene a partir de un determinado volumen de agua de alimentación:

$$R\ (\%) = F_p/F_a \times 100 \qquad [8]$$

F_p y F_a, medidos en las mismas unidades, m^3/hora o m^3/día.

Este factor es muy distinto según se trate de membranas individuales o de módulos en los que intervienen más membranas colocadas en serie.

En las membranas espirales, por ejemplo, dicho factor no suele ser superior al 12-15 % si se trata de membranas de agua salobre y del 10 % en caso de agua de mar.

En membranas de fibra hueca, sin embargo, dicho factor se eleva hasta el 85 % en agua salobre y al 60 % en agua de mar.

Para elevar la conversión de un sistema de membrana es necesario incrementar el número de pasos o escalones de producción.

3.4.6. Concentración del producto

$$C_p = (1 - RS) \cdot (C_a + C_r)/2 \qquad [9]$$

3.4.7. Concentración del rechazo

$$C_r = RS \,.\, C_a/(1 - R) \qquad [10]$$

Este parámetro es importante conocerlo en el diseño, para establecer la forma de eliminación de un caudal, que según los casos puede ser importante y potencialmente contaminante.

En los casos de aguas salobres de salinidad moderada, puede incluso ser aprovechado recirculándolo a la cabecera del sistema.

A través de esta ecuación se ve también claramente cómo se puede influir en la calidad del rechazo para que no cree problemas en su eliminación, decidiendo desde el diseño de la instalación el tipo de membrana a elegir y la conversión del sistema.

Por ejemplo, para un agua con un contenido en sales de 2.000 ppm podemos ver las consecuencias entre elegir membranas con un 87 % o con un 98 % de rechazo y conversiones del 65 o del 75 %

$$C_{r1} = 0{,}87 \cdot 2000/(1 - 0{,}65) = 4972 \text{ ppm}$$

$$C_{r2} = 0{,}98 \cdot 2000/(1 - 0{,}75) = 7840 \text{ ppm}$$

3.4.8. Proporción (ratio) de reducción

$$C_a/C_p = 1/(1\text{-}RS) \qquad [11]$$

Este factor es muy indicativo de la calidad de la membrana y sobre todo permite ver claramente la diferencia entre unas y otras.

Por ejemplo, si una membrana tiene un rechazo de sales del 98,5 %, tendríamos:

$$C_a/C_p = 1/(1 - 0{,}985) = 66{,}6/1$$

y para un RS del 99 %:

$$C_a/C_p = 1/(1 - 0{,}99) = 100/1$$

Es decir, que en el primer caso la reducción es de 66,6 a 1 y en el segundo de 100 a 1. Pero más significativo todavía es este valor en el caso de las membranas de agua de mar.

Si RS fuera del 99,3 % sería:

$$C_a/C_p = 1/(1 - 0{,}993) = 142{,}8/1$$

Pero si fuera sólo un poco superior 99,5 %:

$$C_a/C_p = 1/(1 - 0{,}995) = 200/1$$

Es decir que ese, en teoría, pequeño porcentaje del 0,2 % mejora la calidad de una manera notable, casi en un 30 %.

De ahí que para desalar agua de mar en una sola etapa se necesiten membranas con rechazo de sales igual o preferentemente superior al 99,3 %.

3.5. Configuraciones

La membrana que realiza la separación es una lámina delgada que por sí sola no soportaría los esfuerzos a que hay que someterla en el proceso de separación.

Además, por su reducido caudal unitario, precisaría enormes desarrollos para poder tratar volúmenes importantes.

Por ello necesita ser integrada en una estructura mecánica que le permita tanto soportar los esfuerzos como ocupar el menor espacio posible.

Las membranas de ósmosis inversa que se han desarrollado a lo largo de los años se han estructurado en su configuración en torno a cuatro tipos principales:

3.5.1. Membranas de tipo plano

Es el tipo más sencillo y el que primero se utilizó. Están constituidas por una lámina que se coloca dentro de un marco, circular o rectangular, que actúa de soporte de la membrana y le confiere rigidez y resistencia. La superficie de estas membranas es pequeña, por lo que para aumentar la producción de los equipos que disponen de estas membranas, se colocan unas encima de otras, constituyendo una especie de pilas o columnas de membranas.

La sujección de unas membranas con otras (los discos o marcos correspondientes) se realiza mediante pasadores que prensan exteriormente desde su parte externa las membranas y le confieren un aspecto más compacto o monolítico.

La película empleada como membrana no difiere de las que se emplean en otro tipo de configuraciones, por lo que sus características unitarias de rechazo y caudal son similares a las otras.

El principal inconveniente de este tipo de membranas es su pequeña capacidad productiva, por lo que para utilizarlas en instalaciones de tamaño medio se requieren numerosas membranas colocadas en pilas, que resultan voluminosas, pesadas e incómodas para operar y que encarecen enormemente su coste.

Ello ha motivado el que no hayan tenido demasiado éxito en el tratamiento de aguas potables, en el que los volúmenes a tratar son grandes y que se empleen fundamentalmente en el sector industrial, especialmente el alimentario, para instalaciones de pequeño caudal.

Su principal ventaja es que la separación entre membranas, de 1 a 3 mm, es amplia, por lo que se obstruyen menos que otras y además en caso de ensuciamiento se limpian fácil y eficazmente con aire y agua o, en caso de ensuciamiento persistente, desmontando las correspondientes pilas.

En el sector del agua su mayor aplicación está en aguas muy contaminadas, residuales o con elevada carga orgánica.

3.5.2. Membranas tubulares

Representan una alternativa a las anteriores, buscando conseguir una mayor superficie unitaria, pero sin renunciar a las ventajas de dificultad de ensuciamiento y fácil limpieza.

La membrana, generalmente de 1/2" de diámetro, va alojada en el interior de un tubo de PVC, que soporta la presión del proceso. En algunos casos se colocan varias membranas en el interior de un tubo de 1,5 a 2" de diámetro. El tubo va provisto de los orificios necesarios para entrada y salida de los flujos de agua que intervienen en el proceso.

El agua alimenta a la membrana por su interior y el permeado se obtiene por la parte exterior de la misma. Para aumentar la capacidad de la instalación se colocan varios tubos en paralelo, pero aún en estos casos resulta pequeña.

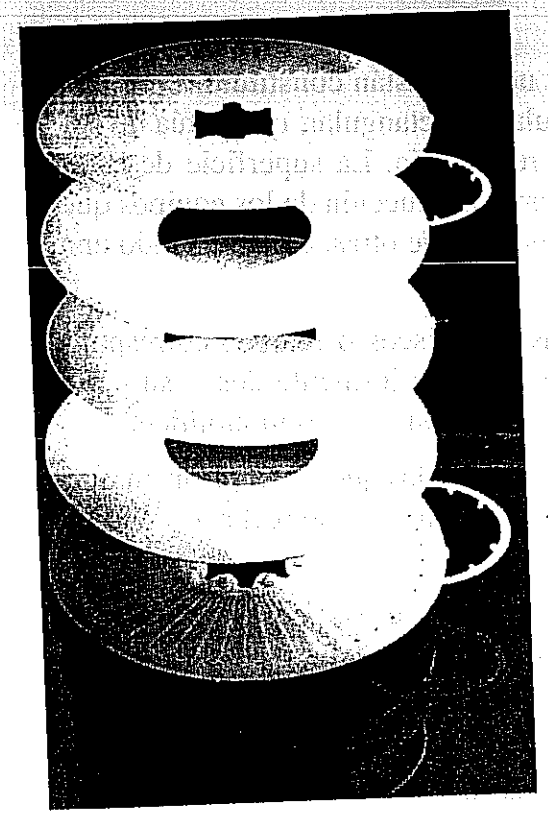


Figura 3.5.a. Membrana plana circular.

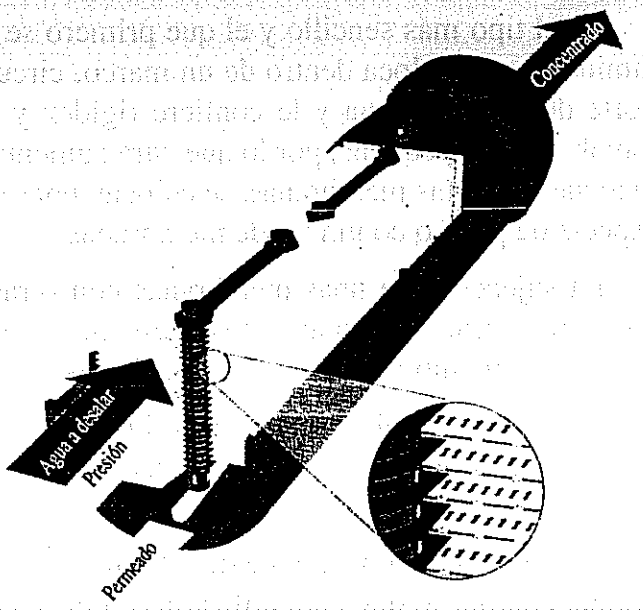


Figura 3.5.b. Membrana plana rectangular.

Aunque algo más compactas que las anteriores siguen siendo demasiado voluminosas en relación con su capacidad productiva.

Su facilidad de fabricación permitió durante algún tiempo su utilización en instalaciones pequeñas industriales para tratamiento de agua

En la actualidad sus aplicaciones se limitan al campo industrial.

3.5.3. Membranas de fibra hueca

Están constituidas por un haz de millones de tubos capilares del tamaño de un cabello humano, huecos interiormente.

Las primeras fibras que se desarrollaron de este tipo eran de acetato de celulosa y producían un caudal muy pequeño. Sin embargo, se consideró que podían ser útiles para desalación puesto que eran muy baratas de fabricar y muy delgadas.

Al comprobarse que la resistencia de la fibra no dependía tanto del espesor de la pared como de la relación entre los diámetros exterior e interior, se pensó que reduciendo su tamaño se podía conseguir una pared extremadamente delgada, que permitiría aumentar su caudal.

Esta delgadez permite su empaquetamiento en poco espacio, dentro de un tubo cilíndrico que constituye la carcasa protectora y permite la circulación de la solución a desalar.

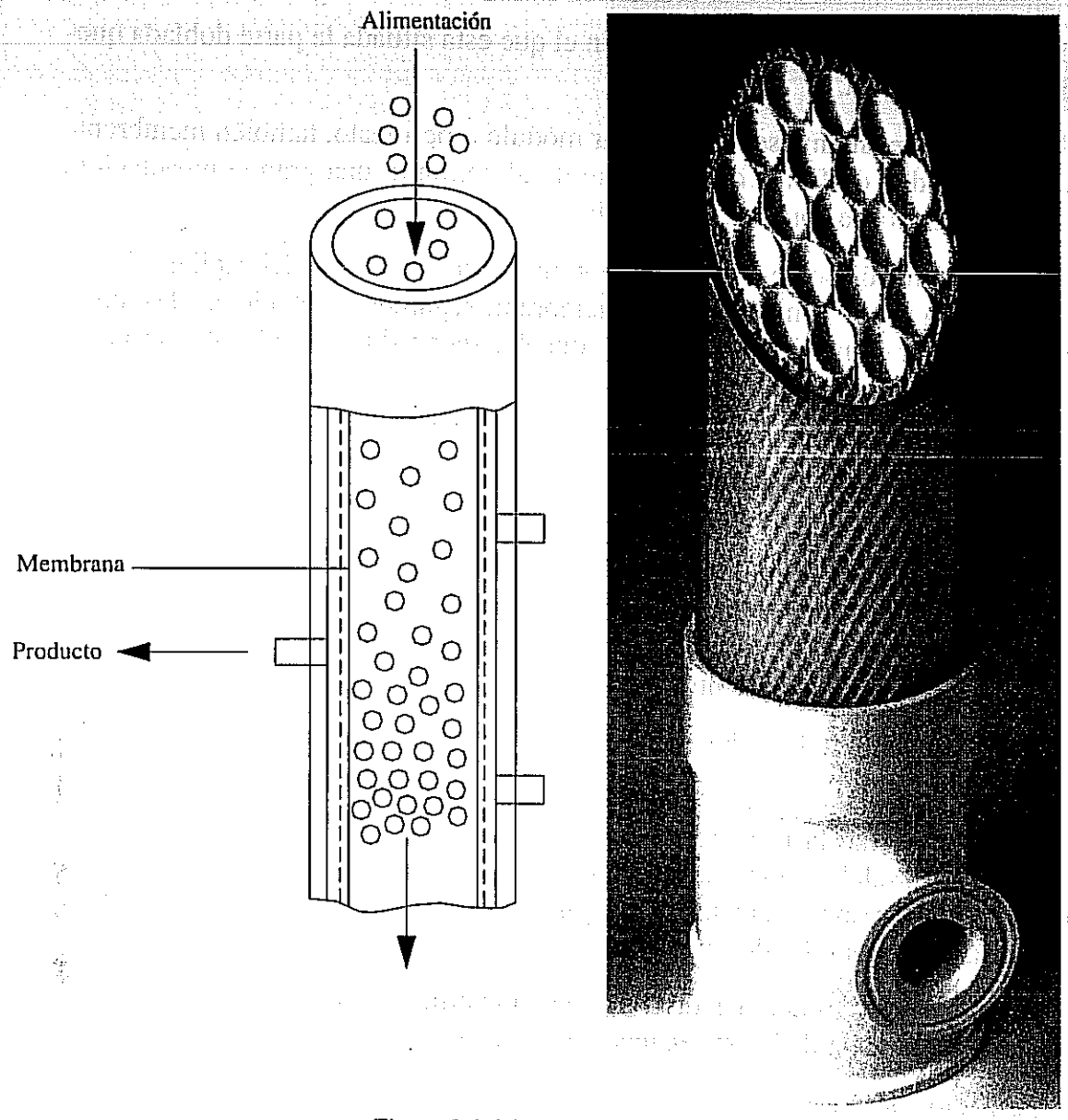


Figura 3.6. Membrana tubular.

Este tubo, para evitar la corrosión, es de un material plástico de alta resistencia como el PRFV. El agua a tratar entra por el extremo de este tubo o carcasa y se distribuye a través de un tubo central provisto de perforaciones en dirección hacia las paredes del tubo.

Las fibras se colocan paralelas alrededor de este tubo central, doblándose en uno de los extremos y retornando al otro, de forma que la longitud de cada fibra es aproximadamente el doble que la del tubo.

Por ambos extremos del tubo las fibras quedan incrustadas en una masa de material epoxi, para darles rigidez.

Posteriormente se corta uno de los extremos de forma que cada fibra queda abierta en uno de los lados del tubo, por ambos extremos, facilitando la salida del

producto, mientras que el otro extremo en el que está situada la parte doblada queda rígidamente sujeta.

El conjunto resultante se suele llamar módulo o permeato, también membrana, y la gran cantidad de fibras que contiene da al conjunto una gran compactación, que ayuda a resistir las presiones aplicadas.

El agua a presión se aplica a la membrana desde el exterior del capilar y la pared de la fibra actúa como lámina o membrana separadora reteniendo las sales, mientras que por el interior o «alma» circula el agua producto que ha atravesado la membrana. La salmuera se desplaza de una manera radial hacia los bordes del tubo siendo recogida mediante un colector para su evacuación.

La superficie de estas membranas es muy grande dado que está constituida por el desarrollo de millones de tubos capilares.

Su caudal unitario es muy pequeño, pero extendido al haz de fibras que constituyen la membrana, determinan un caudal por membrana importante. El espesor de la pared de la fibra es muy grande en relación con su diámetro, lo que le permite soportar las altas presiones utilizadas.

Las membranas de fibra hueca son fabricadas en la actualidad por sólo dos firmas, Dupont y Toyobo.

Dupont, que fué la primera en desarrollar este tipo de membrana, la fabrica tanto para agua salobre como de mar, con las denominaciones generales de Permasep, B-9 y B-10 respectivamente. La segunda ha prestado más atención a la membrana de agua de mar, Hollosep, series HR y HM.

Su composición es también distinta, pues si la primera está fabricada en poliamida aromática, la segunda lo está en una mezcla de acetato y triacetato de celulosa.

Respecto a sus dimensiones, en la membrana Dupont las fibras tienen un diámetro interior de 42 micras y el exterior de 85, mientras que en la de Toyobo dichos diámetros son 65 micras y 165 micras, respectivamente.

3.5.4. Membranas de arrollamiento en espiral

Están formadas por varias láminas rectangulares, que constituyen las membranas propiamente dichas, enrolladas alrededor de un eje cilíndrico provisto de perforaciones que permiten recoger el agua producto.

Para el enrollamiento de las láminas desaladoras se disponen éstas alternadas con un separador impermeable y una malla, de forma que en una membrana arrollada en espiral existen tantas láminas como separadores y mallas.

La malla plástica determina los canales hidráulicos por los que circula el agua a tratar y por su forma cuadriculada garantiza un régimen de funcionamiento turbulento lo que reduce las posibilidades de obstrucción por elementos extraños.

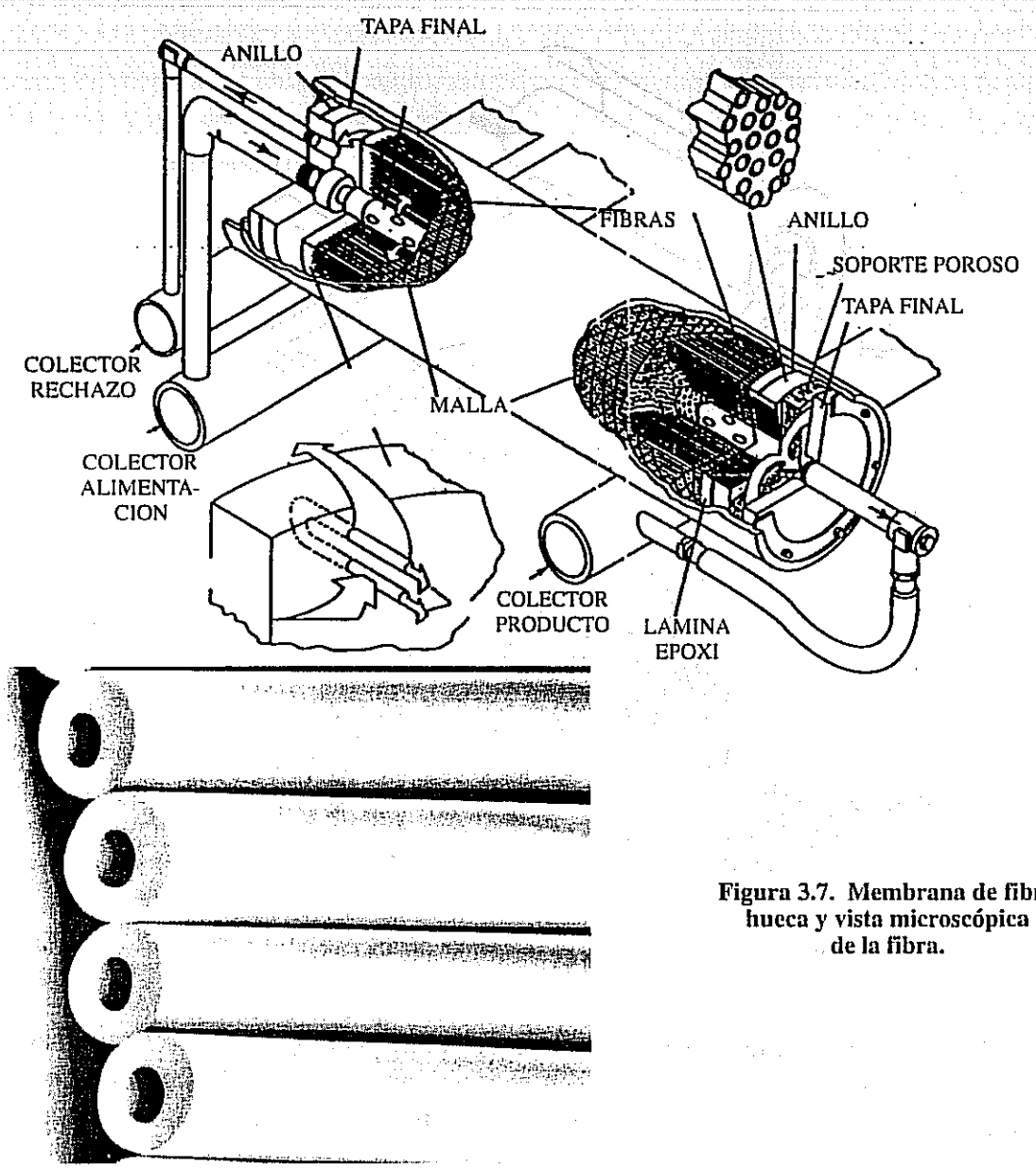


Figura 3.7. Membrana de fibra hueca y vista microscópica de la fibra.

El separador impermeable permite aislar el caudal que pasa por cada una de las láminas o membranas y separarlo de la salmuera.

El conjunto de membranas, mallas y separadores se sella mediante un pegamento por tres de los lados, mientras que por el cuarto lado que constituye la única salida posible para el agua que ha atravesado las membranas, se une al eje perforado.

Finalmente se cierra el conjunto con una envuelta exterior de poliéster con fibra de vidrio, que permite lograr una gran estanqueidad.

El enrollamiento permite introducir una gran superficie de membrana en un espacio reducido.

Con estos dos últimos tipos de configuraciones se ha conseguido reducir considerablemente el espacio ocupado por las membranas, aumentado la capacidad del módulo y reducido su precio.

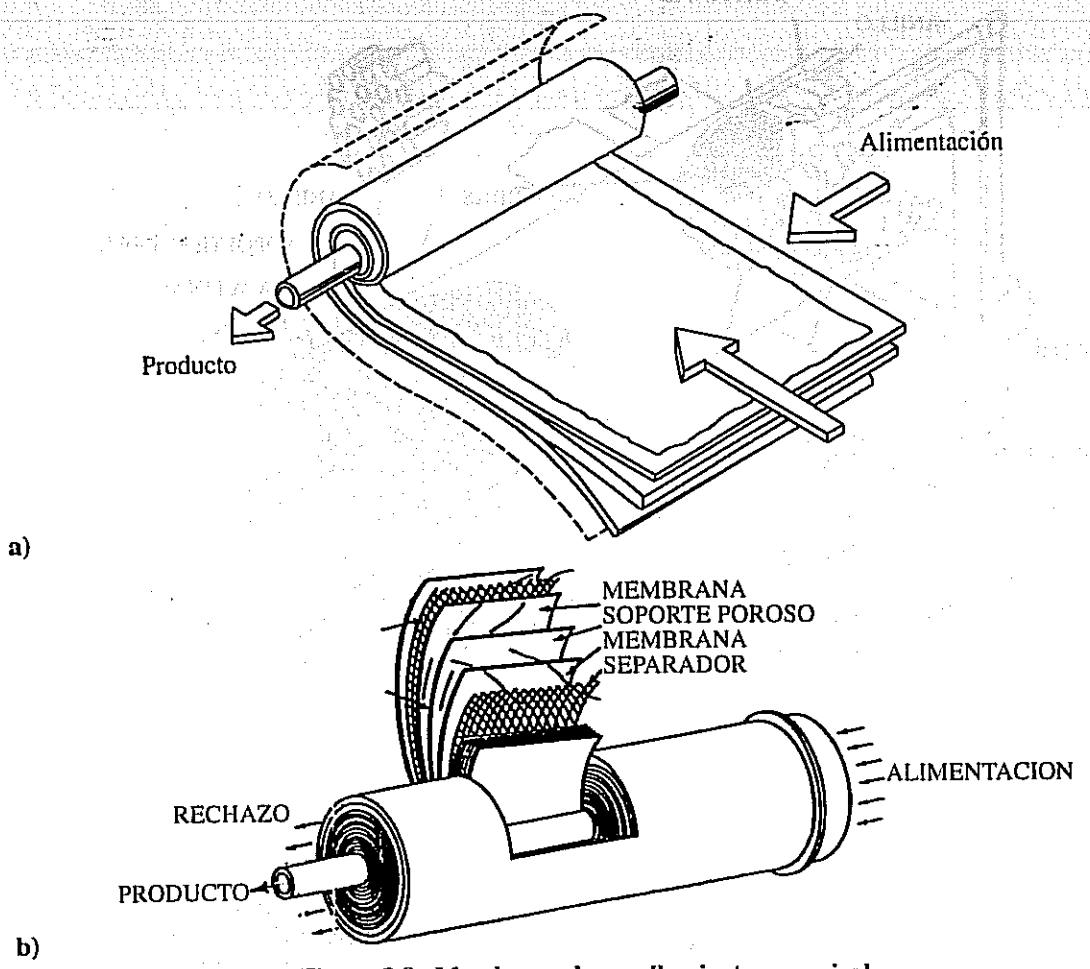


Figura 3.8. Membrana de arrollamiento en espiral.

En los tratamientos de desalación de agua, tanto salobre como de mar, para abastecimientos urbanos y agrícolas, sólo se emplean estos dos últimos tipos, por lo que en adelante, al referirnos a membranas, se tratará siempre de fibra hueca o arrollamiento en espiral.

Los fabricantes de membranas originales existentes en el mundo son también escasos, dado que únicamente se trata de dos japoneses y cinco norteamericanos.

Otros fabricantes de membranas que pueden encontrarse en el mercado, no son sino licenciatarios de alguno de los anteriores.

Se trata en definitiva de los siguientes:

— Toray, Hydranautics, Fluid Systems, Filmtec-Down, Desal Nitto-Denko y Trisep.

3.6. Membranas comerciales

Las membranas que se fabrican en la actualidad están normalizadas, con objeto no sólo de poder ser comparadas entre sí, en torno a unas condiciones de funcio-

namiento tipo, sino también y en el caso de las membranas de arrollamiento en espiral, poder sustituir unas por otras.

Esta normalización se basa fundamentalmente en el diámetro exterior de la membrana que suele ser de 4" u 8".

En cuanto a su longitud, las membranas espirales más comerciales suelen ser de 1 metro, aunque las de 8" se fabrican también de 1,5 m. Precisamente esta última longitud se está introduciendo cada vez más con objeto de aumentar el caudal, ya que se aprovecha mejor el espacio disponible.

Las membranas de fibra hueca, por su mayor capacidad unitaria, se consideran módulos individuales y sus diámetros comerciales son variables y específicos de cada fabricante. Ello impide con carácter general la sustitución de unas membranas por otras de distintos fabricantes.

Muy recientemente se han comenzado a producir, por uno de los dos únicos fabricantes de este tipo de membranas, unidades similares a las del otro, para poder reemplazarlas.

Respecto a las pruebas en que quedan caracterizadas varían según que las membranas sean de agua de mar o salobre, pero tienen en cuenta en ambos casos:

— La salinidad del agua de alimentación.
— La temperatura del agua.
— La presión de funcionamiento.
— La recuperación por elemento.

Para usos muy específicos se fabrican membranas espirales de 6", como ocurre con todas las instalaciones militares del ejercito de Estados Unidos.

En alguna instalación grande y de forma excepcional se han construido en el pasado membranas de 12", hoy fuera de todo uso.

CUADRO 11

Condiciones de prueba de las membranas

Tipo membrana	*Salinidad ppm*	*Temp °C*	*PH*	*Presión Kg/cm²(psi)*	*Conversión %*
Arrollamiento espiral					
Salobre baja presión y acetato de celulosa	1.500	25	5-6,5	15,5 (225)	10
Salobre media presión	2.000	25	6,5-7	27,6 (400)	10-15
Salobre ultrabaja presión	500	25	6,5-7	5,5-10,2 (80-150)	10
Nanofiltración	500	25	6,5-7	3,5-5,5 (50-80)	10
Agua de mar	32.000-35.000	25	6,5-7,5	55,2 (800)	10
Fibra Hueca					
Agua salobre	1.500	25	7,5	27,6 (400)	75
Agua de mar	35.000	25	7,5	68,9 (1000)	35

A este respecto resulta anecdótica la instalación de Yuma (Arizona) construida hace mas de 10 años y proyectada con membranas de este diámetro. La desaladora no se completó y únicamente se instalaron los tubos de presión. Hoy día completar la misma supondría la fabricación de unidades especiales de ese diámetro que no son elementos de serie de ningún fabricante.

Pero además de estas membranas que podríamos denominar industriales, dado que se utilizan para instalaciones de una cierta capacidad, también se fabrican actualmente otras membranas de arrollamiento en espiral que podríamos denominar «domésticas», para instalaciones caseras pequeñas y que pueden ser de 1,5, 2" y 2,5".

Estas membranas se fabrican en longitudes de 20, 30 y 40" y no están sujetas a controles de calidad tan precisos como las anteriores.

Aunque los fabricantes citados anteriormente también fabrican este tipo de membranas, es un tipo de producto al alcance de industrias más pequeñas y que lo que realmente realizan es el enrollado de la película o membrana que compran a alguno de los fabricantes.

3.7. Diferencias principales

Dejando a un lado las diferencias que existen en función del material constituyente, según sean poliamidas o derivados celulósicos, y que se recogen en otro lugar, existen algunas diferencias según sean las membranas de fibra hueca o arrollamiento en espiral.

Los otros tipos de configuraciones ya hemos dicho que tienen un menor uso y en el apartado correspondiente a su descripción se exponían algunas de sus ventajas.

En cuanto a los dos tipos principales que nos ocupan, aunque no existen ventajas categóricas entre unas membranas y otras, a título informativo se pueden establecer las siguientes diferencias:

3.7.1. Caudal

Las membranas espirales son más permeables, tienen mayor caudal unitario (l/m^2) que las de fibra hueca, pero estas últimas, al tener más superficie por módulo, son finalmente de mayor capacidad. En consecuencia, en una instalación de una determinada capacidad de producción, las membranas de fibra hueca son menos y por tanto ocupan menos espacio que las membranas espirales.

Esto queda reflejado en los siguientes datos comparativos para una membrana de 8":

- *Superficie activa eficaz*
  - — Membrana de fibra hueca, 575 m^2.
  - — Membrana de arrollamiento en espiral, 186 m^2.

- *Volumen ocupado*
  - — Membrana fibra hueca de 8", 42,5 litros.
  - — Tubo de 8" con 6 membranas espirales, 227 litros.
- *Caudal*
  - — Membrana de fibra hueca de 8", 388-555 m^3/día.
  - — Tubo seis membranas espirales 8", 49-68 m^3/día.

3.7.2. Presión de funcionamiento

La menor permeabilidad de las membranas de fibra hueca exige mayores presiones transmembrana para vencer la presión osmótica. Por tanto las presiones de funcionamiento suelen ser mayores.

Por ello la resistencia que deben soportar ambos tipos de membranas son distintas y así como las membranas de fibra hueca de agua de mar se fabrican para soportar presiones de 84 Kg/cm^2 (1.200 psi), las de arrollamiento en espiral soportan 70,5 Kg/cm^2 (1.000 psi).

La consecuencia fundamental de esto es el mayor consumo energético que en general tienen las instalaciones de fibra hueca.

3.7.3. Ensuciamiento

La gran compactación que se consigue con los permeatos de fibra hueca determina espacios muy pequeños entre las fibras, normalmente inferiores a 20 micras.

En cambio en las membranas de arrollamiento en espiral los canales hidráulicos que se determinan mediante las mallas separadoras son bastante superiores, por lo que, al menos desde un punto de vista teórico, las membranas de fibra hueca son más propensas a ensuciarse u obstruirse que las espirales. De hecho los fabricantes de las primeras exigen que el SDI del agua a tratar sea inferior a 4, mientras que en las otras permiten valores de dicho índice no superiores a 5.

Pueden por tanto ser necesarios sistemas de pretratamiento más caros.

Las constantes mejoras que están introduciendo los fabricantes hace, sin embargo, que estas afirmaciones no sean categóricas, y que según el tipo de instalación la respuesta de un tipo u otro de membrana sea distinto de lo enunciado.

3.7.4. Rechazo de sales

Las membranas de fibra hueca suelen tener rechazos inferiores a las de arrollamiento en espiral. Así como en estas últimas valores del 99,5 % son normales y algún fabricante incluso ofrece productos con rechazos del 99,8 %, los de fibra hueca no superan el 99,4 %.

Sin embargo, a tenor de esta afirmación podrá sorprender al lector encontrarse instalaciones de agua de mar con membranas de fibra hueca, que dan mejor calidad que las de arrollamiento en espiral, colocada en las mismas condiciones.

La justificación a esta aparente contradicción se encuentra en la mayor superficie de membrana que tienen las instalaciones de fibra hueca y la mayor recuperación por elemento, 35-50 % frente al 10-15 %. De esta forma las sales que atraviesan las membranas se disuelven en un volumen mayor desde la primera membrana, por lo que la concentración de éste es menor y en consecuencia el producto de menor salinidad.

En las membranas de arrollamiento en espiral, como se colocan 6 o más en un mismo tubo, el permeado que sale de la primera membrana es de excelente calidad, pero a medida que el agua avanza a través de las membranas se va concentrando y la presión de alimentación descendiendo, por lo que en cada membrana el caudal producido es menor y la salinidad mayor que en la membrana anterior. El resultado final del tubo es el de la mezcla de las producciones de todas las membranas del mismo.

3.7.5. Pérdida de propiedades

Las membranas van perdiendo con el tiempo algunas de sus características más importantes, como caudal o rechazo de sales. Se debe principalmente a la compactación producida por las altas presiones aplicadas, y a la acumulación sobre su superficie de elementos disueltos o en suspensión que lleva el agua.

La limpieza con determinados productos químicos restaura en parte sus propiedades, pero las membranas de fibra hueca requieren además la aplicación de una capa química, que se adhiere a la superficie de la membrana y que es la responsable del rechazo de sales. Es decir, que actúa como si esta capa fuera una especie de membrana dinámica.

La aplicación de esta capa encarece la utilización de estas membranas, especialmente en condiciones difíciles que obligan a recurrir a limpiezas frecuentes.

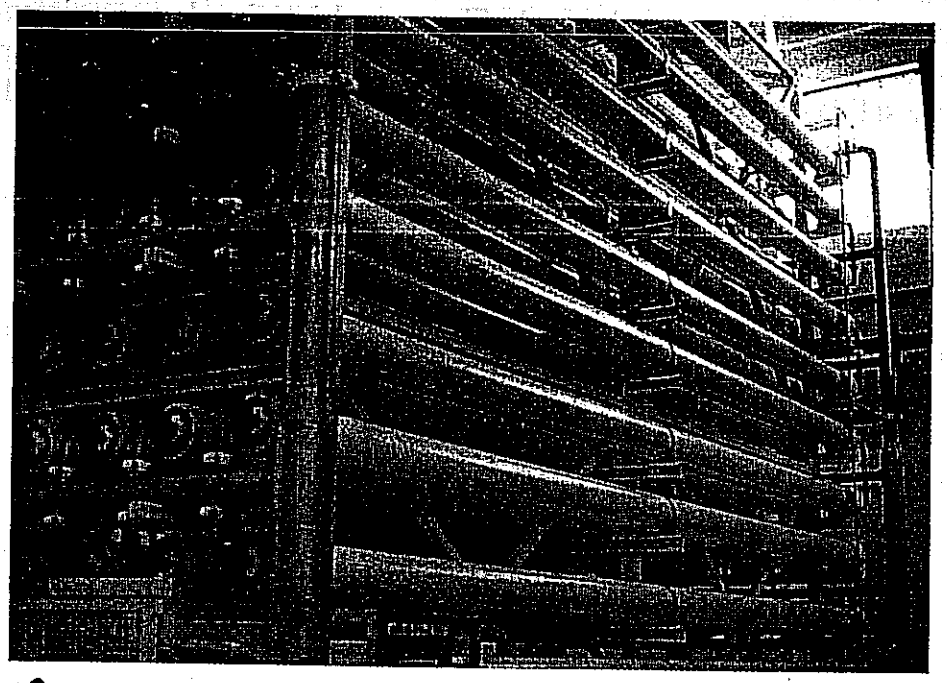
Sin embargo también se ha comprobado que esta capa actúa como barrera protectora de la matriz de la fibra, de forma que en situaciones de ambientes oxidantes o con productos extraños en el agua, es esta capa y no la verdadera membrana la que se deteriora y por tanto puede ser sustituida fácilmente.

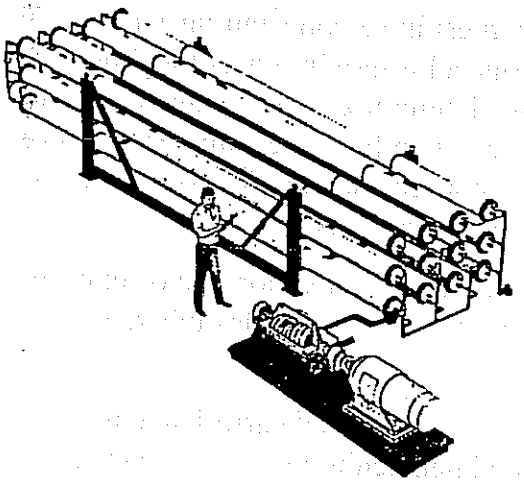
La recuperación en el rechazo que se consigue con esta capa dinámica es muy importante, de forma que incluso al cabo de varios años, las membranas producen después de la aplicación de dicha capa un agua de salinidad muy baja, aunque la persistencia en el tiempo de esta calidad es cada vez menor, obligando a aplicaciones cada vez más frecuentes.

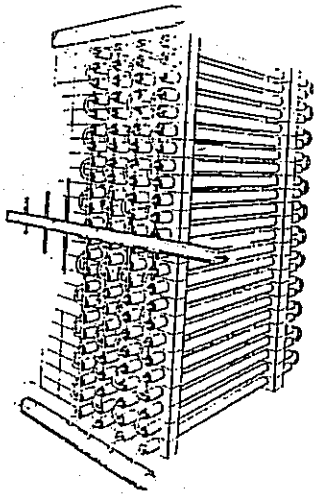
En las membranas espirales, que no requieren este tipo de aplicación, la recuperación del rechazo es menos espectacular.

3.8. Modulación de las membranas

Las membranas tanto espirales como de fibra hueca deben colocarse en la instalación en una estructura resistente que las mantenga inmóviles ante las presiones que se aplican.







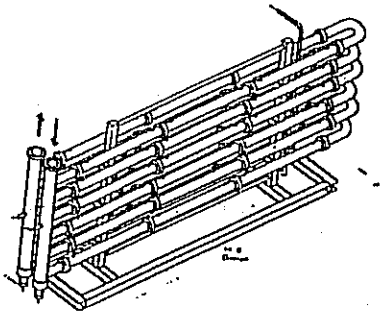


Figura 3.9. Bastidor de ósmosis inversa.

Asimismo la colocación de las numerosas membranas de que puede constar una instalación debe ocupar el menor espacio posible.

Las fibras componentes de la membrana de fibra hueca se alojan en un tubo de presión de PRFV, que constituye lo que se conoce normalmente como módulo de fibra hueca o incluso membrana de fibra hueca. Es decir que una membrana de fibra hueca es en realidad un conjunto de fibras en el interior de un recipiente de presión perfectamente sellado y con los correspondientes colectores, para permitir la entrada y salida de los distintos flujos que se generan en el proceso. Los distintos tubos se colocan en paralelo o en serie para alcanzar la producción necesaria.

Todos estos tubos se colocan en una estructura que los soporta, con todas las conexiones necesarias entre ellos, así como los colectores de alimentación, producto y rechazo del conjunto.

Esta estructura con el conjunto de tubos y colectores, que forman la unidad de producción típica de cada instalación, y que se alimentan desde una bomba, constituye el bastidor o tren de ósmosis inversa.

En el caso de las membranas de arrollamiento en espiral, cada unidad formada por un conjunto de láminas va recubierta exteriormente de una película de poliéster reforzado con fibra de vidrio y alojadas en un tubo de presión, generalmente también de este material, con capacidad para alojar 6 ó 7 elementos, aunque también se construyen para aplicaciones específicas, de 2, 3 ó 4 membranas.

Las membranas en el interior del tubo de presión se conectan unas con otras, para que formen un conjunto estanco y resistente a los movimientos longitudinales y transversales, mediante los correspondientes interconectores, también de material plástico y alta resistencia. De esta forma se evitan fugas de salmuera que contaminarían el producto y deformaciones como consecuencia de los sucesivos golpes de ariete que se producen cada vez que se arranca la instalación.

Los tubos de presión, de uno y otro tipo, están cerrados por ambos extremos con sendas tapas que disponen de orificios para la conexión de las tuberías de alimentación, producto y rechazo.

Recientemente en los tubos de presión para membranas de arrollamiento en espiral han aparecido unidades en que tanto la alimentación como el rechazo se conectan lateralmente, facilitándose considerablemente los montajes en el conjunto del bastidor.

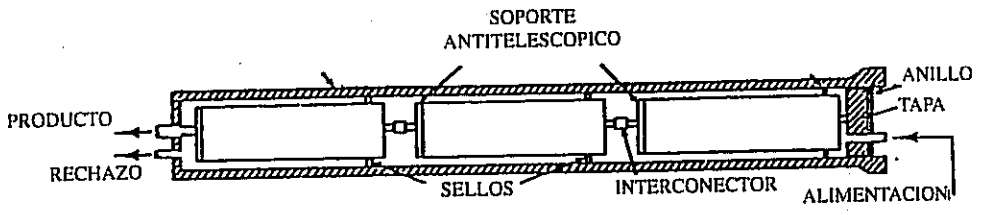


Figura 3.10. Tubo de presión.

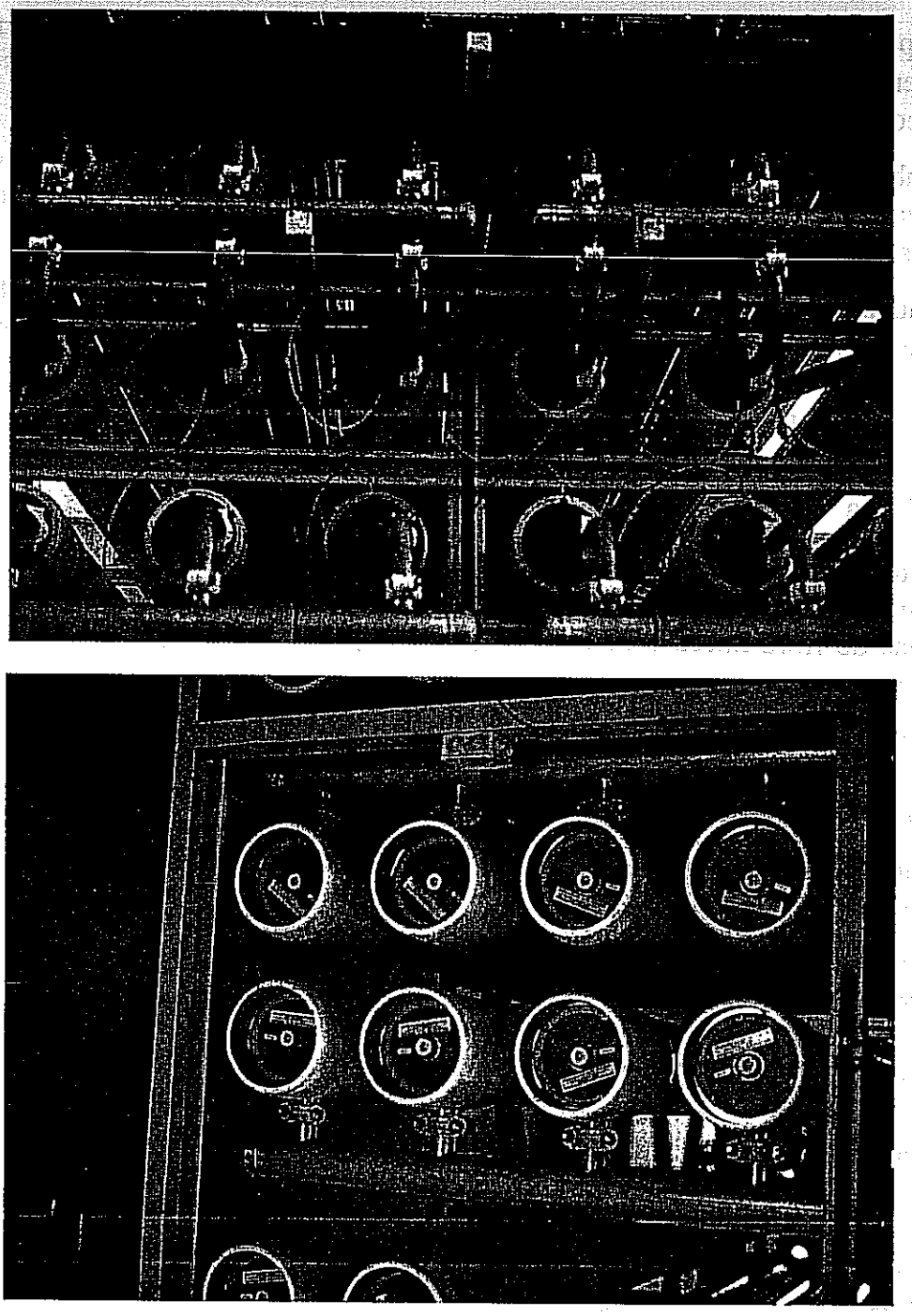


Figura 3.11. Tubos de presión con acometidas central y lateral.

3.9. Colocación de las membranas

Las membranas tienen una superficie limitada y también una producción determinada. Como por otra parte el porcentaje de recuperación por elemento es relativamente pequeño, 10-50 %, si colocáramos un sólo elemento en la instalación, una gran parte del caudal de agua a tratar sería desperdiciado como salmuera, con la consiguiente ineficiencia del sistema.

Para aprovechar mejor el caudal de salmuera ya hemos indicado anteriormente que las membranas se colocan en serie, para que el rechazo de una membrana sea utilizado como alimentación de la siguiente.

Los tubos de presión con capacidad de 6-7 membranas para membranas de arrollamiento espiral y la colocación por parejas de los permeatos de fibra hueca, mejoran esta recuperación, pero aun así su capacidad sigue siendo limitada.

Para adaptarse a la producción deseada deben colocarse por tanto los distintos módulos en paralelo. De aquí surgen los distintos tipos de estructuras de producción en que se colocan las membranas. Para comprender su explicación es necesario conocer previamente dos conceptos importantes:

3.9.1. Etapa

Es cada una de las unidades de producción que son alimentadas desde una fuente única (bomba de presión). Es decir, un conjunto de tubos de presión o de membranas de fibra hueca colocadas en paralelo y alimentadas por una bomba constituye una etapa.

Si para aumentar la eficiencia de la instalación, el rechazo de los tubos de presión o permeatos, que sale a una determinada presión, se introduce en otro tubo de presión o membrana, estos tubos o permeatos constituyen otra etapa.

Se comprende fácilmente que al aumentar el número de etapas de una instalación, se eleva el caudal recuperado como producto.

Sin embargo, como al pasar el agua de alimentación de una membrana a otra, se va incrementando su salinidad y el rechazo de sales de la membrana no varía, de acuerdo con la ecuación (4) aumenta el flujo de sales y por tanto empeora la calidad. Es decir, que al aumentar el número de etapas empeora la calidad del agua producto.

3.9.2. Paso

Es el conjunto de tubos de presión o membranas que siendo alimentadas con los caudales de agua que salen de las membranas de la primera etapa de la ósmosis precisan de otra fuente de energía distinta de la anterior para recuperar un nuevo caudal.

Resumiendo, si el caudal de agua producto o el caudal de rechazo de una instalación de ósmosis es rebombeado mediante otra bomba que eleva su anterior presión, para alimentar a otro conjunto de membranas, estamos hablando de un paso. A partir de aquí tendríamos las siguientes estructuras de produción:

3.9.3. Simple

Es un conjunto de membranas individualmente o en tubos de presión, colocadas en paralelo, que son alimentadas desde una bomba.

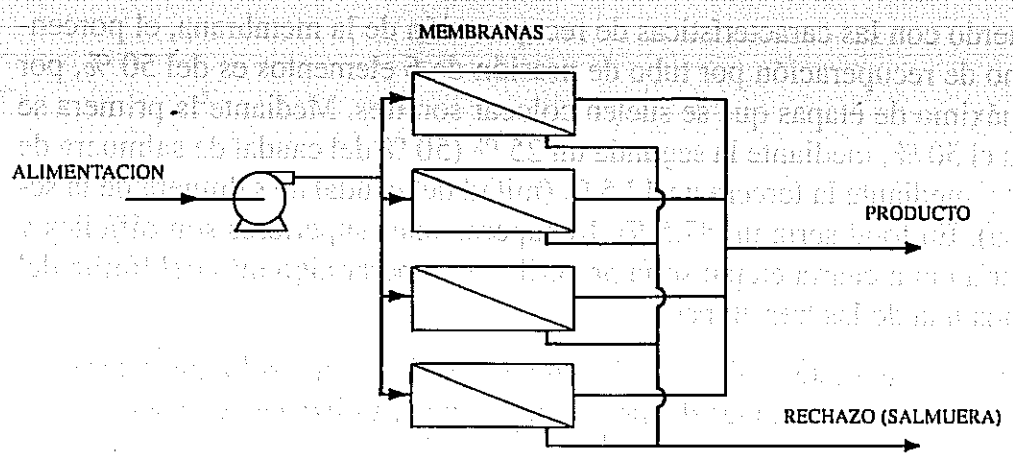


Figura 3.12. Instalación de simple etapa.

Como hemos dicho, este tipo de estructura, demasiado ineficiente, sólo se usa en instalaciones piloto o experimentales, o en la industria para extracción de jugos u otros líquidos o sólidos de gran valor.

También las instalaciones de agua de mar, por su baja recuperación, admiten este tipo de estructura.

La figura 3.12 muestra el esquema de una instalación de este tipo.

3.9.4. Etapas de salmuera

Es la estructura más frecuente de producción y consiste en una serie de tubos colocados en paralelo y otros en serie, de forma que la salmuera de los primeros es utilizada como alimentación de los segundos. En la figura 3.13 aparece una instalación de este tipo de tres etapas.

Como puede verse, dado que en cada etapa se recupera una parte de producto, el caudal de salmuera que llega a la segunda etapa es menor que el inicial y así sucesivamente, por lo que en cada etapa disminuye el número de tubos.

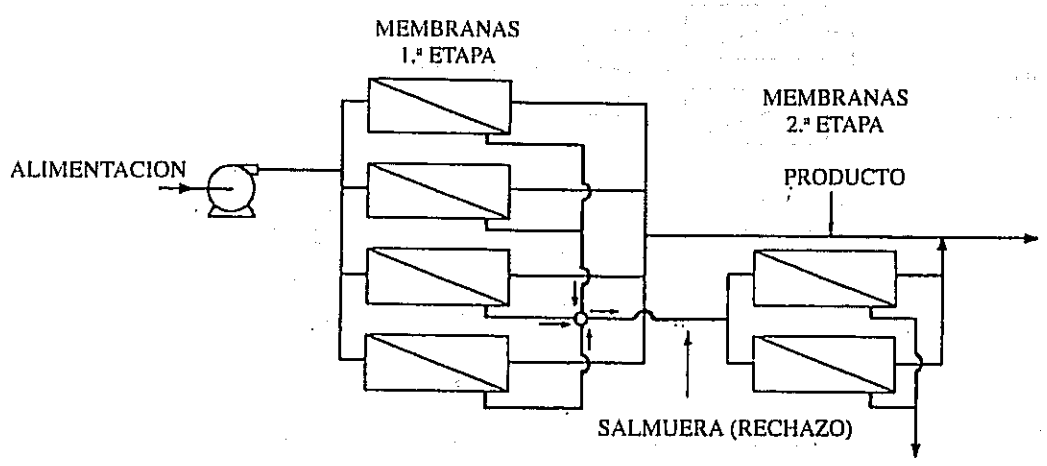


Figura 3.13. Instalación de etapas de salmuera.

De acuerdo con las características de recuperación de la membrana, el porcentaje máximo de recuperación por tubo de presión de 6 elementos es del 50 %, por lo que el máximo de etapas que se suelen colocar son tres. Mediante la primera se recuperaría el 50 %, mediante la segunda un 25 % (50 % del caudal de salmuera de la primera) y mediante la tercera un 12,5 % (mitad del caudal de salmuera de la segunda etapa). En total sería un 87,5 %. Recuperaciones superiores son difíciles y no justificarían una cuarta etapa; sería preferible recuperar algo más del límite del 50 % en cada una de las tres etapas.

En cualquier caso este límite del 50 % no es absoluto, sino sólo una referencia prudente que dan los fabricantes de membrana y que se utilizan en el diseño.

El diseñar una instalación con dos o tres etapas no depende sólo de los gustos del proyectista y de la necesidad de recuperar un gran porcentaje del agua tratada, sino sobre todo de la composición química del agua.

A medida que se recupera un porcentaje mayor la salmuera va incrementando su concentración, y son las solubilidades de los iones presentes los que determinarán la capacidad de recuperación de la instalación y por tanto el número de etapas.

3.9.5. Etapas de producto

Este tipo de instalación se emplea cuando se quiere mejorar la calidad del agua producto y para ello se pasa de nuevo por otro conjunto de membranas, utilizando para ello una bomba independiente.

Su utilización es cada vez menor, inicialmente se empleaba en las instalaciones de agua de mar en las que era imposible conseguir un agua de suficiente calidad con un sólo paso, especialmente en zonas de alta salinidad como en los países del Golfo Pérsico.

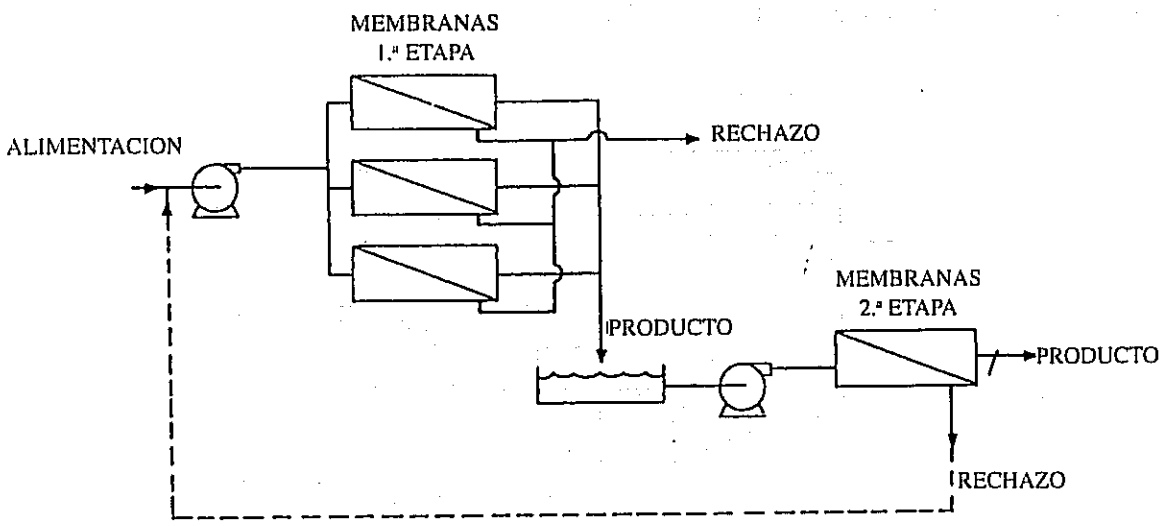


Figura 3.14. Instalación de etapas de producto.

La posterior aparición de membranas de agua de mar con rechazos superiores al 99,3 %, que permiten obtener agua potable en un solo paso, ha hecho innecesario este tipo de instalaciones.

Hoy día se siguen utilizando sin embargo en la industria, cuando se precisan aguas de calidad superior, o en otras instalaciones, para prolongar la vida de las membranas de primera etapa. En este último caso sólo una parte del caudal producto de la primera etapa se pasa por esta segunda etapa, mezclándose el conjunto de ambas etapas para obtener un permeado intermedio entre ambas.

Por lo dicho anteriormente, las etapas de producto coinciden también con lo que hemos llamado instalaciones de varios pasos.

CAPITULO 4

MEMBRANAS DE OSMOSIS INVERSA

4.1. Historia de la desalación por membranas

Las investigaciones sobre las membranas de desalación se remontan a principios de este siglo cuando aparecen diversos trabajos de investigación en que se realizan pruebas de separación de sales mediante membranas.

En 1936 Ferry hace una importante recopilación de tales trabajos, en la que aparecen materiales muy diversos como ferrocianuro de cobre, mallas metálicas, membranas de cobre porosas, membranas naturales, celofán, colodión (nitrato de celulosa) y acetato de celulosa. Sin embargo en todas estas membranas, aunque el transporte de agua era aceptable, el rechazo de sales resultaba muy pequeño.

Las primeras experiencias de que las membranas que rechazan sales podían ser empleadas en desalación fueron realizadas por Reid y Breton en 1953 en la Universidad de Florida. Utilizaron en sus investigaciones membranas planas de diferentes materiales y comprobaron que las de acetato de celulosa, con rechazos superiores al 98 %, eran las más prometedoras. Los flujos, sin embargo, eran pequeños.

También en los años 60 Loeb y Sourirajan, en la Universidad de Los Angeles, realizaron trabajos similares, llegando a desarrollar membranas de acetato de celulosa de mayor flujo, a partir de soluciones que contenían sales de perclorato. Este trabajo fue repetido y confirmado en varios laboratorios, especialmente por un grupo en General Dynamics y otro en Aerojet General.

Estas membranas producían caudales de 7-10 $l/m^2/h$, pero tras sucesivas mezclas de acetato y triacetato de celulosa se consiguieron membranas con importantes rechazos, y caudales de 17-22 $l/m^2/h$, que permitían su utilización comercial con rendimientos económicos aceptables.

Sin embargo, desde el punto de vista químico las membranas tenían ciertas limitaciones, siendo la principal su facilidad para hidrolizarse, lo que obligaba a trabajar en unos márgenes muy estrechos de pH.

En la década de los 70 se cambia el material base, de celulosa a poliamida aromática, y se consigue una mejora sustancial de la membrana, aumentando el rechazo de sales hasta el 99 %. Estas nuevas membranas que soportaban amplias variaciones en el pH (4-11), se produjeron inicialmente en forma de fibra hueca, con caudales de 6-7 $l/m^2/h$, pero no eran resistentes al cloro.

La mayor superficie de la fibra frente a la membrana plana que se había utilizado anteriormente, permitía unas producciones importantes en relación al espacio ocupado, y su comercialización fue muy rápida.

Por aquellos años se empezaron también a fabricar membranas de fibra hueca con materiales celulósicos, sin embargo las prestaciones de este tipo de membranas no respondieron a lo esperado, y fueron abandonándose, hasta años recientes en que se han conseguido progresos importantes por al menos un fabricante.

En 1970 aparece la primera membrana de poliamida aromática para agua salobre, en fibra hueca, desarrollada a partir de membranas que se estaban utilizando para la separación de gases, y en el año 1972 se desarrolla la primera membrana de agua de mar de fibra hueca con este material.

La poliamida aromática fue utilizada poco después para la producción de membranas de lámina plana, con caudales de hasta 34 $l/m^2/h$. A partir de este momento puede decirse que se produce el inicio real de la expansión de la tecnología de membranas a gran escala.

La búsqueda de nuevos materiales que mejoraran las prestaciones de los anteriores y especialmente la resistencia al cloro, ha continuado en años sucesivos. Los progresos técnicos conseguidos han sido importantes en cuanto a caudal y rechazo, no tanto respecto al cloro. Más recientemente la utilización de piperazinamidas permitió el desarrollo de otro tipo de membranas conocidas como de nanofiltración.

Por tanto el producto que hoy tenemos en el mercado y que se ha extendido de forma notable a numerosos sectores y países es el resultado de más de 25 años de investigaciones.

Los avances más notables se han producido sin embargo en los últimos cinco años, de forma que el gran futuro que se adivina a la desalación por membranas es consecuencia de los avances más recientes, que han permitido obtener membranas de mayor caudal y más alto rechazo de sales, funcionando a presiones inferiores a las de antes; en definitiva membranas de costes de operación inferiores.

4.1.1. Estructura de la membrana

La estructura que constituye la base de fabricación de las membranas es compleja y a lo largo de los años ha ido sufriendo modificaciones, pero sin embargo responde a dos tipos bastante diferenciados, que se han mantenido desde el principio.

Estos tipos corresponden a lo que ha quedado definido anteriormente como membranas espirales y membranas de fibra hueca, pero que en realidad se trata de dos estructuras que podríamos definir como estructura fibrilar y estructura laminar, siendo esta última la que ha alcanzado más aceptación, quizás por su facilidad de construcción, en la industria de fabricación de membranas.

El proceso general de fabricación de ambos tipos de membranas tiene lugar a partir de una solución viscosa, de polímeros de cadena larga, pero la forma en que se realiza uno y otro son bien diferentes.

Membranas laminares

En las membranas de tipo laminar, dicha solución se extiende sobre un material soporte, mediante un dispositivo que debe ser plano y lo suficientemente uniforme para que permita formar una película delgada.

A continuación se deja evaporar el disolvente, con lo que el polímero empieza a sobresalir de la solución, formando una matriz delgada y semisólida.

Finalmente la membrana se sumerge en otro disolvente, que puede ser el agua, que precipita rápidamente todo el polímero restante. Este enfriamiento brusco por inmersión es el que da lugar a los poros de la membrana.

El tamaño de los poros viene determinado por la rapidez del secado parcial y la elección de los disolventes. Aunque los poros no son nunca completamente uniformes, su diámetro promedio puede controlarse bastante bien.

Las membranas así fabricadas son muy delgadas, de 5 a 30 micras. Como tienen que soportar cierta presión, se les proporciona un soporte mecánico, mediante un sustrato con poros microscópicos.

Las características del soporte mecánico, el material empleado en el mismo y el proceso o forma de fabricación han sido el origen de la evolución de los distintos tipos de membranas que se han fabricado a lo largo de los años.

Las primeras membranas que se fabricaron fueron de acetato de celulosa y tanto la película separadora como el soporte se producían en un solo paso mediante el proceso citado. Ello entrañaba dificultades para conseguir que ambas partes de la membrana reunieran las condiciones más apropiadas en cuanto al rechazo de sales y el flujo. Por eso constituyó un avance importante el descubrimiento de la membrana asimétrica, que realmente no era sino un procedimiento de fabricación distinto.

En esencia, la membrana asimétrica consiste en una densa capa permoselectiva soportada por una estructura porosa, en la que la primera no representa sino un 1% del espesor total de la membrana.

Sin embargo la estructura de la membrana se completa también en una etapa, pero en dos procesos diferentes; una evaporación inicial del solvente para precipitar las esferas del polímero, seguida por una congelación rápida de esta estructura.

El calor exotérmico que se produce al mezclar el agua con el polímero es en apariencia muy importante para fijar la estructura de la membrana, en cuanto a sus condiciones máximas de porosidad y mínimas de acortamiento.

La capa superficial y la capa soporte, más gruesa, seguían siendo del mismo polímero y composición química. La capa superficial efectúa el rechazo de sales y el resto del espesor de la película proporciona la resistencia física. En definitiva, se trata de unas membranas baratas de fabricar y que mejoraban las prestaciones de las primeras membranas más simples, pero en las que era difícil de conseguir una alta calidad y uniformidad.

La película moldeada tiene numerosos poros que deben ser cerrados mediante procesos térmicos *(annealing)*, que a su vez hacen más gruesa la capa superficial y reducen el flujo de agua.

Además estas membranas tienden a compactarse a consecuencia de la alta presión aplicada.

Pero el avance definitivo conseguido en el campo de la fabricación de membranas planas lo constituyó la membrana compuesta de capa delgada (TFC, *thin film composite)*.

La idea consistía en fabricar la membrana en base a dos componentes distintos, uno actuando como barrera, y el otro como soporte grueso capaz de resistir las presiones de funcionamiento necesarias. De esta forma pueden optimizarse en sus características ambos componentes, de forma independiente.

La capa soporte está compuesta de una resina polisulfonada y tiene una porosidad gradual de arriba hacia abajo. Esta resina es notable por su resistencia a la compactación. La capa superficial es una poliamida aromática o alifática, elegida por su alto caudal, excelente rechazo de sales y sílice y resistencia química. Esta capa se forma «in situ» por síntesis interfacial, proporcionando una barrera libre de huecos.

El ensamblaje se realiza depositando en primer lugar la polisulfona sobre una película de poliéster y posteriormente se deposita la capa selectiva de poliamida.

Aunque los primeros intentos se iniciaron hacia 1967 y condujeron al descubrimiento de la polisulfona, que posteriormente ha constituído la base de las membranas de ultrafiltración, la culminación del proceso, con el desarrollo de la película separadora y su ulterior ensamblaje, no se consiguió hasta 1977.

Este es el tipo de estructura que se mantiene invariable hasta la actualidad en los procesos de fabricación. Los avances sucesivos se han producido más en la utilización de nuevos polímeros o nuevas películas que se depositan sobre las anteriores y en los procedimientos o métodos más o menos sofisticados y precisos para realizar su aplicación, que en la búsqueda de nuevas estructuras.

Membranas fibrilares

La citada técnica no es posible sin embargo utilizarla para la fabricación del otro tipo de membranas, que por tanto continúan siendo del tipo asimétrico.

Los filamentos que constituyen la membrana se hilan a partir de una solución de poliamida aromática y sales inorgánicas. El hilo se extruye a través de una máquina de hilar que va sellada, pero que admite la inyección de nitrógeno por el centro del filamento para poder mantener la integridad del orificio central de éste durante el proceso de formación de la estructura final, que se produce en sucesivas etapas de secado y extracción.

Durante esta última, la fracción más importante del solvente se elimina del exterior de la fibra con gas nitrógeno calentado. La relación entre los tiempos en que se realiza la evaporación superficial y la migración del solvente hacia la parte exterior de la fibra tiene una gran influencia sobre las propiedades de la película externa que recubre la membrana de fibra hueca. El solvente y las sales que quedan se extraen mediante agua y el cuerpo poroso que soporta la película separadora se forma durante este tiempo en que el agua va desplazando al solvente.

Para conservar sus propiedades asimétricas es preciso mantener la fibra húmeda. Finalmente el proceso térmico de *annealing* incrementa la resistencia de la fibra hueca a la deformación y mejora sus propiedades de rechazo.

4.1.2. Materiales constituyentes

La base de una membrana de desalación está constituída por la capa más o menos delgada que realiza la separación de sales.

Sólo las membranas de tipo asimétrico o compuestas de capa delgada, merecen hoy día la atención de los fabricantes, y en su constitución entran fundamentalmente el acetato de celulosa en las primeras y diversas poliamidas en las otras.

Las primeras membranas comerciales eran de acetato de celulosa, y todavía estas membranas son fabricadas por numerosos fabricantes, aunque han sido mejoradas mediante distintas mezclas de polímeros de acetato y triacetato de celulosa.

Se trata de membranas sensibles al pH, de caudal moderado y susceptibles al ataque biológico, pero que permiten la cloración. La superficie de la membrana es muy lisa, por lo que resulta poco sensible al ensuciamiento, y en consecuencia su campo de aplicación está sobre todo en aguas contaminadas o residuales.

El triacetato de celulosa que produce un caudal más reducido pero que es más resistente que el anterior, se emplea en membranas fibrilares o de fibra hueca, compensando el menor caudal unitario con la mayor superficie que presentan las fibras.

Las membranas de poliamida alifática y aromática representan, especialmente estas últimas, una nueva generación, con numerosas ventajas sobre las de acetato.

La composición química de la capa separadora constituye el *know how* de cada fabricante, dado que en ella reside el alto rechazo de sales que caracteriza al producto. Sin embargo las diferencias entre unos y otros cada vez se van acortando más.

Tienen caudales y rechazos muy superiores, y operan a presiones más bajas por lo que han reemplazado casi totalmente, con las excepciones expresadas anteriormente, a las membranas de acetato de celulosa.

Son muy sensibles al cloro, siendo éste el punto débil de casi todas las membranas de desalación que se fabrican en la actualidad. El material soporte de estas membranas es una polisulfona porosa o polipropileno. Hay dos tipos de poliamidas aromáticas que son el origen de las actuales membranas. Partiendo de una formulación común, una tiene grupos carboxílicos y la otra sulfónicos; la primera es la base de las membranas en espiral y la otra la de las membranas de fibra hueca.

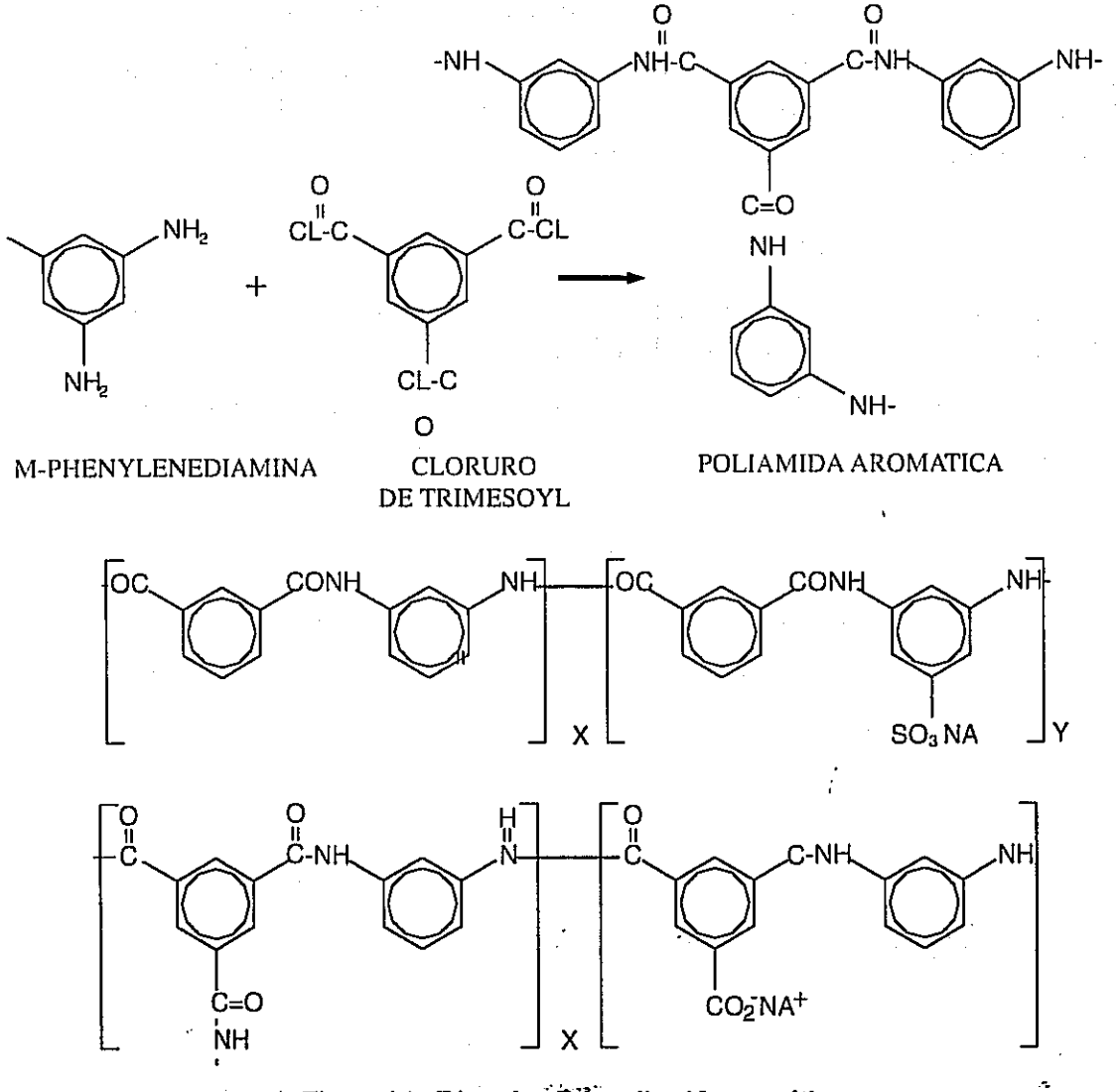


Figura 4.1. Fórmulas de la poliamida aromática.

4.1.3. Características de las membranas

- ***Rechazo de sales***

Las membranas de ósmosis inversa se emplean fundamentalmente para la separación de iones de las soluciones acuosas, por tanto la característica más importante de la membrana es su capacidad para rechazar iones.

Esta capacidad de separación no es igual en todas las membranas, siendo precisamente ésta la principal característica diferenciadora entre unas y otras.

Así por ejemplo, para poder destinar una membrana a la desalación de agua de mar en una sola etapa se exige que la membrana tenga un rechazo de sales superior al 99,2 %, mientras que para aguas salobres puede ser suficiente con rechazos entre el 85 y el 95 %.

Pero además, para una misma membrana el rechazo depende del tipo de iones, y de otras variables, como el tamaño de la molécula, el radio iónico, la carga eléctrica o la interacción entre los diferentes iones y el solvente. En general las membranas retienen mejor los iones polivalentes que los monovalentes. Asimismo el rechazo de iones bivalentes es siempre superior al rechazo total de iones de la membrana; y el rechazo de iones monovalentes inferior al mismo.

Como regla puede decirse que la membrana actúa como un filtro para las moléculas que tienen un peso molecular superior a 200 y que en estos casos la teoría de la difusión no es aplicable.

La siguiente tabla recoge el rechazo medio en tanto por ciento de una serie de membranas, en las que puede verse que no sólo es el rechazo de sales total sino el de iones específicos el que puede diferenciar a una membrana.

CUADRO 12

Rechazo de iones según el tipo de membranas

Iones	*Agua salobre PA*	*Agua salobre CA*	*Agua de mar*	*Nanofiltración*
TDS	90-99	85-92	99,2-99,6	65-80
Na^+	92-98	90-95	99,2-99,6	40-60
K^+	92-96	85-95	99,3-99,6	60-75
Ca^{++}	93-98	92-95	99,4-99,8	85-92
Mg^{++}	93-98	94-97	99,3-99,8	75-85
Cl^-	92-95	90-95	99,2-99,5	50-70
$SO_4^=$	96-98	96-98	99,4-99,7	80-94
CO_3H^-	93-97	85-95	99,3-99,6	75-90
PO_4^{3-}	95-98	95-97	99,4-99,7	85-95
NO_3^-	90-95	50-70	99,3-99,5	85-90
SiO_2	80-90	80-90	99-99,2	85-92
Bo^{++}	50-70	85	99-99,3	60-75
F-	92-95	85-90	99-99,2	60-70

Estas diferencias no son sin embargo absolutas, pues los últimos desarrollos en el campo de las membranas planas han permitido la obtención de rechazos muy elevados (superiores al 99 %), en membranas de agua salobre que además operan a presiones muy bajas.

Rechazo de bacterias

El tamaño de los poros de la membrana es suficientemente pequeño para que su poder de separación de las bacterias, virus y pirógenos sea prácticamente total. Además, estos microorganismos se aglutinan unos con otros, formando una masa más grande que es rechazada completamente por las membranas.

Por ello la utilización de membranas como método de desinfección es bastante eficaz y se presenta como el método más seguro para realizar una esterilización efectiva, pero deben controlarse los rechazos que son altamente contaminantes.

Por tanto cuando en el agua producto se detectan bacterias es signo evidente de alguna anomalía en la membrana que puede proceder, desde roturas en la propia membrana hasta fugas a través de los interconectores, juntas u otros accesorios.

Pero los virus, bacterias y otros microorganismos que llegan a las membranas, se depositan sobre ellas y pueden proliferar, puesto que la propia membrana constituye un medio idóneo para su crecimiento.

La masa bacteriana representa una nueva barrera que afecta al rechazo de sales y al caudal que pasa a través de la membrana. La desinfección de éstas se hace en dichos casos indispensable. Para evitar llegar a esta situación es preferible aplicar un tratamiento de desinfección al agua que se va a tratar.

Compuestos orgánicos

Las sustancias orgánicas también son retenidas en grado diferente. Las moléculas orgánicas con mayor peso molecular son retenidas mejor que las de peso molecular pequeño, pero además el grado de retención también está influenciado por el tamaño de la molécula y la estructura dimensional, según ésta sea o no iónica.

En general los compuestos orgánicos solubles de bajo peso molecular, como los ácidos orgánicos y las aminas, pasan a través de las membranas en mayor proporción que los iones.

Muchos de los compuestos de mayor interés como los fenoles, hidrocarburos clorados de bajo peso molecular, otros derivados halogenados, como los pesticidas e incluso alcoholes de bajo peso molecular tienen coeficientes de rechazo muy bajos, por lo que aparecen en el permeado casi en la misma concentración que en el agua que se trata.

Sin embargo otras sustancias complejas, como las que originan el color de las aguas, son eliminadas en su totalidad. Las ligninas y los ácidos húmicos y fúlvicos

también. Algunos compuestos orgánicos pueden atacar y degradar las membranas. Por ejemplo, determinados polímeros aparentemente no tienen efecto alguno en bajas concentraciones como los usados en los pretratamientos químicos, pero deben vigilarse puesto que pequeños aumentos en su concentración resultan dañinos.

El rechazo de compuestos orgánicos solubles depende además del material constituyente de la membrana siendo más eficientes las membranas de poliamida que las de acetato de celulosa, como puede verse en el siguiente cuadro.

CUADRO 13

Rechazos medios de compuestos orgánicos por las membranas

Solución orgánica	*Poliamida*	*Acetato celulosa*
	Rechazo en %	
Metanol	41	6
Etanol	86	12
Propanol	94	25
Fenol	87	2
Clorofenol	83	21
Formaldehido	70	20
Acetaldehido	80	59
Acetona	96	22
Ciclohexano	98	37
Acido acético	70	24
Acido láctico	89	13
Acido benzoico	82	18
Etilamina	92	11
Anilina	96	5
Urea	80	9

Resistencia al cloro

El cloro es un fuerte oxidante utilizado por sus efectos desinfectantes en los tratamientos de agua, tanto en forma de hipoclorito (sódico o potásico) como en forma de gas. La tolerancia de las membranas de desalación al cloro libre disuelto en el agua a tratar, es muy distinta según el tipo de membranas.

Las membranas de acetato de celulosa admiten dosis de cloro moderadas durante periodos largos de tiempo, pero a medida que aumenta la dosis la resistencia de la membrana es menor.

Por esta razón, y creemos que de una forma equivocada, existe muchas veces la idea de que estas membranas son totalmente resistentes al cloro.

Las especificaciones de los fabricantes indican que las membranas de acetato de celulosa CA soportan dosis de cloro en continuo de hasta 1 ppm. Durante breves períodos pueden soportar dosis incluso superiores. Esto les da la posibilidad de ser sometidas a desinfección en el caso de aguas contaminadas.

Las membranas de triacetato de celulosa CTA, o mezclas de acetato y triacetato, son algo más resistentes, pero siempre dentro de límites moderados. Por el contrario las membranas de poliamida no son con carácter general resistentes al cloro, aunque también dentro de ellas existen gradaciones.

En cuanto a las membranas de arrollamiento en espiral, las de poliamida alifática, TFC, son destruidas por el cloro de forma casi instantánea, mientras que las de poliamida aromática, TFCl, sólo soportan dosis muy pequeñas de 0,1 ppm y durante breves períodos.

A pesar de ello, algunos fabricantes establecen en sus especificaciones que las membranas de poliamida, TFCl, soportan dosis de cloro de 1.000 ppm-h; es decir, 1.000 ppm durante una hora o 1 ppm durante 1.000 horas.

Dentro de los distintos fabricantes de membranas de poliamida aromática, pueden existir también algunas pequeñas diferencias en cuanto a su resistencia al cloro, que suele ser función del espesor de la capa de rechazo de sales de cada membrana.

Las membranas de fibra hueca de poliamida, aunque deben tener la misma resistencia al cloro libre que las espirales, y de hecho los fabricantes de las mismas no especifican resistencias superiores, en la práctica se ha comprobado que son algo más resistentes, debido a dos circunstancias:

— El espesor de la pared separadora respecto al diámetro de la fibra es mayor.

— Son membranas dinámicas, en que su poder de separación se mantiene a través de una aplicación periódica de una capa de recubrimiento, que es atacada por el cloro, mientras que la estructura de la membrana queda protegida en parte.

Pese a ello se recomiendan las mismas precauciones en su uso que en las otras. Esta distinta resistencia es la que ha permitido que las membranas de acetato de celulosa se sigan todavía fabricando, a pesar de ser menos eficientes en cuanto a su caudal, rechazo de sales o presión de funcionamiento.

Cuando se trata de desalar aguas residuales, o aguas superficiales contaminadas, las membranas de celulosa ofrecen una garantía de resistencia a la cloración que no ofrecen las otras, y además su superficie es mucho más lisa, por lo que también se ensucian menos.

Su campo de aplicación se centra fundamentalmente en las aguas salobres de estas características, con excepción de una membrana de triacetato de celulosa en configuración de fibra hueca, que se utiliza para agua de mar.

Las membranas de poliamida han experimentado un desarrollo espectacular en los últimos años, que las han hecho imprescindibles tanto en desalación de aguas salobres o de mar, como en algunas aplicaciones especiales como las nuevas membranas de ablandamiento de aguas (nanofiltración).

Cuando se emplean con aguas contaminadas resulta imprescindible la cloración de éstas, para evitar el desarrollo biológico sobre la propia membrana que constituye un alimento excelente para bacterias y microorganismos.

En estos casos debe garantizarse su decloración mediante algún reductor, para evitar el deterioro irreversible de la membrana.

Condiciones hidráulicas

Los permeadores o membranas funcionan en condiciones óptimas cuando las velocidades de circulación del agua cumplen unas determinadas condiciones.

Para conseguir un arrastre adecuado de las sales que se van depositando sobre las membranas, es conveniente que el flujo de salmuera sea constante y uniforme, y que el caudal de alimentación se mantenga también dentro de unos valores, lo que implica fijar unos flujos mínimos de ésta. En función del tamaño, cada permeato tendrá por tanto un caudal óptimo de funcionamiento.

Las tres condiciones que normalmente se establecen para las membranas de arrollamiento en espiral, con objeto de obtener una buena circulación hidráulica a través de la membranas, son:

— Mantener un caudal de barrido de la salmuera mayor de 10 lpm en membranas de 4" y mayor de 40 lpm en membranas de 8".

— Mantener una relación entre el caudal de salmuera y producto superior a 5.

— Mantener un caudal de alimentación a las membranas que debe ser menor de 50 lpm para membranas de 4" y menor de 200 lpm para membranas de 8".

Pero a su vez el flujo a través de la membrana viene regido por una combinación de cuatro factores:

— Presión osmótica.

— Permeabilidad de la membrana.

— Espesor de la membrana.

— La difusión o diferencia de concentraciones.

El flujo a través de una membrana se mide en función del volumen que la atraviesa (transmitido) por unidad de área de membrana en un período determinado y bajo una presión también determinada.

Como unidad en la literatura anglosajona se emplea el GFD, *galon/foot.day*, (galón por pie cuadrado y día).

En el sistema decimal la unidad correspondiente es el litro por metro cuadrado y hora. La equivalencia entre ambas unidades es:

$$1 \text{ GFD} = 40{,}74 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{día} = 1{,}6975 \text{ l/m}^2/\text{h}$$

Esta magnitud es importante a la hora de hacer el diseño de una instalación pues influye en el número de membranas a colocar.

Un agua de buena calidad permite proyectar la instalación con valores de GFD elevados, ya que los únicos efectos sobre la membrana son prácticamente:

— la compactación que se va produciendo como consecuencia de la presión aplicada, y

— la precipitación de sales.

A medida que el agua empeora de calidad, tanto en cuanto a los sólidos en suspensión como a los contaminantes, es preciso reducir el índice GFD, lo que supone aumentar el número de membranas, puesto que en el proceso de desalación una parte de esos elementos extraños que lleva el agua y que no pueden ser retenidos completamente por los distintos pretratamientos, se van depositando sobre las membranas, obstruyéndolas o ensuciándolas y disminuyendo por tanto su capacidad productiva.

El caudal específico por membrana varía en cada proyecto en función de los condicionantes del mismo y las precauciones que tome el diseñador. Los distintos fabricantes de membranas de arrollamiento en espiral establecen unos valores aconsejables, muy parecidos entre unos y otros que se recogen en otro capítulo de este libro.

La determinación del coeficiente GFD exige conocer la superficie de cada membrana. En el caso de las membranas de fibra hueca, sólo existen dos fabricantes y las membranas son de tamaños especiales por lo que no son sustituibles, aunque recientemente se está intentanto unificarlas, modificado el tamaño de las mismas.

En las membranas de arrollamiento en espiral, como la superficie de membrana es muy importante en relación con la producción de la misma, una de las vías que los fabricantes han utilizado para mejorar el caudal de la membrana y en definitiva reducir los costes, es el aumento de la superficie de lámina separadora en el interior de cada unidad.

En unos casos ese aumento de superficie se consigue mediante sistemas mecánicos de enrollado, que permiten realizar de una manera completamente homogénea un mayor apriete, haciéndola más compacta. En otros casos se han probado mallas separadoras mas delgadas.

Por último, algunos fabricantes han optado por la construcción de membranas del mismo diámetro pero más anchas, con lo que se reduce el espacio que ocupan los interconectores y en definitiva se incrementa la superficie de membrana por tubo de presión.

En el cuadro siguiente se recogen las superficies de una serie de membranas de amplio uso en la actualidad y que pueden servir de referencia para el cálculo o dimensionado de instalaciones.

CUADRO 14

Superficie eficaz de diferentes membranas

Membrana	*4"*		*8"*	
	Superficie m^2	*Caudal* m^3/*día*	*Superficie* m^2	*Caudal* m^3/*día*
Tipo				
Agua salobre	6,7-7	7,2	30,6-34	30,3-34
Agua salobre magnum			48-54	48-54
Agua de mar	6-6,5	4,2	27,8-29	19
Agua de mar magnum			44-46,4	30-33
Baja presión	7-7,5	4,5	30,6-37	18,2
Nanofiltración	7,5-8	6,1-8	34-37	26-40
Acetato	7,5	7,6	31,6	30,3
Acetato magnum	11,6	12,3	49	49,2

Carga electroforética

La superficie de todas las membranas tiene una carga eléctrica o electroforética que es consecuencia de los elementos químicos que intervienen en su fabricación. Estas cargas retienen la materia orgánica y los coloides del agua, así como los radicales de los productos químicos del pretratamiento.

Las membranas de acetato de celulosa tienen menor carga superficial, pero también menor retención. La membrana ideal debería tener la carga de las de acetato de celulosa y la robustez y cualidades de las de TFC. La membrana TFCL es relativamente resistente al cloro, pero tiene carga electroforética negativa elevada.

El conocimiento de la carga eléctrica superficial de las membranas es importante a efectos de su utilización en aguas que pueden presentar problemas.

También es muy necesario su conocimiento para poder elegir tanto el pretratamiento químico más adecuado como los productos de limpieza convenientes, para que no se produzcan atracciones entre unos y otros que deterioren las cualidades de permeabilidad de la membrana.

Concentración de polarización

Las membranas de ósmosis tienen un rechazo de sales limitado por lo que la concentración de éstas en el producto depende de la concentración que posee el agua de alimentación a la entrada de la interfase. Las sales disueltas en el agua de alimentación son transportadas convectivamente hacia la membrana.

Como su difusión a través de la misma no se realiza en la misma proporción, se produce una acumulación de sales en la superficie de la membrana. Su eliminación por tanto sólo puede realizarse por difusión mediante un proceso de transferencia de masa, así como por una variedad de movimientos hidrodinámicos, incluido el movimiento de difusión de Eddy cuando el fluido es turbulento (Bénard).

Según la teoría de Bénard, la inestabilidad que se produce en una capa de fluido que es más pesada en la parte superior que en el fondo, que es la situación que se produce en el proceso de separación de sales, está ocasionada por un gradiente de temperatura en el fluido.

En consecuencia, junto a la membrana se desarrolla una capa límite de disolución no agitada, estancada, de la que se extrae constantemente agua y en la que las sales rechazadas se van acumulando en concentraciones excepcionalmente altas. Este efecto se conoce como polarización de la concentración.

Se trata de un fenómeno complejo que depende por tanto de diversas causas y que ha sido estudiado con bastante profundidad por Merten y Sherwood que han propuesto distintas teorías al respecto.

Las primeras investigaciones sobre polarización fueron desarrolladas por Merten *et al.* y suponían la existencia de una capa límite adyacente a la membrana en la cual el flujo de fluido es despreciable.

Sherwood y colaboradores desarrollaron posteriormente un estudio más sofisticado en un canal en el que el flujo puede ser laminar o turbulento, y en el que sus paredes rechazaban completamente las sales pero eran permeables al agua, comprobando que la polarización de la concentración era distinta según cual fuera el régimen de funcionamiento hidráulico.

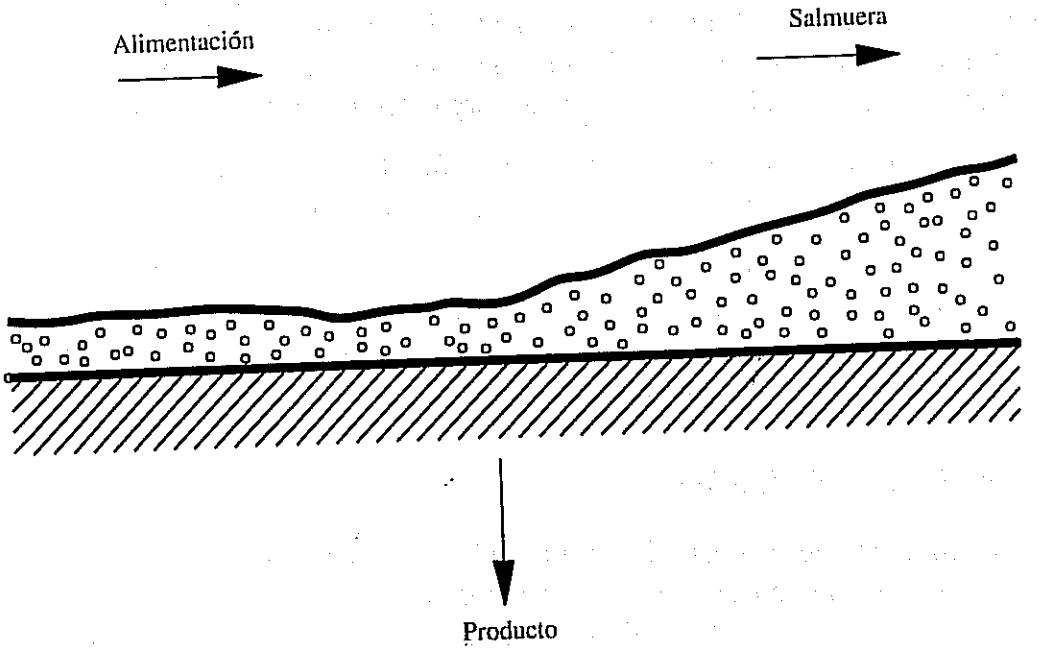


Figura 4.2. Concentración de la polarización.

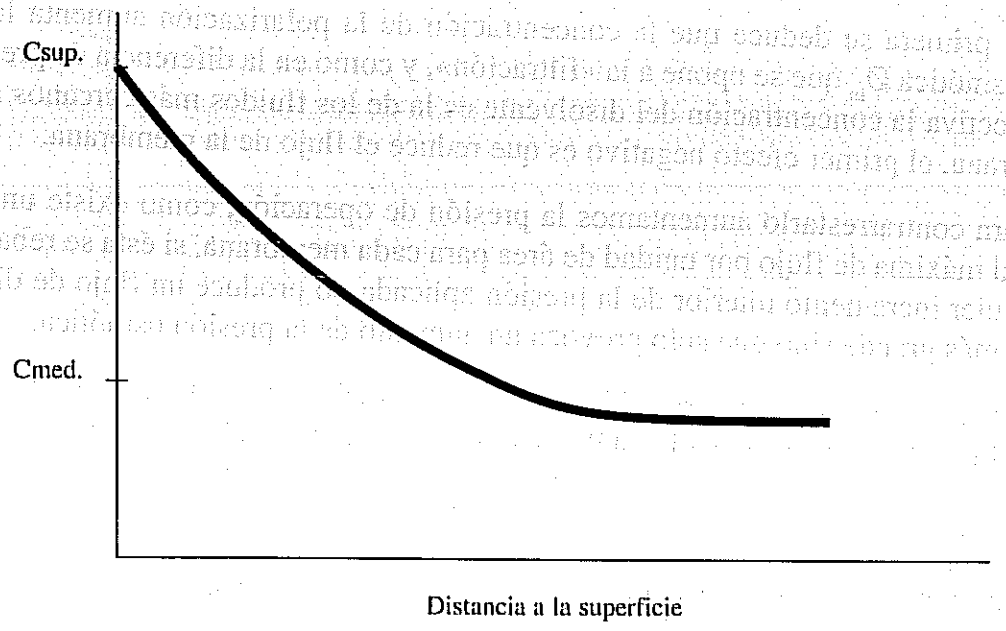


Figura 4.3. Gradiente de la concentración de sales.

La concentración de la polarización está influenciada por:

— La competencia entre el movimiento de convección de las sales hacia la membrana y su difusión fuera de la misma.

— El rechazo de sales.

— La presencia o ausencia de flujo transversal en la superficie de la membrana.

— Las interacciones entre los distintos componentes del agua de alimentación.

Como es lógico este fenómeno tiene una serie de efectos negativos:

— El aumento de sales en la interfase también aumenta la presión osmótica en la misma, y por tanto disminuye la presión efectiva que impulsa el agua a través de la membrana.

— Dado que las membranas siempre dejan pasar algunas de las sales presentes en el agua de alimentación, la concentración de sales en el agua producto aumenta.

— Pueden producirse precipitaciones de los componentes disueltos.

Estos efectos se deducen claramente del análisis de las dos ecuaciones básicas de la ósmosis que han sido enunciadas anteriormente:

$$F_a = A\ (P_m - \Delta Ø_m)$$

$$F_s = K_s \cdot (C_a - C_p)$$

De la primera se deduce que la concentración de la polarización aumenta la presión osmótica $Ø_m$ que se opone a la «filtración», y como en la diferencia de presiones efectiva la concentración del disolvente es la de los fluidos más cercanos a la membrana, el primer efecto negativo es que reduce el flujo de la membrana.

Si para contrarrestarlo aumentamos la presión de operación, como existe una velocidad máxima de flujo por unidad de área para cada membrana, si ésta se rebasa, cualquier incremento ulterior de la presión aplicada no produce un flujo de disolvente más grande sino que sólo provoca un aumento de la presión osmótica.

Por tanto, el grado de polarización de la concentración aumenta también proporcionalmente al flujo del disolvente, y además es proporcional a la presión aplicada. De la segunda se ve que también aumenta C_n y por tanto, al ser mayor $C_n - C_p$, aumenta al mismo tiempo el paso de sales.

Por último, en muchas membranas el rechazo de sales disminuye al aumentar la concentración de la solución de alimentación.

Además, una concentración de polarización excesiva produce una supersaturación de determinadas sales y su precipitación, que pueden producir el deterioro irreversible de las membranas. Es decir, que el fenómeno influye fundamentalmente en el flujo y en el rechazo de sales.

La polarización de la concentración no puede eliminarse por completo en los procesos de ósmosis inversa, pero al menos puede reducirse:

a) Haciendo la solución turbulenta para mantener dicha capa límite lo más delgada posible.

b) Estableciendo mecánicamente en la membrana canales de flujo para reducir los efectos de entrada.

c) Además se puede también actuar en la operación de la instalación, para lo cual es necesario ajustar el flujo y limitar el recobro.

El espesor de esta capa depende de la agitación o de la velocidad del agua de alimentación y del grado de permeación. El grado de polarización de la concentración aumenta proporcionalmente al flujo del disolvente y también es proporcional a la presión aplicada.

En consecuencia, existe una velocidad máxima de flujo por unidad de área para cada membrana, mas allá de la cual un incremento de la presión no produce un aumento en el flujo del disolvente sino que sólo provoca un aumento de la presión osmótica.

Aunque el fenómeno de formación de la capa límite es independiente del transporte de la membrana «per se», sus efectos son significativos, especialmente en las membranas que tienen un alto flujo por unidad de superficie. Esto limita la conversión de las membranas espirales.

Comoquiera que existen distintas opiniones sobre la mayor sensibilidad de las membranas de fibra hueca a la polarización, como consecuencia de la pequeña distancia entre las fibras que aumenta el efecto de difusión y al relativamente bajo flujo de estas membranas, hay que destacar también que, según un análisis detallado presentado por algunos autores, la acumulación de sales microscópicas en la superficie de la citada membrana, no tiene efectos significativos sobre la misma.

Esto quiere decir que, en un punto determinado del haz de fibras, no debe haber una diferencia apreciable entre la concentración del soluto en la superficie exterior de la fibra y la existente en la solución entre fibras adyacentes.

Sin embargo, hay que destacar que la no uniformidad del empaquetamiento del haz de fibras puede producir regiones en que la distancia interfibrilar sea muy inferior a la media de 25 micras, y pueda por tanto producirse una polarización de tipo local.

4.2. Parámetros técnicos

Una membrana de desalación viene definida por una serie de parámetros técnicos que son las herramientas que se utilizan a la hora de hacer un diseño de una instalación, con objeto de hacer una estimación o proyección de la calidad del agua que se va a obtener.

4.2.1. Rechazo

Es la característica principal de la membrana y la que permite definir su campo de actuación o funcionamiento en relación con el agua que se desea tratar.

Hay que tener en cuenta que el diseño de una instalación de membranas depende tanto de la calidad del agua que se desea tratar como de la que se quiere conseguir.

No existe una membrana perfecta que elimine el 100 % de las sales contenidas en el agua que pasa a su través, pero el desarrollo técnico ha permitido acercarse cada vez más a esta cifra. Los parámetros que caracterizan a una membrana desde este punto de vista son dos:

Paso de sales: Es el porcentaje de sales que pasan a través de la membrana. Se determina midiendo la concentración de sales del agua de alimentación y del agua producto, y aplicando la fórmula:

$$Ps = 100 \cdot Cp/Ca$$

Rechazo de sales: Es el porcentaje de sales que rechaza la membrana y se determina a partir del paso de sales mediante la fórmula:

$$Rs = 100 \cdot (Ca - Cp)/Ca = 100 \cdot (1 - Cp/Ca)$$

Es por tanto el complemento del paso de sales, de forma que si una membrana tiene un paso de sales del 4 % tendrá un rechazo del 96 % y si tiene un rechazo de sales del 99,6 % tendrá un paso de sales del 0,4 %.

4.2.2. Presión

La presión a la que funciona la membrana debe ser la necesaria para vencer la presión osmótica diferencial, entre las soluciones existentes a un lado y otro de la membrana, y dar un caudal suficiente.

Dependiendo del tipo de módulo de que se trate existe una presión máxima de operación que no puede rebasarse, produciéndose un descenso de la permeabilidad de la membrana por compactación, o incluso su rotura o destrucción.

4.2.3. Temperatura

Es aquella a la que se realiza el proceso, que lógicamente será variable en función del lugar geográfico o la época del año en que se realiza el tratamiento.

Las membranas de ósmosis inversa pueden soportar temperaturas de hasta 45 °C.

4.2.4. Conversión o recobro

Como ya se ha indicado anteriormente es la relación, expresada en porcentaje, del caudal que puede desalarse a partir de un determinado caudal de alimentación a la instalación.

Es una relación que puede variarse a voluntad pero dentro de unos límites muy concretos.

A medida que aumentamos el recobro de una instalación, aprovechamos más el agua a tratar y reducimos en consecuencia el caudal o volumen de salmuera que hay que eliminar.

La membrana, en cambio, en función de sus características, rechaza una cantidad o porcentaje fijo de sales que se concentra en la salmuera; por tanto, cuanto menor sea el caudal del rechazo más concentrado será éste. Es decir, que la conversión está limitada por la concentración de sales en la salmuera, o dicho de otro modo por el coeficiente de solubilidad de las sales presentes en la salmuera.

Sabemos que todas las sales se disuelven en el agua, pero que su poder de disolución es limitado y viene determinado por el índice o coeficiente de solubilidad de cada sal. Una vez rebasado dicho coeficiente la sal empieza a precipitar en la solución.

En el caso de las membranas de ósmosis inversa el problema viene acrecentado por el hecho de que esa precipitación se produce sobre la superficie de la membrana, con lo que se provoca una obstrucción de los poros de la misma.

El resultado es una pérdida de las características de la membrana, principalmente caudal y rechazo de sales, que pueden llegar a ser irreversibles.

Cuanto menor es la conversión menor es el riesgo de precipitación de sales, por lo que una de las formas de garantizar el funcionamiento prolongado de una instalación de desalación es reduciendo la conversión, aunque ello tiene otras implicaciones económicas en cuanto a la inversión y a los costes energéticos, que serán analizados con más profundidad en su momento.

También puede mejorarse la conversión y de hecho es lo que se hace normalmente en las instalaciones, de alguna de las siguientes formas:

a) Regulando el pH. Dado que la solubilidad de las sales varía con el pH de la solución, podremos regular el pH de ésta hasta un valor en el que el coeficiente de solubilidad de las sales con mayor tendencia a precipitar, en función de su contenido en el agua de alimentación, sea mayor.

b) Actuando sobre la temperatura. Puesto que la temperatura tiene también una incidencia en la solubilidad de una sal, subiendo o bajando ésta se mejora la eficiencia. En el caso de algunos elementos como la sílice, la influencia de la temperatura es fundamental para mejorar su solubilidad, normalmente bastante baja.

c) Añadiendo antiincrustantes que permiten mantener las sales en la salmuera en un estado de supersaturación, varias veces superior a los límites de solubilidad habituales.

4.2.5. Factor de ensuciamiento *(Fouling factor)*

Como se ha venido insistiendo con anterioridad, las condiciones físicas y/o químicas del agua a tratar producen un ensuciamiento más o menos importante en las membranas, que hacen descender sus prestaciones.

Debe esto tenerse en cuenta en el diseño y se refleja en lo que se conoce como factor de ensuciamiento *(fouling factor).*

Dicho índice es un número, menor que la unidad, que trata de expresar el deterioro que experimenta la membrana cada año tanto en su caudal como en el rechazo de sales, a consecuencia del uso.

Este parámetro o coeficiente teórico que utilizan los fabricantes, aunque bastante subjetivo, permite la obtención de un margen de seguridad en el funcionamiento de la instalación.

4.3. Variación de los parámetros

Una membrana viene definida por los valores de sus parámetros característicos, sin embargo esos valores los proporciona el fabricante en base a unas pruebas que se realizan en fábrica y que están normalizadas.

Dicha normalización no es arbitraria, sino que para poder comparar unas membranas con otras se refiere tanto a la salinidad del agua tratada, que suele ser un agua reconstruida artificialmente, como a la temperatura y presión a la que se realizan las pruebas.

Como en la práctica dichas condiciones varían para cada instalación, conviene conocer cómo esa variación influye en las características de funcionamiento de las membranas.

4.3.1. Con la temperatura

En todo sistema de OI hay unas temperaturas máxima y mínima de operación impuestas por la propia membrana. El límite inferior para todas las membranas es 0 °C. El límite superior depende de la membrana y también de la presión.

Los límites superiores los establecen los fabricantes en 35-45 °C. Estos límites se establecen para prevenir distintos problemas como rápida hidrólisis de las membranas de acetato de celulosa, fallos de adherencia en membranas espirales, grietas en la hoja del tubo y la capa epoxi en los permeatos de fibra hueca, y una compactación excesiva en todas las membranas.

Normalmente el funcionamiento óptimo se produce a una temperatura de 24 a 27 °C, aunque estas temperaturas pueden ser perjudiciales en caso de contaminación biológica, dado que favorecen el desarrollo de ésta.

Cuando la temperatura del agua de alimentación es superior o inferior a este óptimo se podría emplear algún calentador o un intercambiador de calor para su control. En la práctica generalmente no resulta especialmente rentable.

Si la temperatura del agua se mantiene constante también se mantiene la productividad.

El punto donde se mide la temperatura del proceso es aguas abajo del punto en el que se inyectan los productos químicos y lo más próximo a la entrada a las membranas, pues en su paso por las bombas de alta presión, el agua puede elevar su temperatura 1 ó 2 grados.

Al aumentar la temperatura también lo hace el caudal. Esto se debe principalmente a la menor viscosidad del agua con la temperatura y por tanto su mayor difusión a través de la membrana.

También tiene lugar un descenso en el rechazo de sales, que se debe a un efecto dilatador del agua en la membrana, a un incremento de la solubilidad de la sal en la membrana, o a ambos.

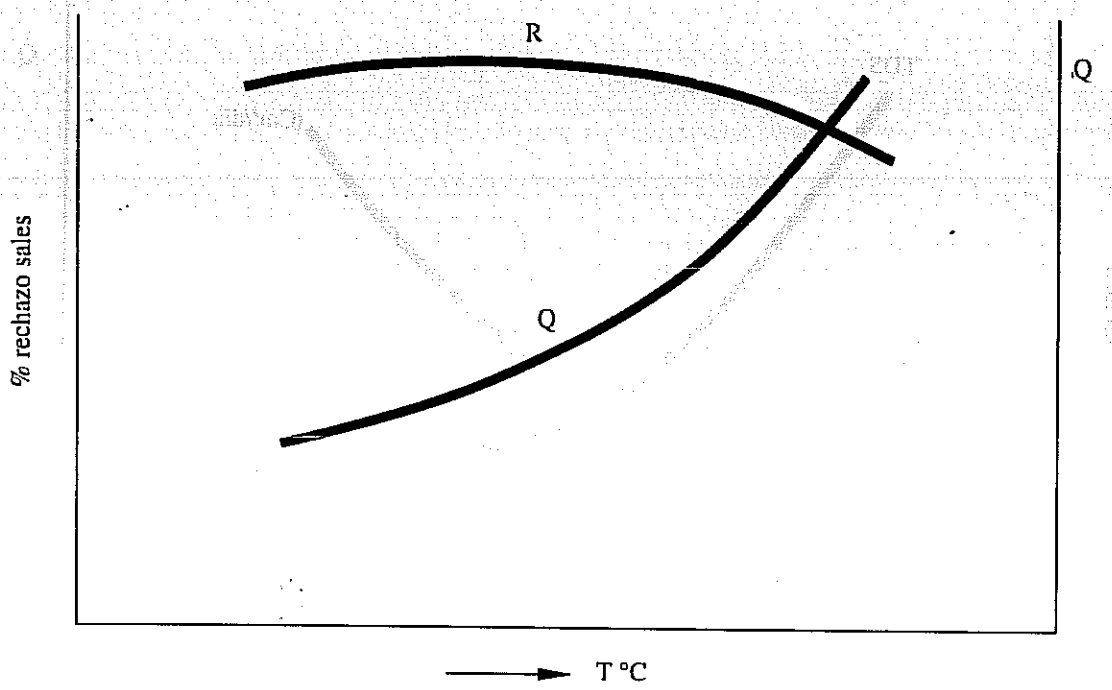


Figura 4.4. Influencia de la temperatura.

Al refrigerar el agua se puede aumentar la presión, la conversión y se mejora la calidad del agua producto.

4.3.2. Con la presión

El efecto de la presión en la productividad total de la membrana es el resultado de la suma de la productividad instantánea y de la compactación. Normalmente la productividad es siempre mayor operando a alta presión que a baja presión, pero a lo largo del tiempo el aumento de la presión de operación produce una compactación de la membrana que a su vez reduce el caudal. En ocasiones el descenso de caudal por este concepto puede alcanzar hasta el 25 %

Pero la presión también influye sobre la conductividad del agua producto, pues al aumentar el flujo a través de la membrana disminuye aquélla. El rechazo de sales, por su parte, sigue una trayectoria creciente curvilínea hasta alcanzar un tope en el que se estabiliza.

Pero además en el paso del agua por las membranas o tubos de presión se produce una caída de presión o pérdida de carga que reduce la presión neta que se aplica a cada membrana.

Mientras la presión de alimentación influye en los dos parámetros principales de la OI, productividad y conductividad del agua producto, la caída de presión afecta la estabilidad mecánica del equipo. Si ésta es elevada se producen daños en la membrana.

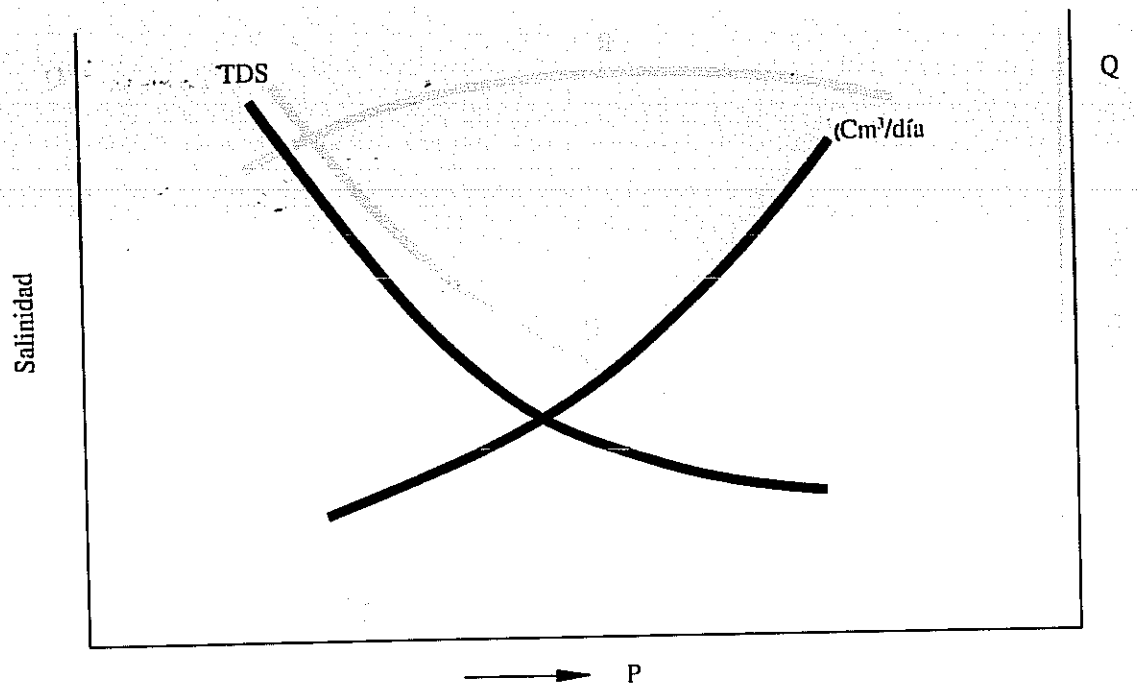


Figura 4.5. Relación producción-salinidad.

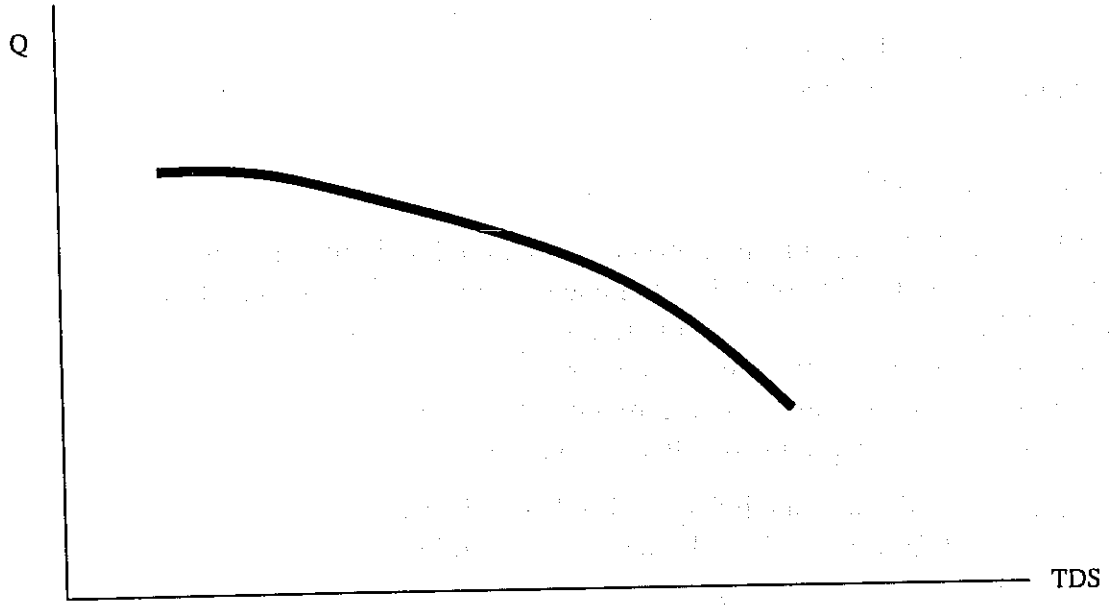


Figura 4.6. Influencia de la presión.

La máxima caída de presión en los elementos espirales es de 0,55-0,8 Kg/cm² (8-12 psi) por elemento ó 2,7-4,2 Kg/cm² (40-60 psi) por tubo de seis elementos. En fibra hueca pueden permitirse 3,5 Kg/cm² (50 psi) sin problemas mecánicos. Sin embargo, para ambas configuraciones es bueno limitar la caída a 1,7 Kg/cm² (25 psi).

Aunque ni el flujo (paso) de sales, ni el gradiente de concentración a través de la membrana están directamente afectados por un cambio en la presión de alimen-

tación, existe un efecto indirecto de la presión en la concentración de sales del agua producto.

Si la presión se reduce, pasa menos agua a través de la membrana mientras el paso de sales permanece constante, con lo que hay más sal por unidad de volumen de agua producto y en consecuencia mayor salinidad en ésta.

Con los avances logrados en el campo de la investigación han ido apareciendo membranas que trabajan cada vez a menor presión, pero proporcionando un caudal y un rechazo de sales aceptable.

Tanto el ensuciamiento como la precipitación están muy relacionados con el flujo de la membrana y se aceleran ampliamente por efecto de la polarización de la concentración en la superficie de la membrana.

Al forzar la presión para aumentar el flujo, se nota al poco tiempo un descenso en éste que puede ser del 25 %.

4.3.3. Con el pH

El rechazo de sales de las membranas depende en cierta medida del pH, pues cada material tiene un pH al que el rechazo es máximo. No todas las membranas reaccionan de igual forma a la variación del pH del agua de alimentación.

Las membranas de acetato de celulosa son muy sensibles a estas variaciones, de forma que sólo pueden actuar entre valores de pH de 4 a 7 de una forma continua, y durante periodos reducidos, como ocurre durante el lavado, pueden separarse ligeramente de estos pH.

Fuera de esos valores recomendados de pH las membranas se hidrolizan y pierden por tanto de forma irreversible sus características. La membrana de poliamida, menos sensible, funciona sin mayores problemas entre valores del pH de 4 a 11 y durante periodos cortos soporta valores de pH de 3 o de 12.

La flexibilidad de ambas membranas es pues bastante distinta y por tanto los cuidados que hay que tener con una y otra son también diferentes. Pero el que una membrana pueda funcionar dentro de un rango de valores de pH determinados, no significa que sea igualmente eficiente a todos ellos.

Normalmente hay un valor óptimo de pH al que la membrana tiene el mayor rechazo de sales y por tanto conviene trabajar lo más cerca posible de este valor.

A medida que nos separamos de este valor el rechazo de sales se deteriora y, por tanto, en igualdad de las restantes condiciones de temperatura o presión la calidad del agua producto es inferior.

Sin embargo, a pesar de ello, por las características del agua de alimentación, en determinadas circunstancias puede interesar trabajar a un pH distinto del óptimo de la membrana.

Una evaluación económica de los costes que ello conlleva debe decidir si se puede trabajar a ese pH aún sacrificando un poco la calidad del agua producto. Pero además del pH y conjuntamente con él, también la variación de temperatura influye en el rechazo de sales.

Por ejemplo, una membrana de acetato de celulosa cuyo pH óptimo de funcionamiento es de 5, para temperaturas normales entre 15 y 35 °C, puede hidrolizarse a ese mismo pH si la temperatura se eleva a 80 °C.

Por ello el fabricante de membranas suele dar también una temperatura máxima por encima de la cual no es conveniente operar con la membrana.

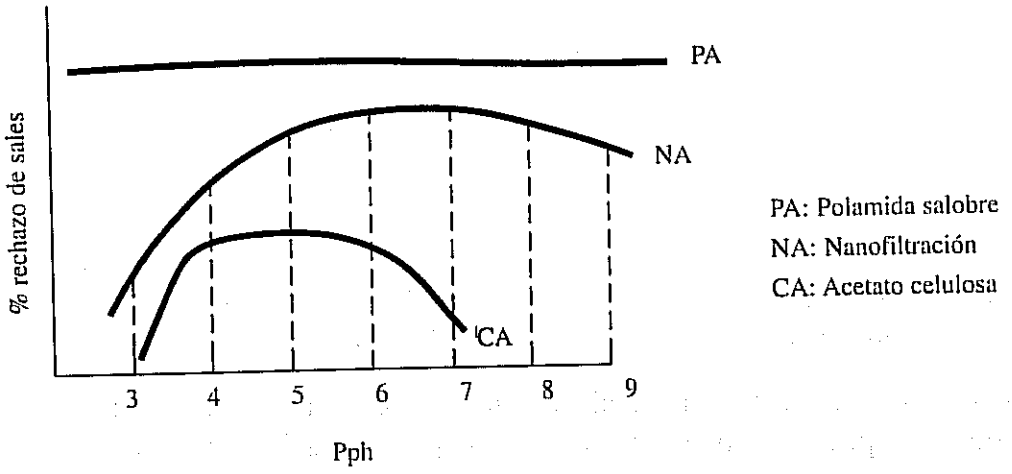


Figura 4.7. Influencia del pH en el rechazo de sales.

CAPITULO 5

DESCRIPCION DE LA INSTALACION

Introducción

Una instalación desaladora puede ser más o menos compleja según sea el tamaño y el tipo de agua a tratar y debe contemplar todos los elementos desde la toma de agua hasta el depósito final para almacenamiento del permeado, para que responda a las prestaciones que deben exigirse a un sistema sofisticado y por tanto caro.

Empezando por el esquema más simple, representado en la figura 5.1, bastaría con un conjunto de membranas y una bomba para suministrar la presión necesaria.

En la práctica, sin embargo, una instalación tan sencilla no es normal, excepto en pequeños equipos de uso doméstico y con capacidades de algunos litros al día. Incluso si la presión de la red es suficiente (> 4 Kg/cm^2), el equipo puede acoplarse directamente a ésta, prescindiendo de la citada bomba (Fig. 5.2).

A partir de este desarrollo preliminar la instalación se va complicando en función de las características del agua a tratar. La figura 5.3 recoge un esquema más real, en el que ya aparecen elementos del pretratamiento como filtros y equipos de dosificación de reactivos.

Este tipo de instalación es típico de los sistemas transportables o montados en contenedores, muy empleados en situaciones de emergencia o catastróficas.

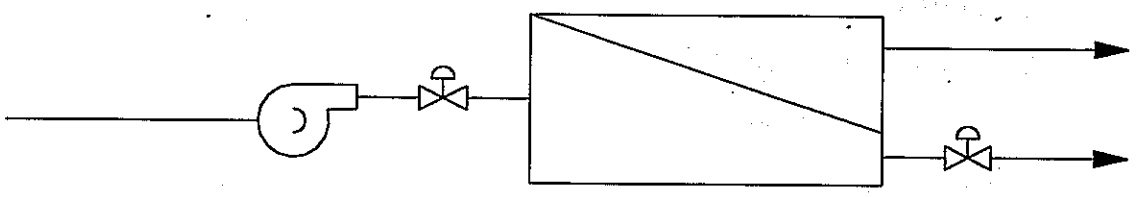


Figura 5.1. Esquema simple de instalación de O.I.

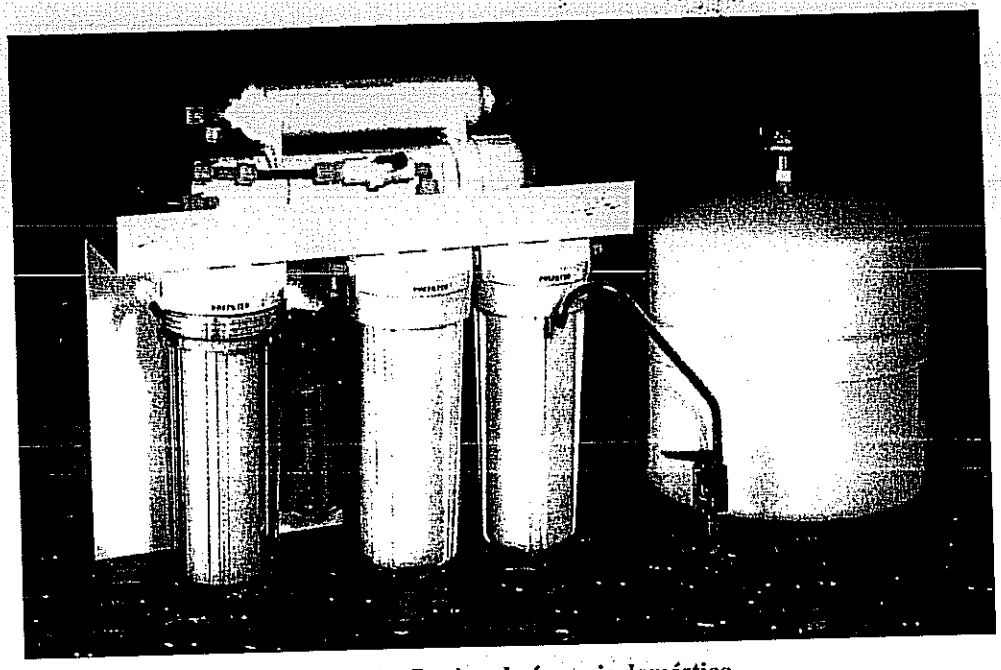


Figura 5.2. Equipo de ósmosis doméstico.

Por último, la figura 5.5 refleja el esquema de flujo de una instalación más compleja, pero más cercana a la realidad que las anteriores.

Esta instalación con equipo de recuperación de energía y a la que se le agregarán los instrumentos de control, es el modelo del que partiremos para su descripción, puesto que en ella aparecen todos los elementos con que nos encontramos en la mayoría de las plantas desaladoras de ósmosis inversa.

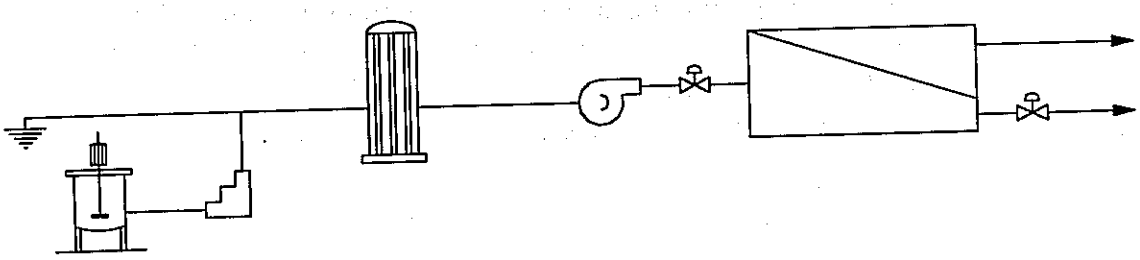


Figura 5.3. Esquema de instalación con filtros y dosificación.

En dicha instalación pueden establecerse cuatro zonas o partes, dotadas de equipos que por su cometido e importancia son muy distintos.

Dichas partes son:

— Captación o toma de agua.

— Pretratamiento físico-químico.

— Proceso (OI).

— Post-tratamiento.

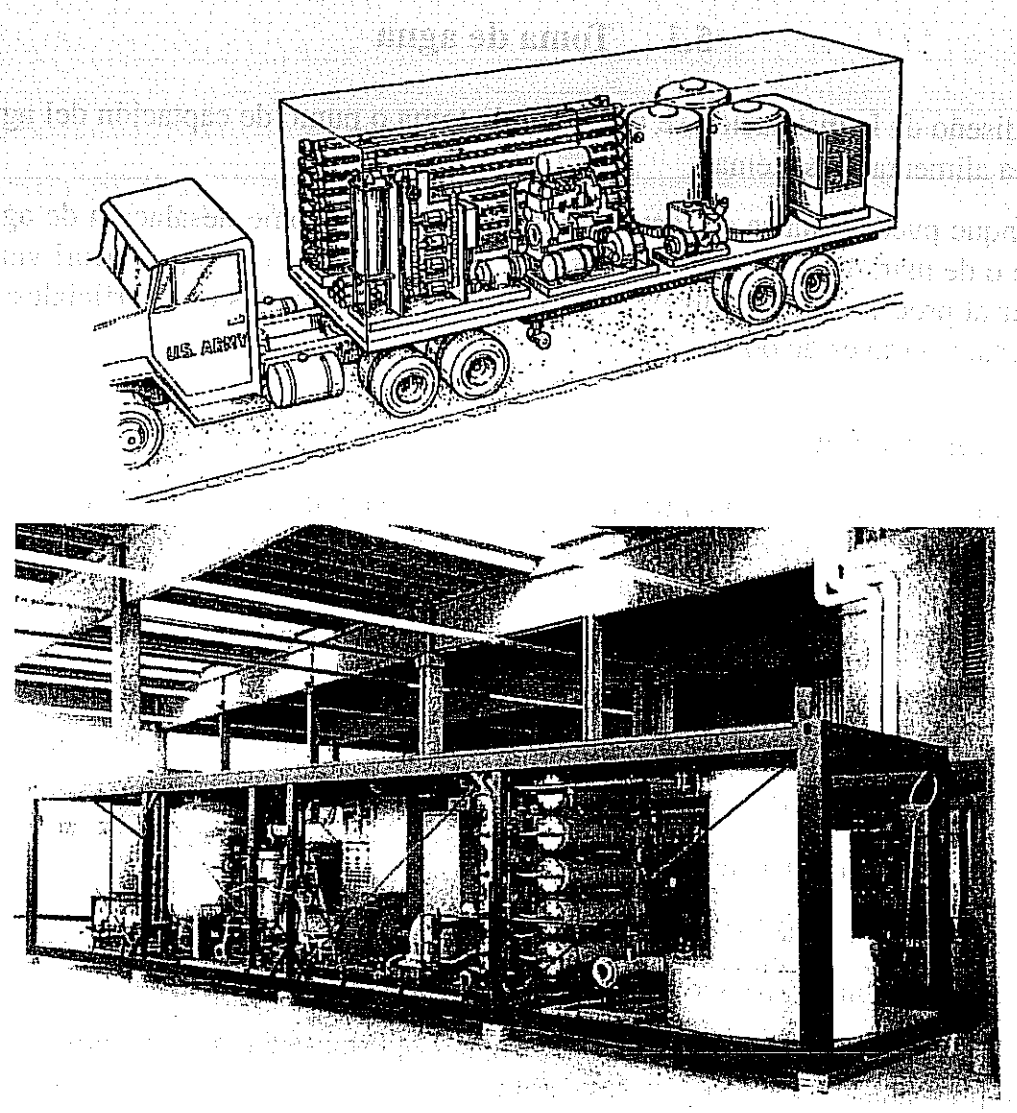


Figura 5.4. Equipo de ósmosis transportable.

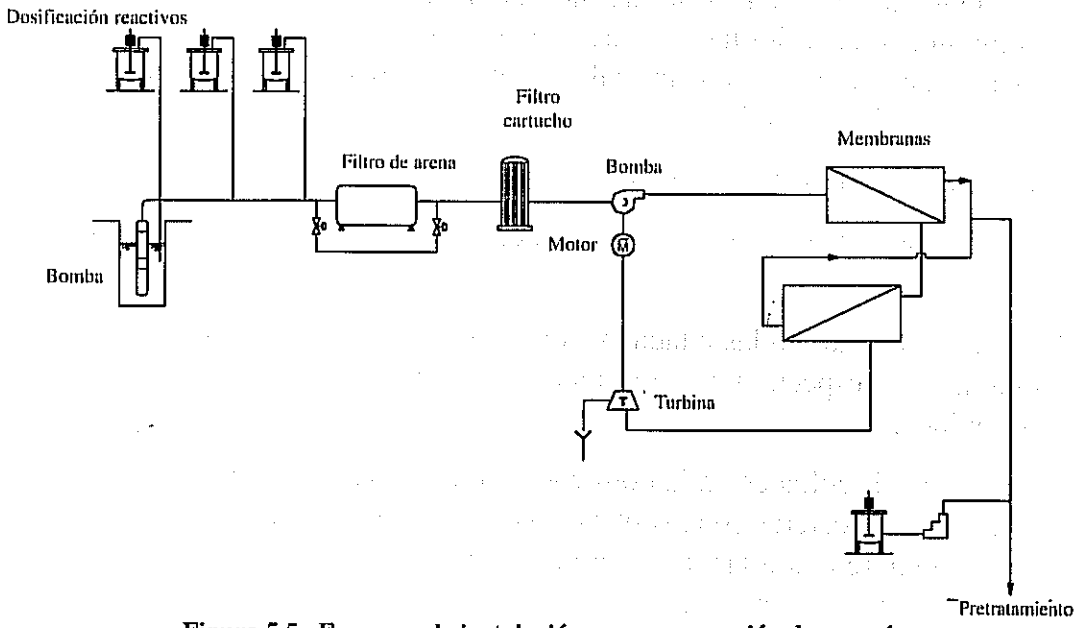


Figura 5.5. Esquema de instalación con recuperación de energía.

5.1. Toma de agua

El diseño de la instalación se inicia con la toma o punto de captación del agua que va a alimentar el sistema.

Aunque puede tratarse de instalaciones tan distintas como desalación de agua salobre o de mar, desde el punto de vista de las dificultades que a posteriori van a plantear al proceso, puede hablarse de tomas de agua «abiertas o superficiales» y «cerradas, o a través de pozo».

5.1.1. Toma cerrada

La toma de agua mediante pozo es la más favorable y la que siempre hay que intentar construir. Sin embargo, ello implica la permeación de caudales, a veces importantes, a través de los distintos estratos del terreno, que no siempre es posible lograr.

Las ventajas principales que ofrece una toma cerrada o en pozo son:

— Limpieza del agua como consecuencia de su filtrado en el terreno, lo que se traduce en unos índices de turbidez (NTU) y de colmatación (SDI) bajos.

— Ausencia de actividad orgánica y biológica.

— Bajo contenido de oxígeno disuelto.

— Baja contaminación.

— Temperaturas bastante estables.

Por el contrario, como inconveniente más importante en zonas continentales pueden presentar:

— Contenidos importantes de algunos elementos secundarios como hierro, aluminio, sílice, flúor u otros que exigen un tratamiento previo antes de alimentar las membranas, o la realización de un diseño conservador que en consecuencia reduce la eficiencia del proceso.

— Contaminación por nitratos, pesticidas, etc.

— Variaciones en su composición química a lo largo del tiempo e incluso según la época del año.

El aprovechamiento de las citadas ventajas permite abaratar considerablemente los tratamientos, especialmente químicos, de la instalación, y en ocasiones incluso los equipos.

Las mayores dificultades en la construcción de los pozos de captación se producen en las zonas costeras (pozos playeros), especialmente por los grandes caudales que se requieren para las instalaciones de agua de mar, que además de tener factores de recuperación menores, 40-50 %, suelen ser de mayores dimensiones para aprovechar la economía de escala.

Otro de los aspectos a considerar es la pérdida de caudales que puede producirse en los pozos a lo largo del tiempo, bien porque se produzca la sobreexplotación del acuífero del que se alimenta, en el caso de zonas de interior y aguas salobres, o por arrastre de elementos finos que obstruyen la afluencia de agua al pozo, en el caso del agua de mar.

Estos aspectos deben tenerse muy en cuenta a la hora de realizar la captación y tratar de aflorar caudales en exceso sobre los previstos, pues cualquier reducción de los mismos dejaría la instalación en condiciones precarias o requeriría obras adicionales en el futuro, que siempre son bastante más caras y hasta difíciles de ejecutar.

Dentro de las variaciones más frecuentes que se plantean en las tomas de agua de mar cerradas podemos citar:

Cántara de captación

Consiste en un depósito que se excava por debajo de la cota del agua en el terreno. Su forma puede ser circular en el caso de pozos normales para instalaciones pequeñas, o rectangular cuando son de mayor capacidad.

De esta forma el agua filtra a través de las paredes de la cántara o depósito, de la que es extraída mediante bombas horizontales.

Es una obra que presenta bastantes dificultades cuando la excavación es en roca y se precisa de grandes caudales, pues la parte inferior de la cántara se excava en zona inundada y resulta difícil estimar el caudal disponible.

El aspecto más importante de la construcción es la determinación de la cota inferior de la excavación, para que una vez colocadas las bombas se respeten los valores de la altura de aspiración, sumergencia y distancias entre base de la aspiración y fondo del depósito.

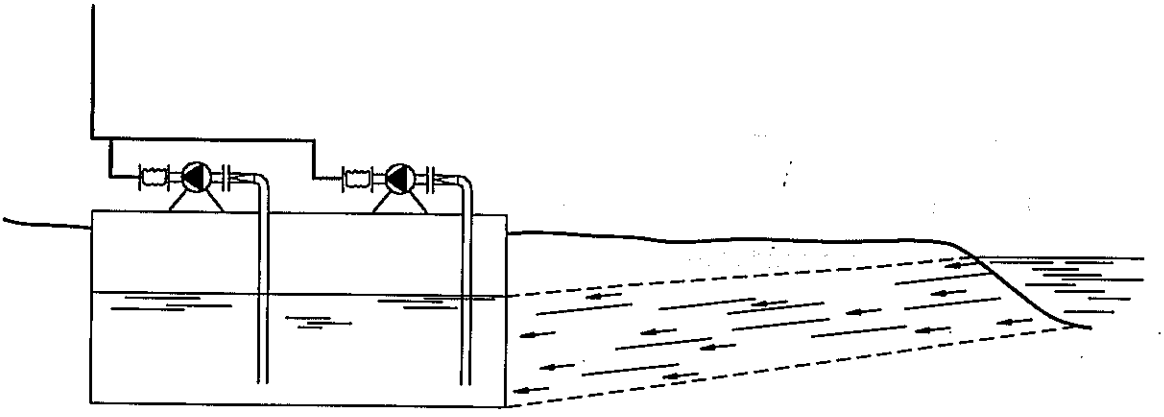


Figura 5.6. Cántara de captación.

En las obras marítimas debe tenerse en cuenta la influencia de las mareas y las diferencias entre la pleamar y la bajamar. La cota que debe marcar el nivel inferior de la captación viene determinada por la bajamar viva equinoccial, que se produce en determinados días del año y asimismo debe tenerse en cuenta el decalaje que se produce como consecuencia de la permeabilidad de los terrenos que el agua de mar tiene que atravesar hasta alcanzar el pozo.

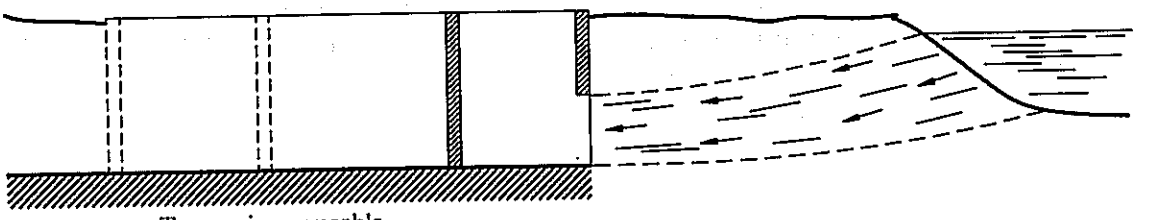
Se comprueba fácilmente la interconexión directa de estas obras con el mar, por la carrera de mareas que se produce dentro del depósito que suele ser bastante parecida a la de la marea en la zona.

Además deberá tener en cuenta el caudal que se trata de utilizar y el cono de depresión que se forma en la aspiración de la bomba, para que no se produzca el achique o vaciado del depósito.

Cuando son varias las bombas a utilizar en la captación, colocadas relativamente cerca unas de otras, es conveniente terminar la tubería de aspiración en un ensanchamiento o cono invertido, que neutraliza los efectos de los vórtices creados por las bombas cercanas que pueden bajar el nivel del agua de la cántara excesivamente y producir la parada de la bomba.

Cuando las necesidades de captación son elevadas, la cántara se sustituye por una galería o canal enterrado, abierto por uno de sus extremos, que se construye paralelo a la línea de costa.

Si la capa de terreno permeable a través de la cual se espera la aportación de agua no tiene demasiado espesor, la pared de la galería aguas arriba se excava y



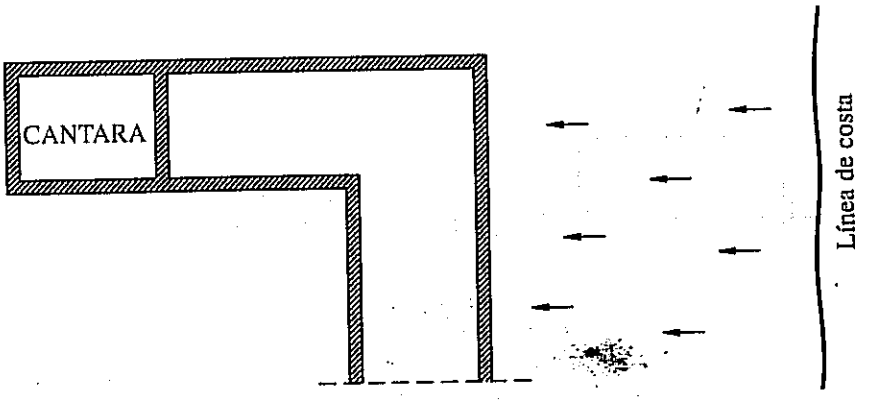


Figura 5.7. Canal de toma.

construye hasta dentro de la capa impermeable subyacente, mientras que la pared exterior, menos profunda, queda dentro de los límites del terreno permeable. De esta forma se aumenta el frente de entrada de agua.

La mayor dificultad consiste en todos los casos en garantizar el caudal necesario para la instalación.

Cuando las instalaciones son de pequeña capacidad y están situadas en zonas interiores, puede recurrirse a los tradicionales pozos de gran diámetro, 2,5-3,5 metros, con la profundidad suficiente para alcanzar el acuífero de captación.

Cámara de captación con sondeos verticales

En ocasiones la permeabilidad del terreno es insuficiente para aflorar el caudal necesario y en estos casos suele recurrirse a realizar perforaciones en el fondo de la cántara hasta alcanzar alguna capa de terreno más permeable que incremente el caudal de la captación. Esta situación es más frecuente en las instalaciones de agua de mar, a medida que la toma se aleja de la línea de costa.

No resultan indicados los sondeos inclinados hasta llegar a la misma línea de mar, pues en la captación se producen importantes arrastres de arena que pueden afectar a los equipos de la instalación, y acaban por taponar u obstruir los propios sondeos.

El objetivo principal de la construcción de la cántara es la posibilidad de utilizar bombas verticales, de mayor eficiencia y más fácil mantenimiento. Por ello deben conocerse a priori las características de la bomba a utilizar, especialmente la altura de aspiración, para colocar la solera sobre la que se asentarán las bombas a la cota conveniente.

Cuando el nivel del acuífero subterráneo o de la bajamar bajo la línea del terreno es importante, 8 o más metros, la realización de la cántara puede ser complicada y muy cara.

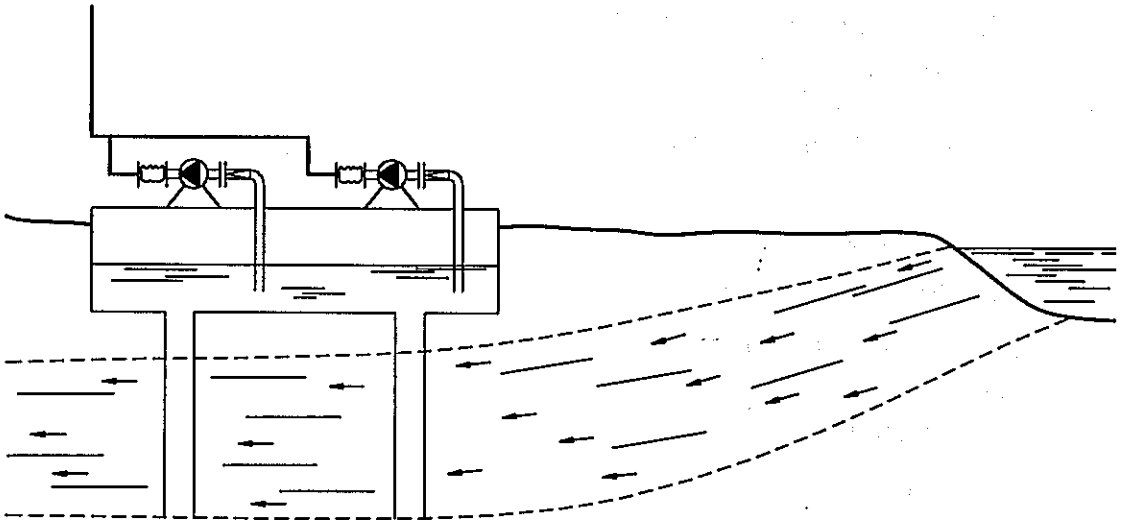


Figura 5.8. Cántara de captación con sondeos verticales.

En este caso, y aún sacrificando la eficiencia de los equipos, debe recurrirse a la captación mediante uno o más pozos de pequeñas dimensiones, separados entre sí, y provistos de bombas sumergibles.

En todos los casos los pozos se recubren interiormente mediante una tubería plástica, generalmente PVC, de diámetro adecuado a la perforación con objeto de evitar los derrumbamientos del terreno. Esta tubería debe ir ranurada en su tramo inferior, para facilitar la entrada del agua y actuar a modo de rejilla. De esta forma se protege además el pozo de las posibles filtraciones procedentes de niveles superiores que pueden estar contaminadas.

Una vez perforados los pozos, que pueden ser individuales o constituir una batería, según la importancia de la obra, hay que arbitrar la infraestructura hidráulica de colectores necesaria para llevar el agua a la zona de pretratamiento de la instalación.

5.1.2. Tomas de agua abiertas

Las tomas de agua superficiales tienen por tanto las características contrarias a las anteriores, es decir:

— Actividad orgánica y biológica importante.

— Contenido en sólidos en suspensión importante y variable según condiciones.

— Mayor exposición a la contaminación.

— Contenido más elevado de oxígeno disuelto.

— Amplio margen de variación de temperaturas.

— Composición química más homogénea.

Se recurre a ellas generalmente en las instalaciones de agua de mar, cuando las características de impermeabilidad del terreno no permiten el anterior tipo de captación. Sin embargo este tipo de estructuras también se utiliza en ocasiones en instalaciones de aguas salobres. Existen dos tipos principales de esta captación; toma en canal y toma mediante emisario submarino.

En ambos casos el agua captada a una determinada distancia de la costa o de un lago o río, debe ser recogida en un depósito, no siempre necesario, desde el que mediante las correspondientes bombas es impulsada a la instalación desaladora.

El objeto de este depósito es garantizar un suministro sin interrupciones a la instalación y actuar a modo de decantador para mejorar las condiciones físicas del agua de alimentación.

Es más frecuente en las instalaciones de mayor tamaño, ya que además actúa como reserva en el caso de avería de alguna de las bombas de la toma y se suele emplear también para bombeo del agua de limpieza de los filtros.

La *toma en canal* es de menor longitud y generalmente más superficial, por lo que está sometida a la acción del oleaje y en consecuencia se ve afectada por la presencia de algas contaminantes y turbidez propia de su emplazamiento. Es conveniente instalar a la entrada del mismo los dispositivos de filtración o separación de gruesos necesarios para evitar sobre todo la entrada de algas y materiales gruesos, que podrían romper las bombas.

Las rejillas fijas o móviles y con la superficie adecuada para garantizar una operación continua, sin obstrucciones, son imprescindibles. Los materiales empleados en estas rejillas deben ser resistentes a la corrosión, especialmente en el caso del agua de mar.

Cuando el oleaje o las características de la costa determinan una elevada turbidez y arrastre de algas o contaminación, es preciso recurrir a *emisarios submarinos*. En este caso la tubería de captación utilizada debe ser de un material resistente a la corrosión y flexible, siendo los más frecuentemente utilizados el polietileno (PE) y el poliéster reforzado con fibra de vidrio (PRFV) y debe sumergirse en el mar a la distancia conveniente para garantizar una profundidad mínima que evite la influencia del oleaje.

Su anclaje en el fondo marino se realiza mediante dados de hormigón. Para evitar su aterramiento u obstrucción por algas o elementos de gran tamaño, incluidos peces, se hace terminar en un colector provisto de varios filtros de entrada con rejilla.

La limpieza y mantenimiento de éstas se hace con aire, para lo cual es preciso disponer de los correspondientes equipos y tuberías que lleguen hasta las mismas. En otras ocasiones se dota a la tubería de una estructura más complicada, generalmente de hormigón, en su entrada.

En instalaciones de tamaño medio se puede recurrir a la construcción de pantalanes *(jety)* de los que se soportan las bombas, aunque en el caso de fondos poco profundos y arenosos, deben protegerse las bombas de la abrasión producida por las arenas.

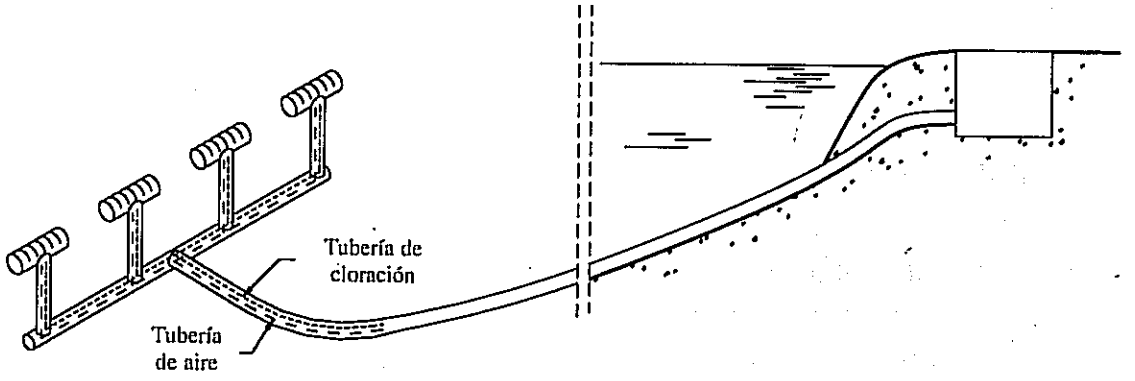


Figura 5.9. Colector submarino con filtros y equipos de limpieza.

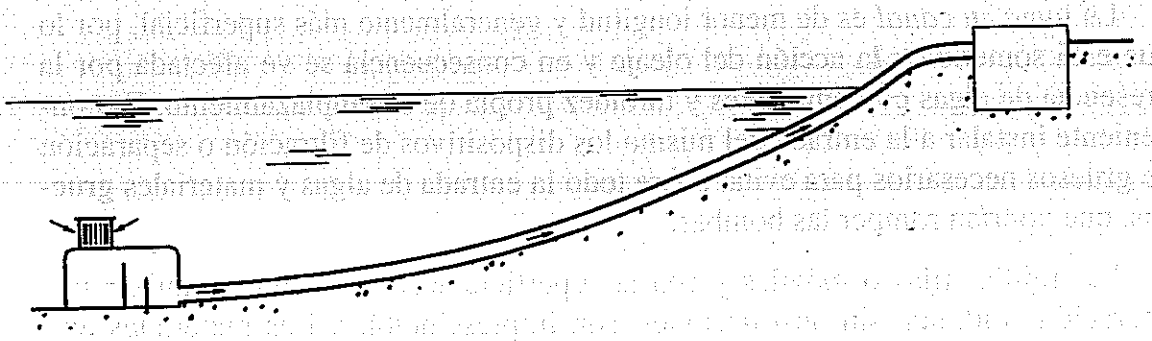


Figura 5.10. Estructura de captación sumergible.

El agua captada se conduce a un depósito a nivel del terreno, desde el que se bombea a la instalación.

5.2. Pretratamientos físicos

5.2.1. Filtros de arena

Los filtros de arena que se utilizan en las instalaciones desaladoras son generalmente de presión y no diferentes de los que se emplean en cualquier instalación de tratamiento de aguas.

Su tamaño debe ser acorde con el volumen a tratar y se colocan generalmente por conjuntos, en paralelo, con un filtro de repuesto para realizar el lavado de forma individual, sin tener que detener la instalación.

Se trata por tanto de depósitos cilíndricos, dispuestos de manera horizontal o vertical y rellenos de un material o medio filtrante.

El material empleado en la construcción de los mismos es chapa galvanizada y dada la corrosividad o poder oxidante del agua a tratar y los efectos negativos que el hierro ocasiona a las membranas y otros elementos de la instalación, deben ir recubiertos interiormente de una película que garantice el total aislamiento del hierro con el agua. Los materiales más empleados para estos recubrimientos son la goma, la ebonita o distintas capas de pintura tipo epoxi.

La aplicación de dichos tratamientos se realiza en talleres especializados que deben garantizar además la calidad sanitaria o alimenticia de los productos empleados, dado que las desaladoras se utilizan en muchos casos para abastecimientos humanos.

El movimiento del agua en estos filtros es siempre en sentido vertical, penetrando por la parte superior del filtro y descendiendo el agua a través de la capa o capas filtrantes, que retienen los materiales sólidos y algas que transporta. En su parte inferior llevan un colector o plataforma provisto de boquillas que recogen el agua filtrada.

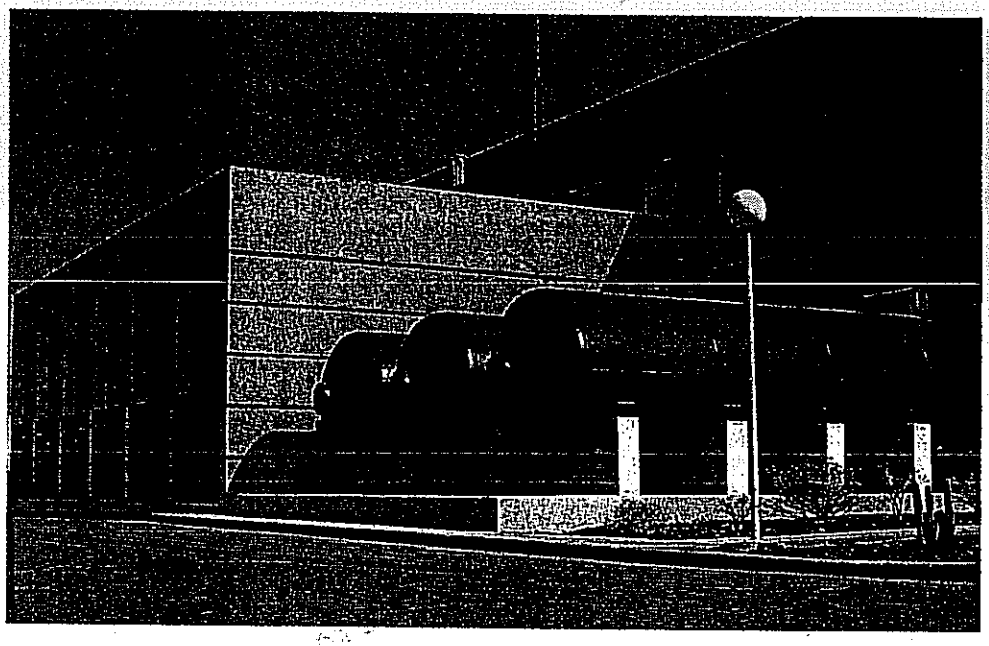


Figura 5.11. Filtros de presión horizontales.

Es importante el mecanismo de distribución del agua por la parte superior del filtro para conseguir un reparto uniforme y evitar el impacto sobre la superficie filtrante, que puede provocar caminos de flujo preferenciales y deteriorar la calidad del filtrado.

Los filtros verticales producen una calidad de filtrado superior y más homogénea que los horizontales, pues la capa filtrante es del mismo espesor en toda su superficie, mientras que en los filtros horizontales el espesor varía del centro a los bordes del depósito. Los filtros verticales tienen, sin embargo, una limitación de superficie filtrante que obliga a recurrir a los horizontales.

En el caso de instalaciones de pequeña capacidad los filtros suelen ser de poliéster.

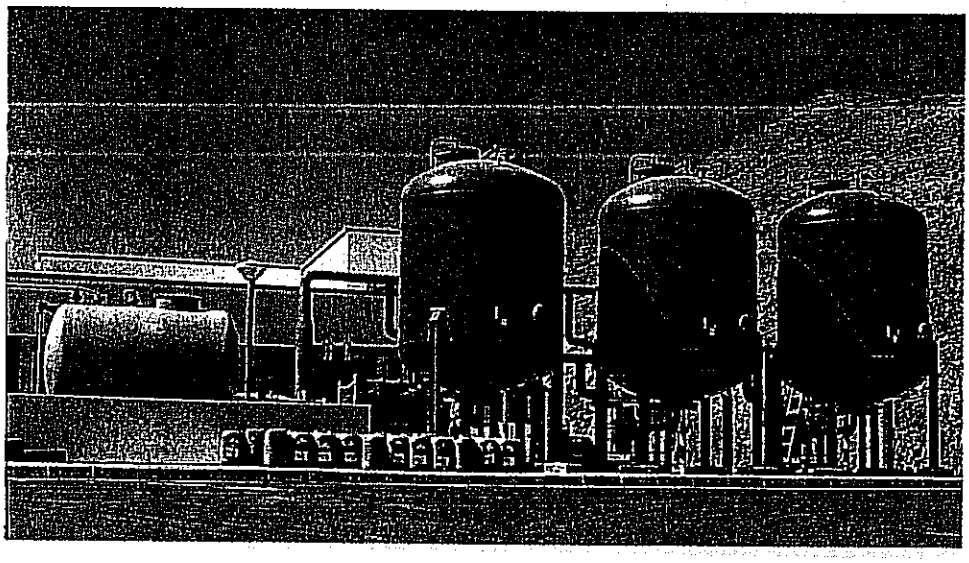


Figura 5.12. Filtros cerrados verticales.

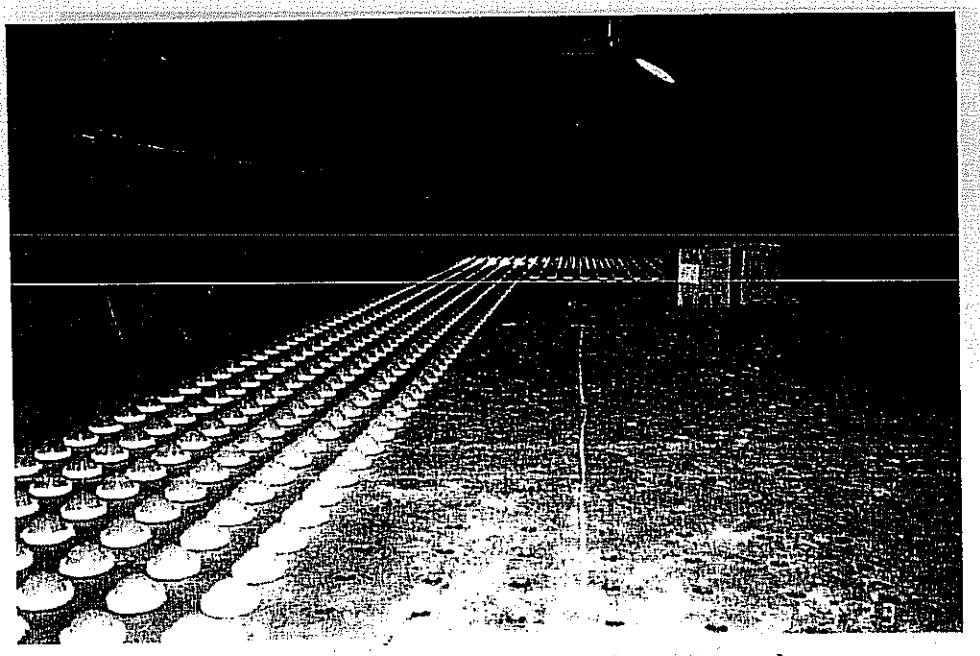


Figura 5.13. Falso fondo de filtros de arena cerrados.

En ocasiones, las condiciones de la toma, la superficie disponible o el tamaño de los filtros puede decidirnos a la elección de filtros abiertos o de gravedad.

En este tipo de filtros, de forma rectangular, el agua entra por un canal lateral situado en la parte superior, que actúa a modo de vertedero por desbordamiento, o provisto de orificios en sus paredes, y va desplazándose hacia abajo, a través del material filtrante, recogiéndose en un depósito en la parte inferior de los mismos. En algunos casos es recogida mediante un colector que la conduce a otro depósito situado a nivel inferior.

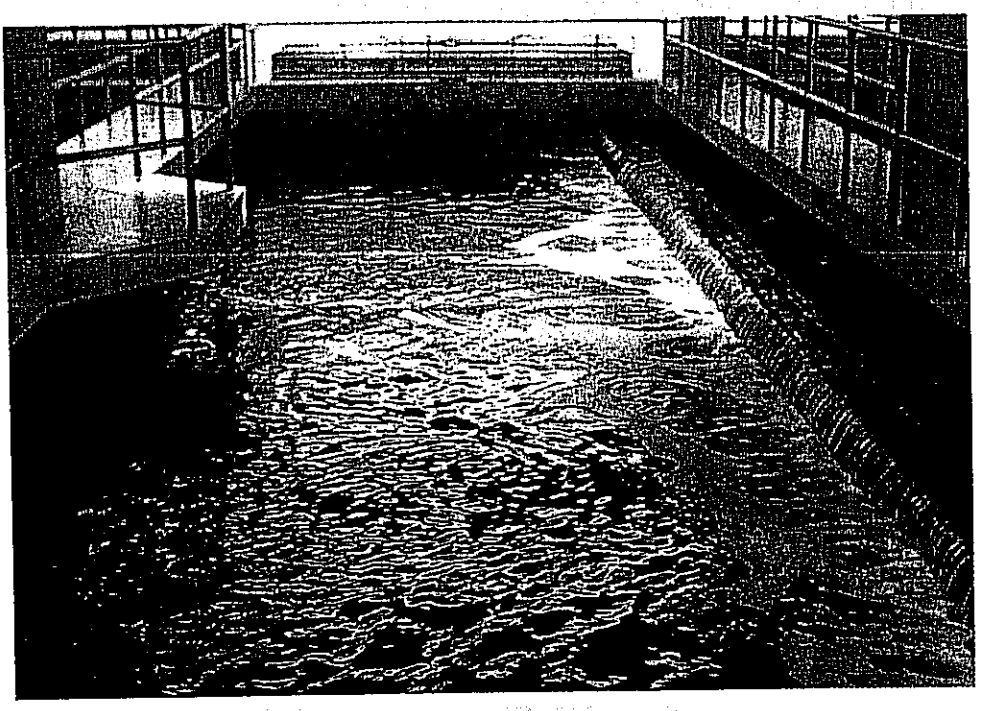


Figura 5.14. Filtros abiertos.

En estas circunstancias se requieren unos equipos de bombeo adicionales, bombas de transferencia o *«booster»* para volver a presurizar el agua y conducirla a los filtros de cartuchos.

El medio filtrante que puede ser único o formado por varios materiales distintos se coloca al final, una vez que los filtros han quedado colocados en su emplazamiento definitivo.

La limpieza de estos filtros se realiza con aire y agua, por lo que es necesario un equipo especial para este cometido, formado por bombas y compresores de aire de capacidad adecuada al tamaño del filtro.

Tanto el aire como el agua de lavado se incorporan al filtro desde su parte inferior, por debajo del material filtrante, de forma que el agua en su movimiento ascendente arrastra los materiales que obstruyen el filtro y es eliminada por la parte superior del mismo.

Para el control del lavado se necesita regular el caudal, de forma que sea el suficiente para producir la agitación de las partículas de material filtrante y el arrastre de la suciedad atrapada, pero no tan grande que provoque además el arrastre de dicho material o su mezcla. Como no se necesita una gran precisión en la medida suele emplearse un medidor de tipo rotámetro.

En el caso de filtros pequeños se efectúa el lavado solamente con agua a contracorriente.

Cada filtro debe tener un número de entradas o colectores suficiente para realizar todas las operaciones que requiere su funcionamiento, provistos de las correspondientes válvulas para provocar las inversiones de flujo necesarias.

En un filtro de presión son necesarias al menos las siguientes bocas o tuberías :

— Entrada de agua a filtrar.

— Salida de agua de lavado.

— Salida de agua filtrada.

— Entrada de agua de lavado.

— Vaciado del filtro.

— Rebose del filtro.

— Carga-descarga de arena.

— Entrada de aire.

Además los filtros de presión deben tener su correspondiente válvula de seguridad o disco de ruptura tarados y purgas de aire, para evitar accidentes y roturas por golpes de ariete.

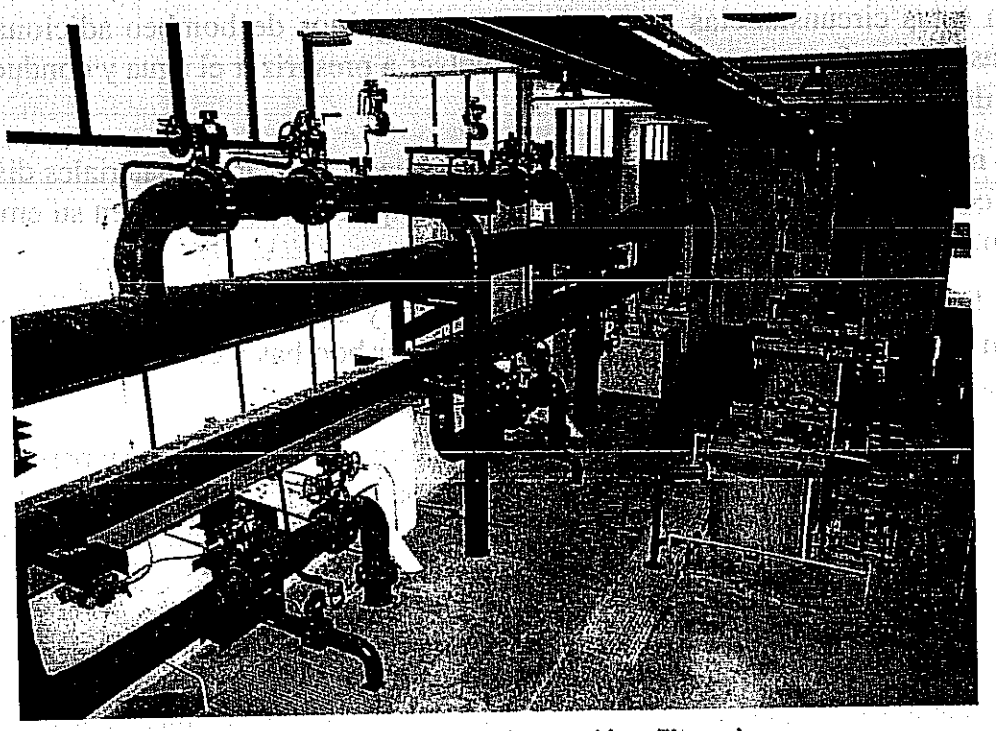


Figura 5.15. Colectores de alimentación a filtros de arena.

Por último son necesarias dos bocas de acceso al filtro, una para la parte superior donde se coloca el material filtrante y otra en la inferior para la cámara de agua filtrada.

La instalación debe estar provista de un sistema de colectores *(by-pass)* que permita prescindir de los filtros, lo que puede ser necesario en caso de alguna avería o cuando el agua de la captación mediante pozo sea de excelente calidad.

Asimismo estos colectores se emplean cuando se produce alguna anomalía en la alimentación de agua a la planta y puede recircularse a la captación o tirarse a drenaje, mientras se resuelve el problema, sin necesidad de parar las bombas de la captación y el ajuste de dosificaciones químicas que se requiere tras cada parada de la instalación.

Cuando existe más de un filtro en paralelo se les debe dimensionar para poder realizar el lavado de uno mientras su caudal es circulado a través del o de los filtros restantes. Esto supone asimismo la conexión de los colectores de entrada y salida de unos y otros para poder realizar dicha operación.

5.2.2. Filtros de cartuchos

Se utilizan en las instalaciones para poder garantizar un nivel de filtración mínimo de 5 micras que es el requerido por los fabricantes de las membranas.

Se trata de depósitos metálicos recubiertos interiormente, como en el caso de los filtros de arena de presión, de disposición vertical, y utilizan como medio fil-

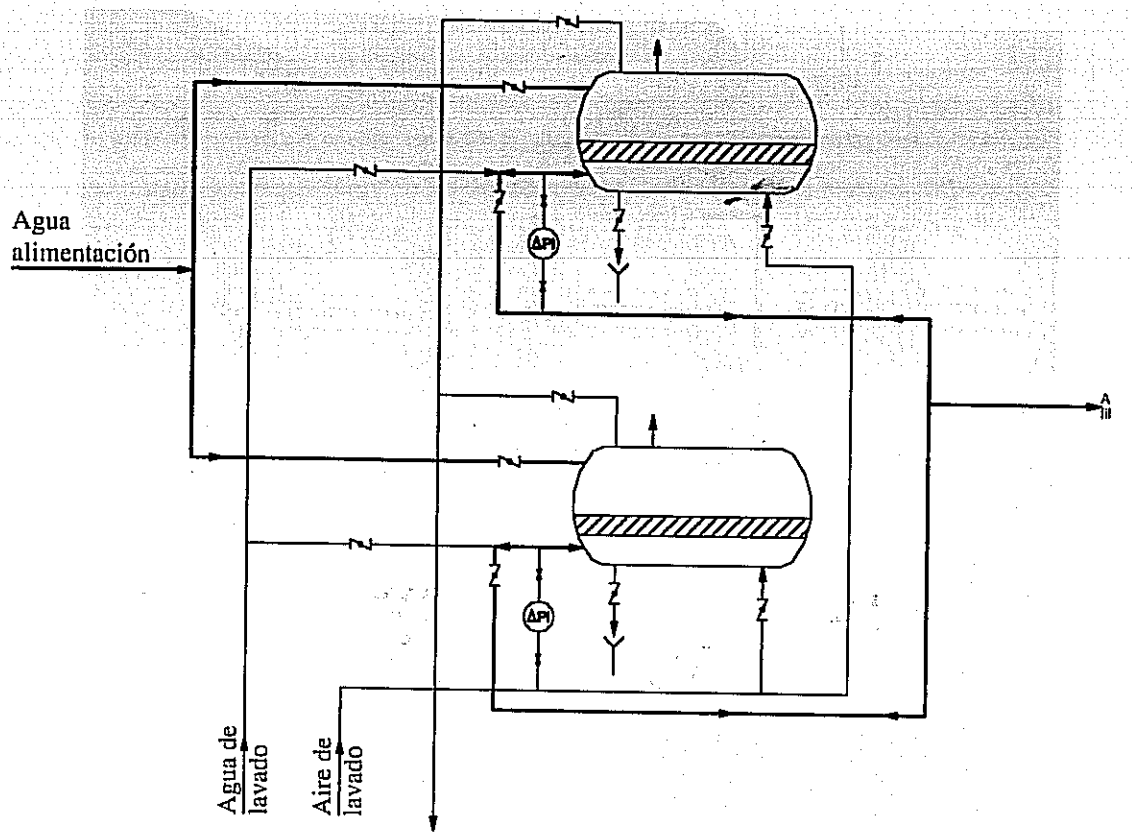


Figura 5.16. Conexión de filtros en paralelo.

trante unos cartuchos o bujías constituidos por un eje hueco, provisto de orificios, sobre el que se enrolla un hilo de polipropileno u otro material plástico a unas determinadas tensiones que garantizan la separación de sólidos de hasta ese tamaño.

El flujo del agua en los cartuchos se realiza desde la parte exterior hacia el eje en el que se recoge el agua filtrada; tiene por tanto que atravesar el hilo de polipropileno.

El agua entra generalmente por la parte inferior del filtro y después de atravesar los cartuchos se recoge por su parte superior.

Para ello los cartuchos quedan conectados a una plataforma de anclaje por su parte superior, de forma que se establecen dos cámaras, una en la parte inferior a la que llega el agua sin filtrar y otra en la parte superior con el agua filtrada.

En el caso de filtros pequeños el movimiento del agua puede ser en sentido inverso del descrito, recogiéndose el agua filtrada por su parte inferior.

Estos filtros deben constar de las conexiones y colectores necesarios para poder realizar el contralavado o lavado a contracorriente, es decir para poder revertir el flujo desde el interior del cartucho hacia afuera.

De esta forma puede realizarse el lavado de los cartuchos, separando las partículas que han quedado retenidas sobre la superficie filtrante.

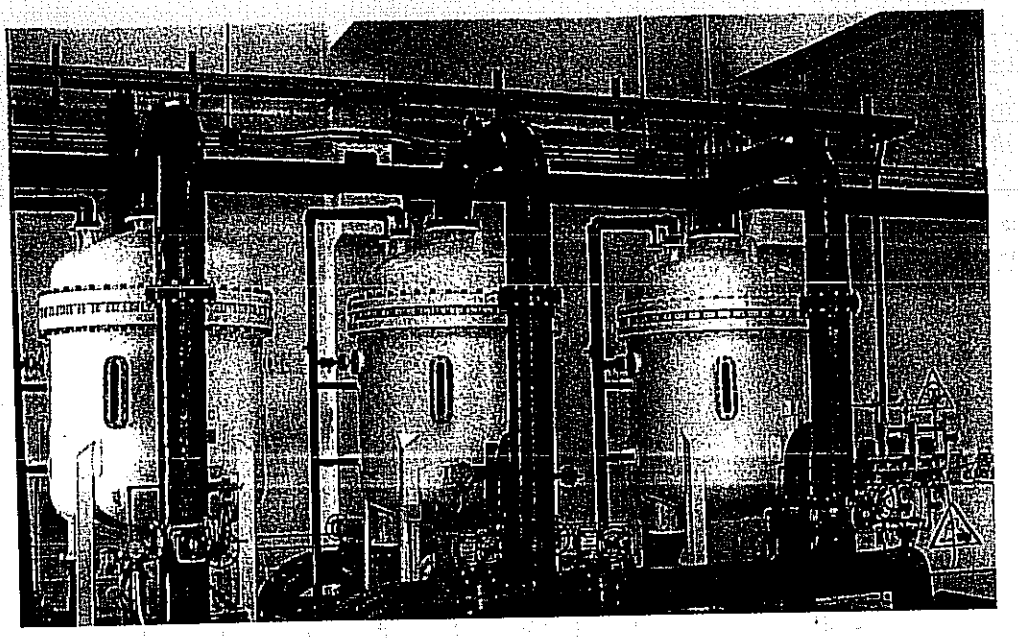


Figura 5.17. Filtros de cartuchos.

Sin embargo, esta limpieza no es tan eficaz como la de los filtros de arena, o filtros normales de malla, dado que las partículas retenidas son muy pequeñas y quedan fuertemente atrapadas entre los hilos o fibras del cartucho. Los filtros se colmatan periódicamente y hay que proceder a la sustitución de los cartuchos.

Las dimensiones de los cartuchos son de 1,5" a 2" de diámetro y variable entre 0,25 m 1,25 m de longitud.

Para aumentar la superficie filtrante han aparecido recientemente en el mercado filtros plegables.

Su funcionamiento es similar al de los cartuchos de enrollamiento, aunque su duración es mayor puesto que la superficie filtrante para un mismo diámetro suele ser 10 veces superior.

5.2.3. Filtros precapa

Son filtros de elevado coste de inversión y mantenimiento, dado que requieren una técnica especial para su manejo, reservándose su utilización para aguas susceptibles de contaminación como las que se suelen captar a través de las tomas superficiales abiertas.

Sólo está justificado por tanto en instalaciones muy grandes o en otras dedicadas a agua para la industria, en que, en situaciones de trabajo difíciles, refuerza la seguridad de la filtración. Se instalan después de los filtros de arena y antes de los de cartuchos. También, como en el caso de los filtros de arena, existen filtros de precapa abiertos y cerrados.

El principio de ambos es el mismo y consiste esencialmente en un elemento de filtración que actúa a modo de soporte, sobre el que se deposita una capa de material filtrante muy fino, de forma que el agua antes de atravesar el elemento de filtración tiene que atravesar esa precapa.

Sin embargo, aunque el principio sea el mismo, la aplicación y eliminación de la precapa requiere una técnica especial. Se precisa además de un equipo formado por tanques para preparación de la precapa y bombas para su impulsión a los filtros.

Los filtros de precapa cerrados son similares a los de cartuchos y el elemento filtrante es el citado cartucho que puede tener una selectividad entre 5 y 10 micras.

Los abiertos consisten en un depósito de forma rectangular sobre el que se colocan una serie de elementos filtrantes o láminas, también de esa forma, que quedan suspendidos de un bastidor.

El agua filtrada de las distintas láminas se recoge en un colector que se conecta a la aspiración de una bomba. Por tanto, en lugar de impulsarse el agua a presión sobre los elementos filtrantes, se aspira el agua a través de dichos elementos.

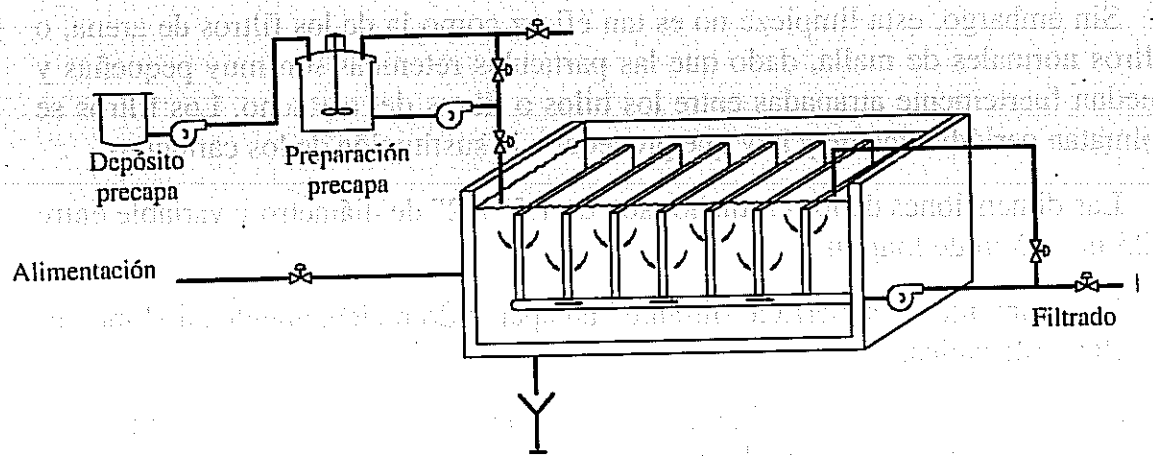


Figura 5.18. Filtros de precapa abiertos.

5.2.4. Microfiltración

En ocasiones podemos encontrarnos en las instalaciones de desalación, en las que existen problemas graves de ensuciamiento que obligan a lavados y paradas frecuentes de la instalación, sistemas de filtración especiales como la micro y ultrafiltración.

Los equipos de filtración que utilizan este tipo de tecnologías son bastante distintos de los habituales filtros de que hemos hablado hasta ahora.

La diferencia principal estriba en la utilización como material filtrante de una membrana de mayor poder selectivo que los filtros normales y por tanto muy susceptible al ensuciamiento.

A consecuencia de ello, para obtener una alta eficiencia del sistema, se requiere que el lavado de membranas se realice de forma automática y no con mucha frecuencia, pues de lo contrario estaríamos trasladando el problema de las membranas de ósmosis a las membranas de filtración y no se obtendrían sensibles ventajas.

La microfiltración realiza una separación de partículas de hasta 0,1 micra. Se utilizan para ello membranas que, al igual que las de ósmosis de fibra hueca, están constituidas por un haz de fibras huecas de 2 mm de diámetro, por tanto mucho más gruesas que aquellas, y de otros materiales.

El agua pasa a través de las paredes sobre las que se depositan las partículas, y el alma central de la fibra constituye el colector o canal de recogida del agua producto.

Cuando las membranas se ensucian aumenta la pérdida de carga a través de ellas y hay que realizar su lavado, que se efectúa alternativamente con agua filtrada y aire.

Los equipos son muy compactos y llevan incorporados el sistema de limpieza, que debe automatizarse para que, en función de las características del agua a fil-

trar, dichos lavados se efectúen con la frecuencia suficiente para que no se produzcan ensuciamientos irreversibles que afectarían al rendimiento de la instalación.

La discontinuidad en la operación de estos equipos exige dotar a la instalación de un depósito regulador intermedio entre microfiltración y equipo de desalación, pues su elevado coste impide disponer de un equipo de reserva que permita el funcionamiento en continuo.

Aún en su forma más simple es un sistema enormemente caro que sólo en casos especiales puede justificarse, como sería en determinadas instalaciones de uso industrial, y menos frecuentemente en reutilización de aguas residuales.

El pequeño tamaño de los poros de estas membranas les permite además la retención de bacterias y parte de los virus.

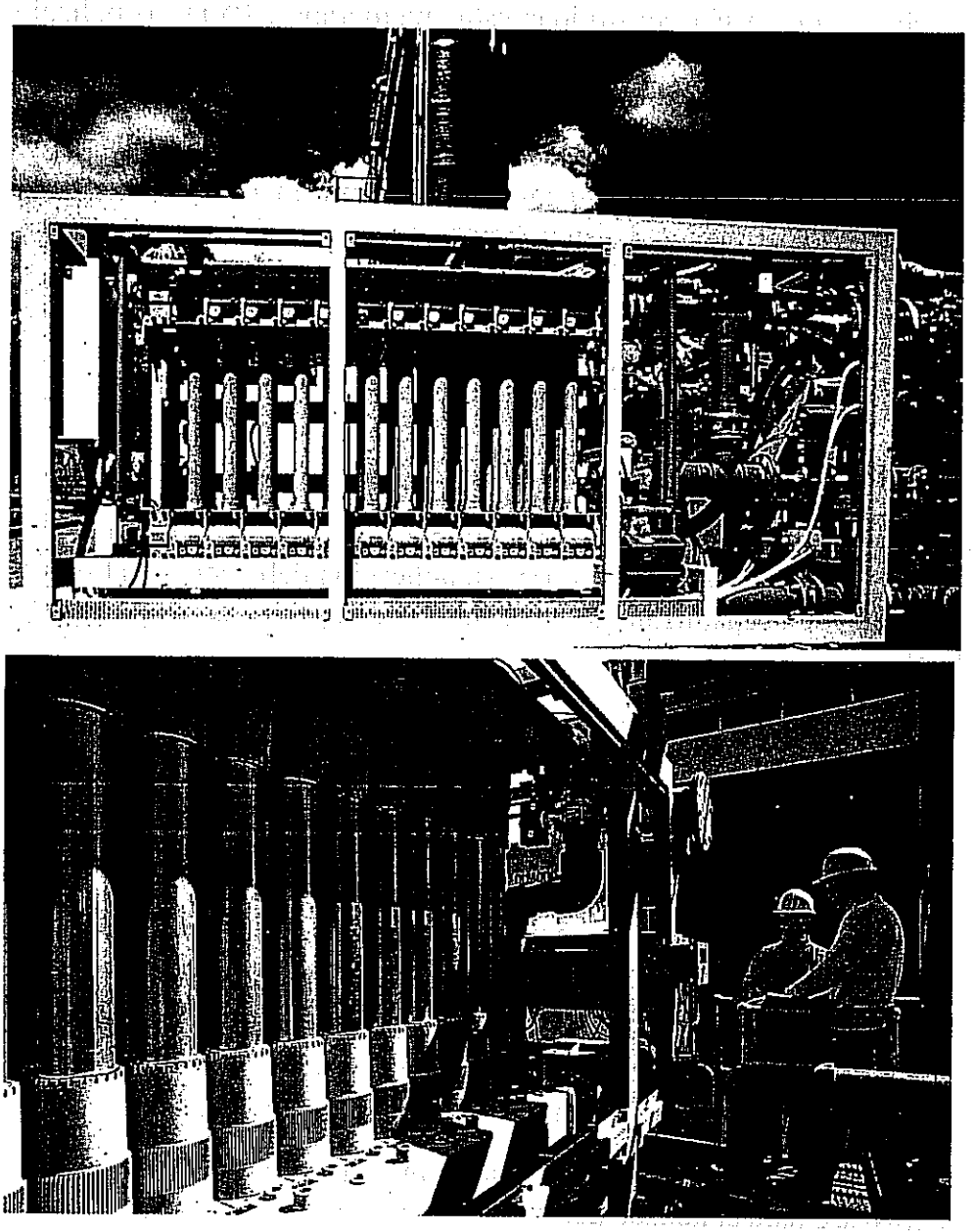


Figura 5.19. Microfiltración.

5.2.5. Ultrafiltración

Es un sistema que también utiliza membranas y por tanto no muy diferente del anterior, excepto en la existencia de dos tipos de membranas distintas, arrollamiento en espiral y fibra hueca.

Cuando las membranas son del tipo de arrollamiento en espiral se colocan dentro de un tubo de presión, generalmente en número no superior a tres. La separación se realiza a causa del tamaño del poro, siendo la selectividad de 0,01 micra.

Las de fibra hueca se agrupan en haces, como ya se ha dicho, en el interior de un recipiente y el sentido del flujo de filtración es inverso al de las membranas de microfiltración, es decir de dentro hacia afuera.

El material de que están construidas estas membranas, PVDF o polisulfona principalmente, las hace resistentes a la cloración, lo que no sucede con las otras membranas.

Al igual que en el caso anterior, sólo condiciones muy especiales justifican su uso, dado que los problemas de ensuciamiento de estas membranas no son muy distintos a los que experimentan las membranas de ósmosis inversa, y su coste parecido.

5.3. Pretratamientos químicos

5.3.1. Desinfección

El hipoclorito sódico, el producto más empleado en la desinfección, es un líquido, por lo que el equipo necesario para su aplicación debe constar al menos de un depósito para almacenamiento del producto y de las bombas dosificadoras correspondientes.

En instalaciones pequeñas se coloca una bomba dosificadora, pero al aumentar el tamaño de éstas, es conveniente colocar al menos dos bombas, que se irán alternando en su funcionamiento, para evitar que la avería de una bomba única paralice la instalación.

La instalación de más de dos bombas dependerá de las necesidades de dosificación, la capacidad de éstas, las disponibilidades y el precio global del conjunto dosificador.

Todas las bombas deben constar de filtros en la aspiración y válvulas de seguridad en la impulsión que permitan el retorno al depósito del líquido impulsado, si en alguna circunstancia se produjera una alteración en el funcionamiento.

En las instalaciones de una cierta importancia hay que prever además una bomba de trasvase para el llenado del depósito, dado que el suministro del producto se realiza en camiones cisterna.

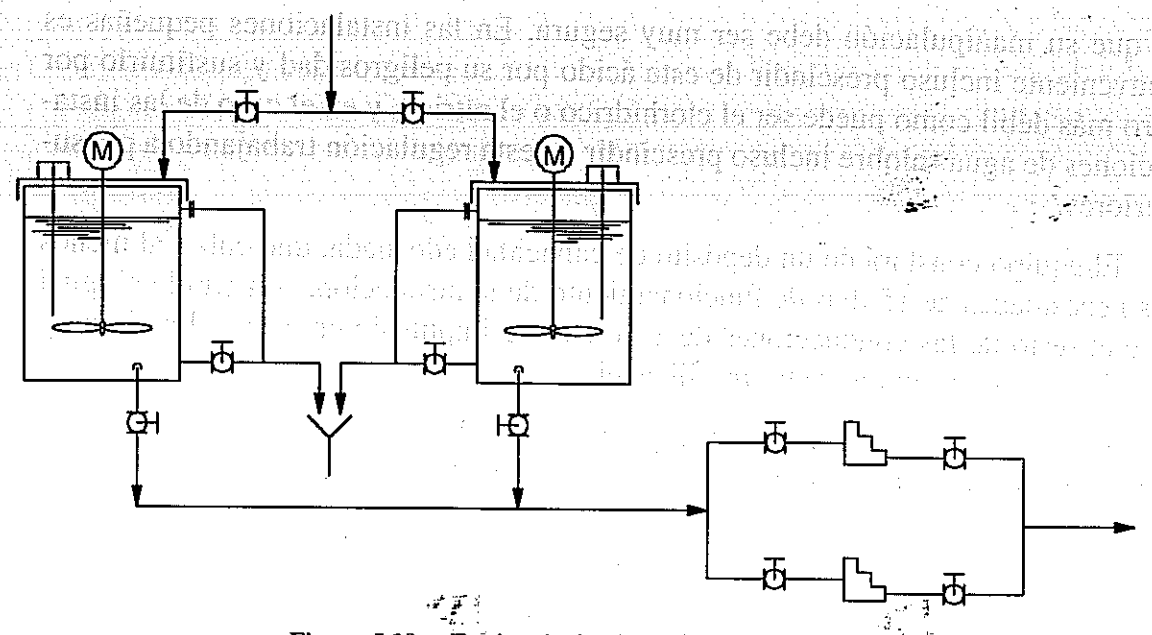


Figura 5.20. Equipo de dosificación de hipoclorito.

La capacidad del depósito debe ser suficiente para cubrir al menos las necesidades de la instalación durante unos 15 días y debe constar de un nivel que detecte con antelación la escasez de producto.

Según las circunstancias, la desinfección se puede realizar en continuo o en la toma de agua. Incluso son frecuentes ambos tipos de aplicaciones como ocurre en las instalaciones de agua de mar.

En estos casos la dosificación en continuo es con dosis pequeñas, mientras que periódicamente se realizan dosificaciones en la toma de agua o captación, de mayor volumen.

El equipo de dosificación debe estar provisto de las correspondientes conducciones que permitan la aplicación del desinfectante en el punto adecuado, es decir en la propia captación o en el colector que conduce el agua a los filtros, antes de su entrada en estos. Esta última dosificación permite actuar al hipoclorito en algunos casos como coagulante o ayuda de coagulante.

Asimismo la capacidad de las bombas debe permitir la aplicación de las dosis de choque en la toma, por lo que a veces es necesario colocar una bomba dosificadora más para cubrir dicha eventualidad.

En algunas instalaciones en que la captación de agua suele estar muy alejada del resto, puede ser conveniente colocar un segundo equipo de dosificación en ella, de menor capacidad y provisto del depósito adecuado.

5.3.2. Equipo de regulación de pH

El ácido sulfúrico utilizado para regular el pH tiene una elevada concentración 96-98 %. Se trata por tanto de un líquido altamente corrosivo y peligroso por

lo que su manipulación debe ser muy segura. En las instalaciones pequeñas es conveniente incluso prescindir de este ácido por su peligrosidad y sustituirlo por otro más débil como puede ser el clorhídrico o el nítrico, y en el caso de las instalaciones de agua salobre incluso prescindir de esta regulación trabajando a pH superiores.

El equipo constará de un depósito de capacidad adecuada, que cubra al menos las necesidades de 15 días de funcionamiento de la instalación, construido al igual que el resto de las conducciones de aspiración e impulsión en acero al carbono y provisto de un deshumectador de silicagel.

Respecto al número de bombas y sus dispositivos de seguridad y filtración, puede aceptarse lo mismo indicado para el equipo de cloración. Asimismo, es necesaria la bomba de trasvase. La aplicación del producto se hace en el colector de alimentación a la instalación entre la toma de agua y los filtros.

El depósito debe ir colocado en el interior de un cubeto, recubierto interiormente de baldosa antiácido y de capacidad al menos igual que la del mismo.

Su ubicación se hará en un lugar con suficiente ventilación para impedir la acumulación de gases tóxicos.

Hay que tomar además especiales precauciones en el punto en que el sulfúrico se mezcla con el agua puesto que se produce una elevación importante de la temperatura. Para mayor seguridad, en estos puntos se han diseñado las Tés de mezcla, construidas en materiales resistentes a las temperaturas elevadas como el Teflón y que son las que soportan el brusco calentamiento producido.

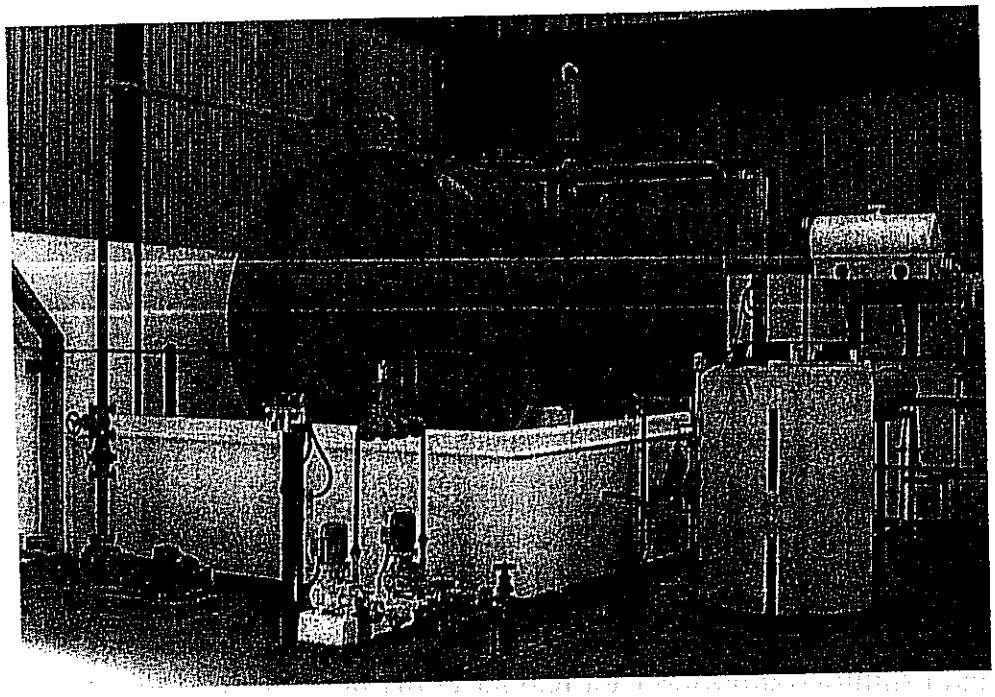


Figura 5.21. Equipo de sulfúrico.

5.3.3. Equipo dosificador de coagulante

Los coagulantes de uso más frecuente que se emplean en estas instalaciones, cloruro férrico o distintos polímeros, se dosifican en cantidades bastante inferiores a los productos anteriores, excepto excepcionalmente en el caso del primero.

Los equipos son por tanto menores, y además del número de bombas que se considere conveniente con sus correspondientes protecciones, se instalarán dos depósitos de almacenamiento del producto que funcionarán alternativamente. De esta forma se dosificará siempre un producto fresco y su eficacia será mayor.

Si la instalación es grande, puede ser conveniente para la utilización de cloruro férrico un sólo depósito de mayores dimensiones, de las mismas características del que se emplea para el almacenamiento del hipoclorito sódico. La dosificación de este producto se realiza antes de los filtros de arena de la planta.

5.3.4. Dosificación de reductor

El producto generalmente empleado es el bisulfito o metabisulfito sódico, producto sólido que debe prepararse mediante su disolución en agua.

Se colocan dos depósitos en paralelo provistos de sus correspondientes agitadores, que permitan la preparación del producto en uno de ellos cuando en el otro empieza a agotarse. El equipo debe ser similar al descrito para los coagulantes poliméricos o al que se describe a continuación para los antiincrustantes.

Las conducciones para aplicación del producto deben permitir la inyección del mismo, tanto entre los filtros de arena y de cartuchos, como a la salida de estos últimos filtros.

Cuando la captación es en pozo y el agua que se obtiene es bastante limpia suele emplearse el bisulfito como reactivo de desinfección en la propia captación, por lo que se deberán llevar también las tuberías hasta el pozo de captación.

La aplicación entre ambos filtros ofrece unas mayores garantías de eficacia, pero en cambio el circuito hidráulico y los filtros de cartuchos quedan desprotegidos del desinfectante, por lo que según el tipo de contaminante, puede volver a reproducirse en estos filtros que, por el material utilizado, polipropileno, y los elementos retenidos, constituyen un excelente medio de cultivo que facilita la proliferación de microorganismos.

En estas circunstancias es preferible mantener estériles los filtros de cartuchos y dosificar el reductor inmediatamente a la salida del mismo, en la zona de turbulencia que se produce en la misma. El recorrido hasta las bombas de alta presión y la agitación en ellas es suficiente para lograr un buen efecto neutralizador.

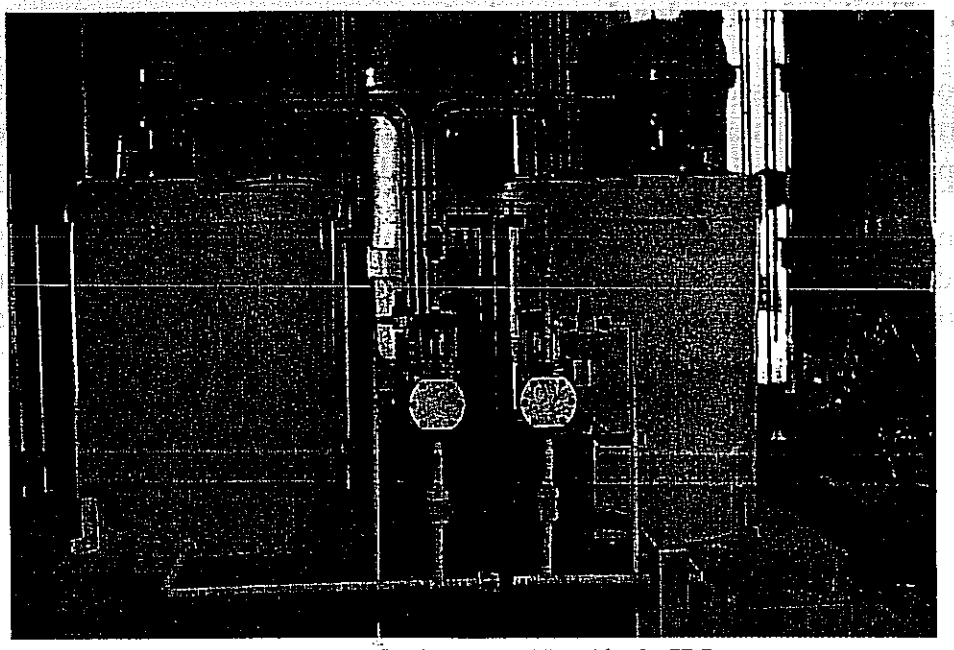


Figura 5.22. Equipo de dosificación de SBS.

5.3.5. Aplicación de estabilizantes

Todas las instalaciones de agua salobre deben constar de equipos para la aplicación de inhibidores o antiincrustantes.

Aunque en el caso de las instalaciones de agua de mar no siempre es necesario, también es conveniente su colocación. A lo largo de la vida de una planta pueden producirse circunstancias que obliguen a cambiar el pretratamiento químico.

El pequeño coste que supone este equipo en relación al volumen total de la inversión de la planta justifica plenamente el tenerlo como un elemento de reserva. Como en el caso de los coagulantes poliméricos las dosis aplicadas son pequeñas y los equipos de tamaño reducido.

Las bombas tendrán sus elementos de seguridad y protección correspondiente y se instalarán dos depósitos de capacidad adecuada, dado que según el tipo de producto que se utilice, su efectividad suele ser limitada en el tiempo entre tres días y una semana. De esta forma se dosificará siempre un producto recién preparado desde un depósito, mientras en el otro se estará preparando el producto nuevo cuando esté próximo a terminarse el del anterior.

Para facilitar la disolución del producto es necesario la colocación de varillas agitadoras o electroagitadores en cada depósito.

La aplicación del antiincrustante mediante las correspondientes conducciones se deberá hacer después de los filtros de arenas y antes de los filtros de cartuchos. De esta forma se evita que los primeros retengan parte del producto y los segundos impiden que, si una parte del producto no se ha disuelto bien, pueda pasar a las membranas.

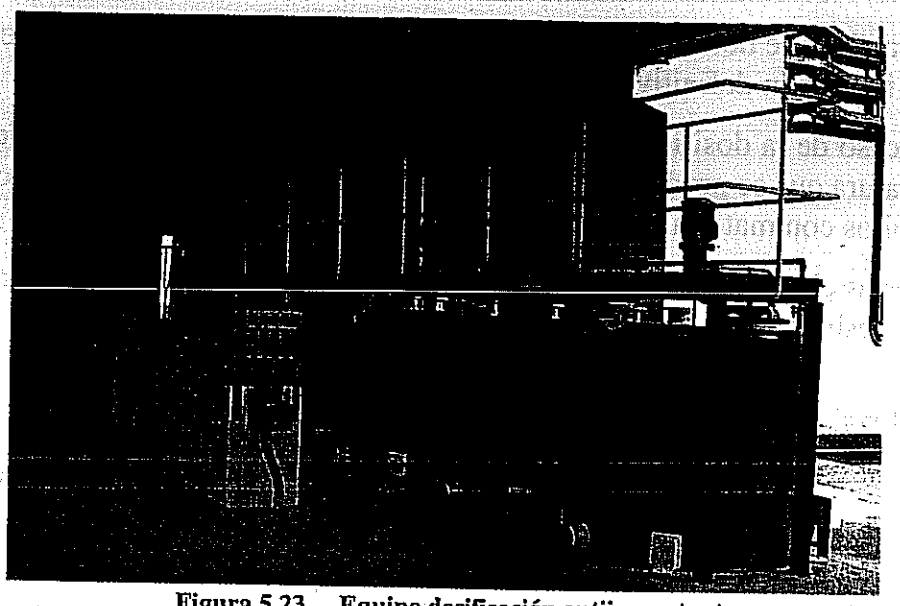


Figura 5.23. Equipo dosificación antiincrustante.

5.3.6. Sistemas de dilución

Cuando las instalaciones son de gran capacidad, los caudales de reactivos que se dosifican son muy pequeños en relación con el caudal total de agua tratada.

En estos casos, para lograr un efecto más rápido en la corriente de agua, el producto químico no se inyecta directamente en el colector general, sino que se instala otro circuito auxiliar de mayor diámetro 2-2,5" por el que se hace circular agua filtrada.

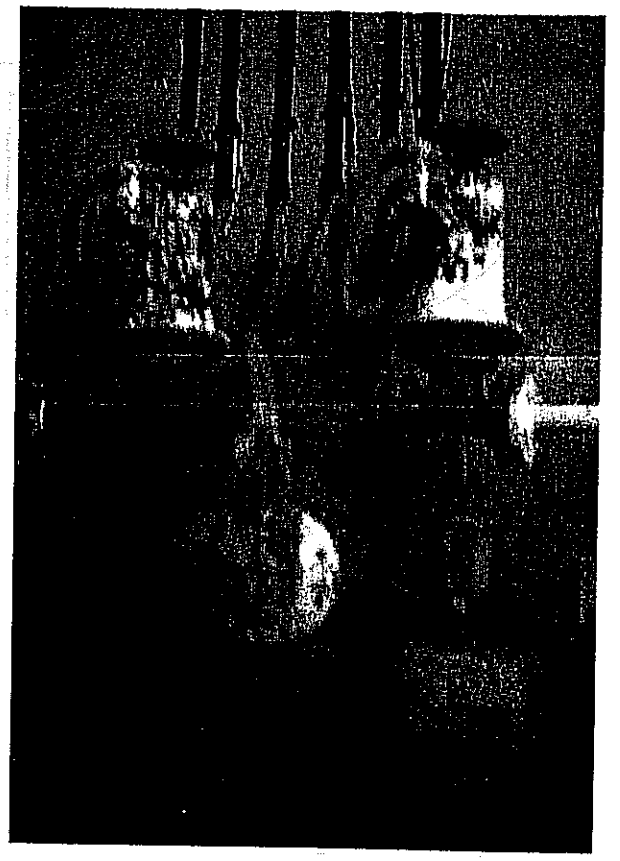


Figura 5.24. Té de mezcla.

Los reactivos se dosifican en esta corriente de agua y a esa disolución es cómo se hace la inyección definitiva en el colector principal.

En el caso de la dosificación de sulfúrico debe tenerse en cuenta la elevación de temperatura que se produce al mezclarse con el agua y construir dichos colectores o circuitos con materiales apropiados.

Para estas circunstancias es adecuada la ya citada Té de mezcla, construida en materiales resistentes como el teflón.

5.3.7. Mezcladores

Tienen por objeto provocar un movimiento turbulento en el flujo regular del agua a tratar que permita actuar a modo de agitador y garantice una completa y homogénea disolución del reactivo que se dosifica.

En principio puede servir cualquier dispositivo que suponga un obstáculo o irregularidad en la circulación del agua a tratar.

En las instalaciones pequeñas bastan con unos tramos de tubería de 1-1,5 metros de longitud y de mayor diámetro que la conducción principal. El simple ensanchamiento provoca un movimiento turbulento suficiente.

En colectores de mayor diámetro se colocan dispositivos con paletas que interrumpen el paso del agua o incluso llaves de compuerta de menor diámetro que al provocar un estrechamiento de la conducción generan un movimiento turbulento.

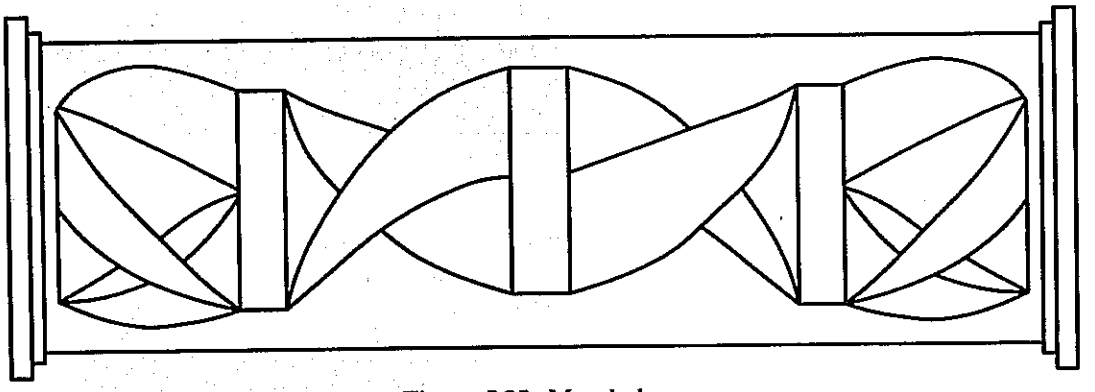


Figura 5.25. Mezclador.

5.3.8. Agitadores

Al igual que los anteriores se utilizan para garantizar una completa disolución del reactivo químico que se va a dosificar, con el agua del depósito en que se prepara o mezcla.

Están formados por una varilla metálica recubierta o no por algún producto resistente a la corrosión, en función de las características del reactivo que se va a disolver, que se hace girar mediante un motor situado en la parte superior de la mis-

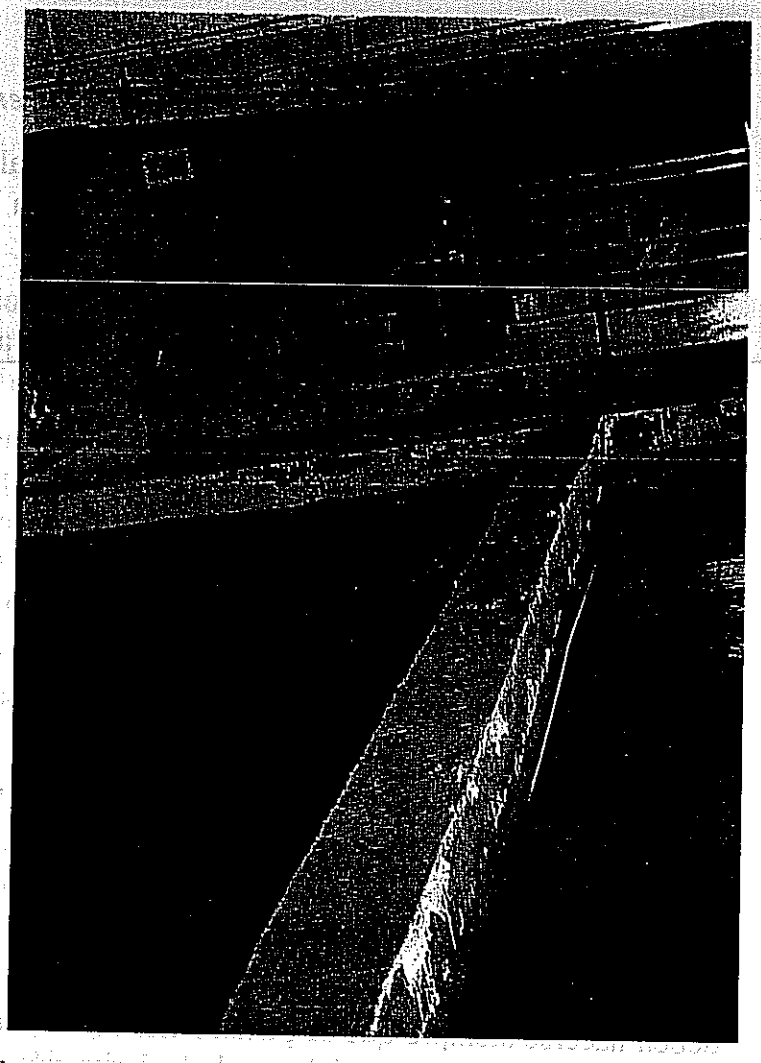


Figura 5.26. Agitador de varilla.

ma. Asimismo se colocan sobre una estructura soporte determinada para asegurar su anclaje e inmovilidad sobre el depósito en el que se coloca.

Las «varillas agitadoras» se colocan normalmente en los depósitos de preparación de los coagulantes poliméricos, el reductor, el antiincrustante, la cal, y cuando existen posibilidades como en los filtros abiertos en la entrada del agua a los mismos, para lo que se construye una cámara de homogeneización apropiada.

Para algunos productos como la cal es conveniente utilizar agitadores de dos velocidades o instalar un variador de velocidad que permite una velocidad rápida para la disolución inicial y otra más lenta para el mantenimiento de la solución.

5.4. Colectores

Deben permitir el transporte del agua a tratar desde el punto de captación hasta los bastidores, así como de los dos flujos que se originan tras el proceso, el producto hasta el depósito de almacenamiento y la salmuera al punto de vertido.

En el sentido de avance del agua los colectores más importantes son:

5.4.1. Baja presión

Conexión de la toma de agua hasta los filtros de arena

Puede tratarse de un colector único, o si la instalación es muy grande prever dos colectores de la mitad de la capacidad total, con lo que se obtiene una mayor seguridad para casos de avería.

Cuando la toma está constituida por varios pozos diseminados en la zona de captación, es conveniente colocar un colector único al que conectan mediante tramos cortos de menor diámetro las impulsiones de cada uno de los pozos.

A este colector se conectan los colectores de entrada y salida de cada uno de los filtros. En el caso de que se utilizasen dos colectores paralelos como se ha indicado anteriormente, dichos colectores deben estar conectados para poder realizar indistintamente el lavado de filtros a través de uno u otro colector. De esta forma se facilita el lavado de uno o más filtros sin necesidad de tener que parar la instalación.

Los colectores para el lavado de los filtros, tanto de aire como de agua, aunque son independientes, conectan también con éste a la salida de cada filtro.

En este colector se deben prever los puntos de inyección del hipoclorito, del sulfúrico y del coagulante, situados además en este orden.

También se conectará a este colector otro colector de by-pass que permita prescindir de los filtros. Asimismo, habrá que colocar alguno de los sistemas de mezcla descritos con anterioridad.

Las derivaciones de tuberías del colector principal que conducen agua de mar deben hacerse siempre que se pueda hacia arriba, cuando estas tuberías discurren horizontalmente y en especial cuando la derivación supone la existencia de válvulas, pues de esta forma se evitan zonas de estancamiento de agua que resultan altamente corrosivas.

Colector de filtros de arena a filtros de cartuchos

Es un colector sencillo o doble, como en el caso anterior, según se quiera o no dividir la instalación en dos bloques.

En este tramo se realiza la inyección de antiincrustante y debe preverse también la posibilidad de inyección de bisulfito sódico.

Colector de filtros de cartuchos a aspiración de turbobombas

En él se realiza la inyección del bisulfito, por lo que conviene que tenga un recorrido suficiente que permita la neutralización del cloro, así como algún codo que genere la turbulencia precisa para ello.

Con posterioridad al punto de inyección anterior debe preverse otro para la medida del potencial redox, que garantice la decloración del agua de alimentación a membranas.

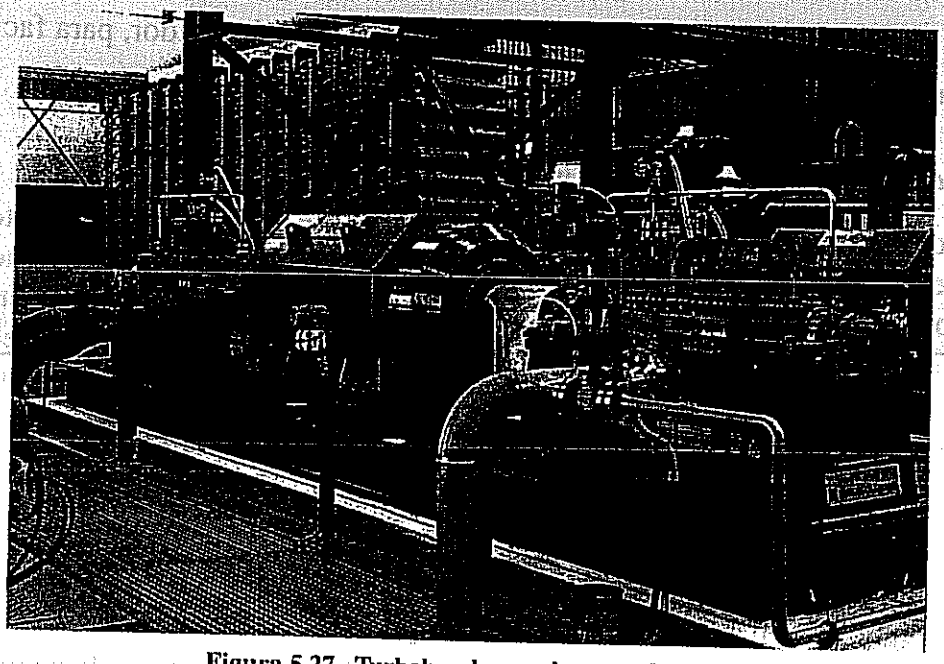


Figura 5.27. Turbobomba con by-pass de arranque.

En las instalaciones grandes se dota a este colector de un by-pass a drenaje que termina en una válvula motorizada. Su objeto es derivar el agua bruta cuando se produce alguna avería en las bombas o se quiere inspeccionar bastidores, para no tener que parar las bombas de captación de agua, que además implican la parada de todo el pretratamiento químico y su correspondiente regulación.

A la entrada de los colectores secundarios que van a la aspiración de cada bomba de alta presión, se conecta el colector que aporta el agua de desplazamiento para limpieza de bombas, en caso de parada prolongada de la instalación.

Este colector viene desde el depósito de desplazamiento si existiese, o del depósito de lavado de membranas que se utiliza en lugar del anterior.

5.4.2. Alta presión

Colector de bombas de alta presión a membranas

Se trata de colectores metálicos individuales conectando cada bomba con su correspondiente bastidor.

En caso de instalaciones muy grandes puede utilizarse un colector entre una bomba y dos bastidores. Este colector reparte el agua entre las diferentes tuberías secundarias que alimentan a cada grupo de membranas. Deben preverse tomas soldadas para conexión de los instrumentos de control precisos.

En caso de que se instale un equipo de alta presión de reserva, el colector de ésta debe interconectar con todos los restantes para que pueda reemplazar a cualquiera de las bombas.

Cuando la conexión entre turbina y motor se hace sin embrague, es decir de forma directa, es necesario además colocar un by-pass que conecte la tubería de

alimentación a membranas con la de salida de salmuera del bastidor, para facilitar el arranque.

Colector de retorno de salmuera a turbinas

Cuando la instalación lleva sistema de recuperación de energía, el colector de retorno de la salmuera procedente de cada uno de los bastidores hasta la entrada de la correspondiente turbina, también debe ser de estas características, y asimismo la turbina de reserva quedará conectada a todos los restantes colectores de retorno para que el grupo turbo-bomba pueda ser intercambiable con cualquier grupo de presión de la instalación.

Colectores múltiples

Son los que distribuyen el agua que debe alimentar a cada bastidor entre cada uno de los tubos de presión o membranas de que consta éste.

En la literatura anglosajona se les llama *«manifold»* y debe tener la acometida final a cada membrana fácilmente desmontable, pues en el curso de la operación de la instalación es frecuente tener que realizar cambios de membranas u operaciones para investigar su funcionamiento, que requieren acceder al tubo de presión.

Existen unos accesorios de unión conocidos como uniones Vic-taulic que solucionan rápidamente este problema.

Se trata de unas juntas de goma de alta resistencia que son las que están en contacto con el agua, que quedan aprisionadas entre dos anillos, generalmente de hierro galvanizado, por medio de tornillos.

Los tubos de acometida a cada membrana son de acero inoxidable y diámetro 1 ¼" en el caso de los tubos de presión de las membranas espirales y de 1" en el caso de los permeatos de fibra hueca, y llevan un rebaje en sus extremos para poder colocar las uniones vic-taulic.

En el caso de las membranas de fibra hueca es también frecuente hacer la conexión mediante mangueras flexibles de alta presión.

5.4.3. Mixtos

Son colectores en los que existen tuberías de alta y baja presión separados por la válvula correspondiente.

Se trata fundamentalmente de los colectores que constituyen el circuito hidráulico de lavado de membranas y en algunas instalaciones, según el diseño, los del circuito de desplazamiento.

Conectan por tanto el depósito de lavado de membranas, en el que se preparan los reactivos, con la tubería de alimentación a cada bastidor, y la tubería de salida de salmuera anterior a la turbina, con el retorno al citado depósito formando un conjunto cerrado que permita la recirculación del líquido de lavado.

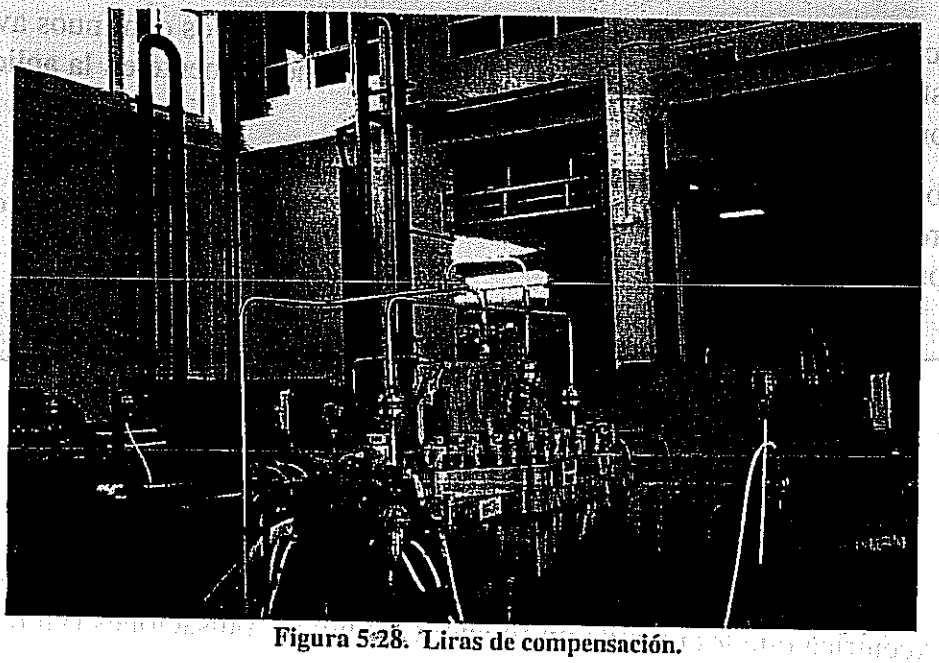


Figura 5.28. Liras de compensación.

Aunque es aconsejable que estos colectores sean fijos formando parte de la instalación, para automatizar la operación, en ocasiones para abaratar ésta, son móviles, utilizando tuberías flexibles que se conectan en los puntos de entrada y salida del bastidor solamente en el momento de realizar el lavado de éste.

Los colectores de desplazamiento conectan la bomba de desplazamiento con los colectores de alta presión a la entrada de los bastidores de membranas y/o con el colector de aspiración de las bombas de alta presión, con objeto de realizar también el desplazamiento del agua que queda estancada en las bombas y en los circuitos de alta presión correspondientes.

5.4.4. Colectores de salida de baja presión

Son los que realizan la recogida de permeados de los distintos tubos de presión para conducirlos, directamente o a través de los depósitos de compensación, al depósito general de almacenamiento.

También de este tipo es el colector de salmuera para vertido controlado. Conecta la salida de la válvula de aguja o la salida de la turbina con la arqueta o punto de vertido. En su último tramo se construye en forma de lira invertida hasta una altura ligeramente superior al bastidor, para evitar la descarga de éste en las paradas.

5.5. Equipos de alta presión

5.5.1. Bombas de alta presión

Como la ósmosis inversa permite la desalación tanto de aguas salobres como de mar y la presión osmótica que hay que vencer está relacionada con la salinidad del agua a tratar, las presiones de funcionamiento son muy variables, máxime si se

tiene en cuenta la gran variedad de membranas existentes y los continuos avances que se están consiguiendo en éstas, traducidos fundamentalmente en la aplicación de presiones cada vez menores.

Las bombas de proceso, conocidas genéricamente como de alta presión, que se utilizan responden fundamentalmente a dos tipos: bombas de desplazamiento positivo y bombas centrífugas.

Bombas de desplazamiento positivo

Hay dos tipos principales de estas bombas, las bombas horizontales helicoidales y las bombas de pistones.

Bombas helicoidales o de tornillo

Son bombas de desarrollo horizontal en las que el eje o rotor tiene forma de hélice excéntrica que les permite un funcionamiento sin pulsaciones (vibraciones) ni turbulencias.

Son autocebadas, rotativas, con solo dos elementos rotor y estator, que les confiere una gran sencillez. El rotor tiene sección circular. Su centro gira dos veces helicoidalmente en el sentido de la excentricidad, alrededor de su eje longitudinal. Por el contrario la sección transversal del estator describe en su movimiento longitudinal sólo un giro. Los diámetros, recorridos, pendientes y excentricidad varían en función del tamaño de la bomba.

En sección transversal estator y rotor contactan en dos puntos, que vistos axialmente son líneas de contacto.

Cuando el rotor gira, esta simetría determina unas cámaras en tandem y lo mismo ocurre cuando están paradas.

El número de compartimentos cerrados o etapas corresponde al número completo de giros de la sección del estator. Al moverse el rotor las cámaras giran helicoidalmente en dirección axial.

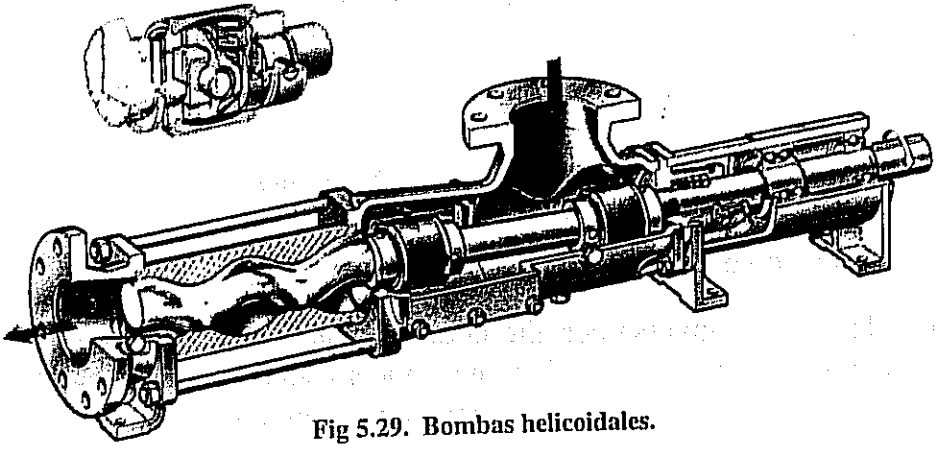


Fig 5.29. Bombas helicoidales.

Los orificios de entrada y salida y el total de la sección transversal del compartimento tienen siempre la misma superficie. Esta es la razón de que tengan un flujo continuo y casi sin pulsaciones.

Para altas presiones de 70 bares y capacidades de hasta 14 m^3/h sus velocidades de funcionamiento son bajas, 800 rpm, mientras que para caudales pequeños de 1-3 m^3/h las velocidades son de 2.000-2.500 rpm.

Las eficiencias para estas altas presiones son comparativamente bajas en relación con otras bombas, pero son muy seguras en su funcionamiento y fáciles de mantenimiento.

Aunque pueden tener capacidades de hasta 250 m^3/h y 80 bares, su mayor aplicación está en caudales y presiones medias, de hasta 40 kg/cm^2, es decir aguas de salinidades medias y membranas de media presión, incluidas las de acetato de celulosa.

Bombas de pistones

Son bombas muy robustas y con una alta eficiencia hidráulica teórica del 90 %, tanto para bombas grandes como pequeñas, derivada de una eficiencia volumétrica del 100 %. En la practica esta eficiencia es algo inferior: 86-88 %.

Aunque según fabricantes sus caudales pueden variar desde valores tan pequeños como 3 m^3/h hasta unos 100 m^3/h y presiones entre los 20 kg/cm^2 y los 80 Kg/cm^2 que pueden precisarse en algunas instalaciones de agua de mar, su campo de aplicación está claramente en las instalaciones medianas y sobre todo pequeñas tipo «monoblock» o «kit».

Debido a estos elevados rendimientos se ha intentado su introducción en instalaciones de mayor tamaño, aunque los resultados de funcionamiento no son tan favorables, por los mayores problemas mecánicos que presentan.

La abrasión es mayor que en las centrífugas, por lo que con el tiempo disminuye su eficiencia y prácticamente se igualan las eficiencias. Estas circunstancias y

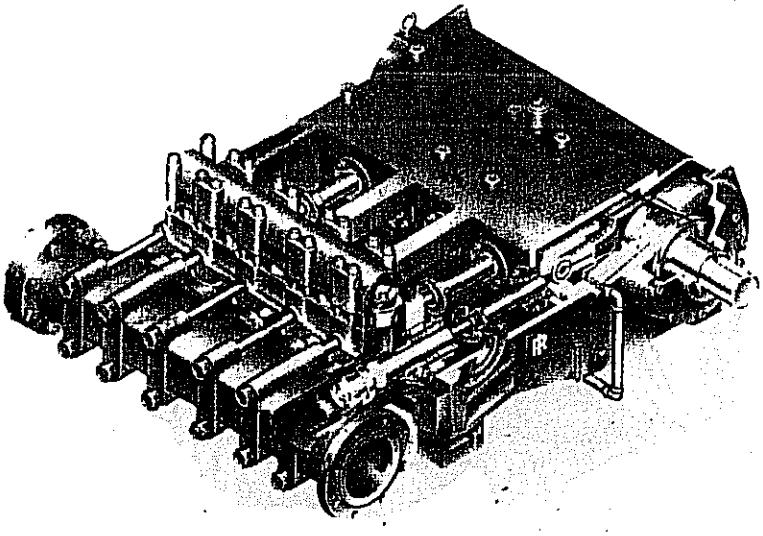


Figura 5.30. Bomba de pistones.

las dificultades de fabricación con aceros especiales las ha relegado a un segundo plano en las grandes instalaciones de ósmosis inversa.

Tienen vibraciones importantes, por lo que se instalan con amortiguadores de vibraciones tanto en la aspiración como en la impulsión.

No pueden tampoco funcionar a válvula cerrada, por el riesgo de que se produzcan sobrepresiones que pueden romper la instalación y provocar accidentes, por lo que también precisan en la impulsión de válvulas de seguridad.

Bombas centrífugas

Hay también de varios tipos pudiendo establecer una primera diferenciación entre bombas simples o de un rodete, y bombas multietápicas o de varios rodetes.

Bombas simples

Producen la elevación de presión con un solo rodete o impulsor, alojado en una carcasa circular.

Este tipo de bombas muy sencillas y fáciles de funcionamiento y mantenimiento, tienen una flexibilidad relativamente pequeña para adaptarse a variaciones de presión y caudal, que se consigue variando el diámetro del rodete o recortando ligeramente los bordes del mismo. Sin embargo, esta modificación no permite sino ligeras variaciones en torno al 3-6 %.

Otra posibilidad es su sobredimensionamiento y actuar sobre la válvula de control para producir la pérdida de carga necesaria, con la consiguiente pérdida de rendimiento energético.

Pueden utilizarse hasta presiones de 30-40 kg/cm^2, aunque su eficiencia no es elevada. Su aplicación es principalmente para instalaciones de agua salobre, en sitios aislados, en los que se sacrifica aquélla en beneficio de la seguridad y facilidad de funcionamiento.

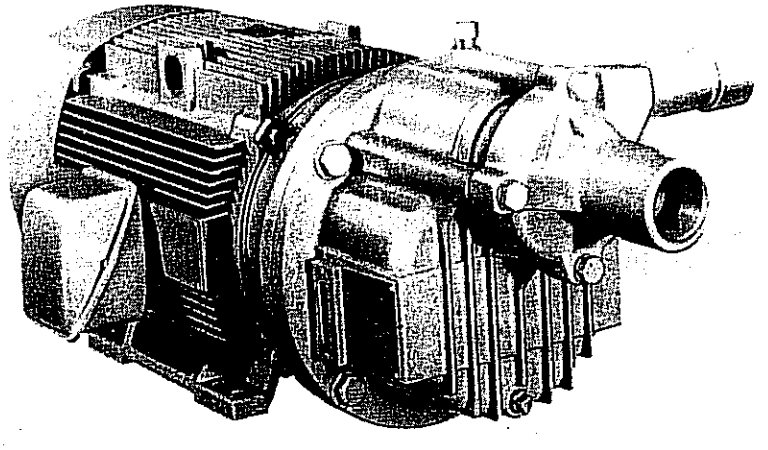


Figura 5.31. Bomba centrífuga simple.

Bomba de chorro

Dentro de los desarrollos últimos que se están realizando en cuanto a las bombas centrífugas para alta presión, tratando de facilitar el mantenimiento y conseguir una bomba poco susceptible a averías, puede también citarse la conocida como bomba de chorro.

Se trata de una bomba simple, de diseño compacto y poco ruidosa, de funcionamiento estable, que no precisa de amortiguadores de pulsaciones ni válvulas de seguridad.

No se gripa cuando gira en vacío por pérdida de succión o si funciona con la válvula de descarga cerrada.

Necesita sin embargo un caudal continuo en by-pass, cuando opera a caudal muy bajo, para evitar su calentamiento y fallos en los cierres.

Dado su pequeño tamaño, funciona a velocidades elevadas, por encima de 4.000 rpm y su eficiencia máxima está en torno al 62 %, con valores más frecuentes de uso entre 50 y 60 %.

Es una bomba muy sencilla y fiable con capacidades de hasta 100 m^3/h y presiones de 45 a 75 kg/cm^2. Consta de dos partes principales, una caja giratoria y un tubo colector fijo dentro del rotor.

El líquido entra en la bomba y pasa a la caja giratoria en la que aumenta su velocidad, y en la que se establecen zonas de alta y baja presión. La fuerza centrífuga obliga al líquido a entrar en el rotor a presión. La energía de la velocidad se convierte en el rotor en una presión adicional cuando penetra en el tubo colector fijo, por el que sale impulsado a presiones elevadas.

La simplicidad de esta bombas, de una etapa, sin espacios muertos, holguras o anillos de desgaste, reduce el mantenimiento que se limita al cambio del sello mecánico.

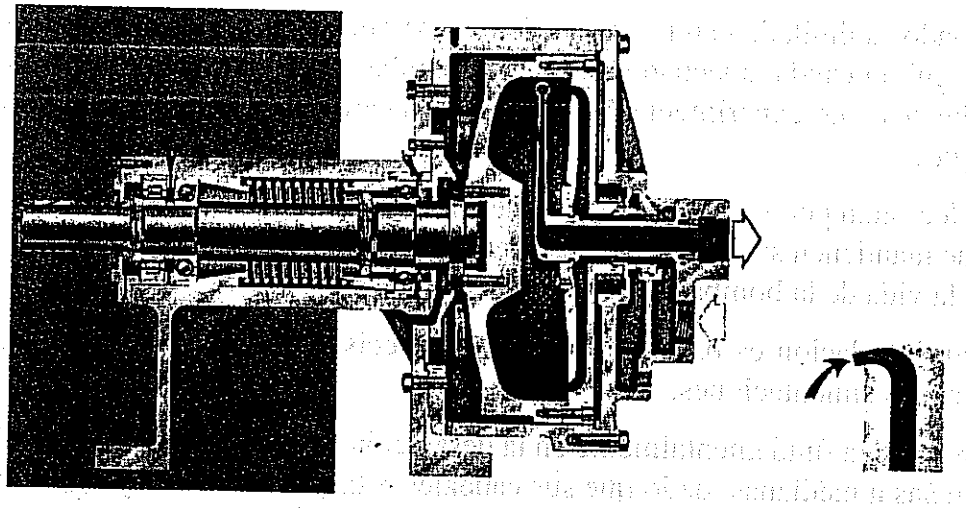


Figura 5.32. Bomba de chorro.

La amplia gama de condiciones de funcionamiento con un simple cambio de partes intercambiables, reduce el inventario de repuestos y ofrece la posibilidad de introducir cambios importantes en los parámetros de funcionamiento del equipo.

Trata de sustituir a las bombas de pistones, proporcionando un servicio sin averías y una operación más duradera, al evitar el desgaste de las bombas de pistones como consecuencia de las escasas holguras disponibles.

Bombas multietápicas o multicelulares

Entre las de varios impulsores podemos establecer una primera separación entre bombas horizontales o verticales.

Pero dentro de las primeras tendríamos asimismo las bombas de segmentos, las de cámara partida y las tipo «booster».

Bombas Booster. Son bombas centrífugas multietápicas, de desarrollo horizontal, alojadas en un barril y provistas de diferentes etapas o impulsores que se van agregando en función de la presión requerida.

Su diámetro es relativamente pequeño, con impulsores estrechos, que permiten aumentar las eficiencias para caudales pequeños, frente a las que se obtendrían con bombas centrífugas normales. Con este desarrollo se trata de aproximar a las características de eficiencia de las bombas de pistones, salvando los inconvenientes que tienen éstas como las pulsaciones o vibraciones, poca flexibilidad en cuanto a caudales y presiones, y vida relativamente corta.

El diseño centrífugo elimina el desgaste asociado con las pequeñas tolerancias de las bombas de desplazamiento positivo, permitiendo obtener un flujo continuo y estable, dependiente del número de etapas, sin pulsaciones y con mínimo ruido y desgaste.

Ello requiere un equilibrio hidráulico radial que se consigue con impulsores precisos y difusores de flujo dirigidos, que distribuyen el caudal y equilibran la carga radial en los impulsores, cojinetes y ejes. Además, su bajo NPSH elimina el desequilibrio y los daños por cavitación.

Dado su limitado caudal, se pueden utilizar dos o más bombas en paralelo para conseguir el caudal adecuado, pues estas bombas tienen curvas de funcionamiento pendientes y no experimentan las variaciones características de otras bombas centrífugas.

Necesitan poco mantenimiento pues llevan pocas partes sujetas a desgaste, por lo que mantienen sus características de funcionamiento prácticamente a lo largo de toda la vida de la bomba.

Su instalación es bastante sencilla, no precisando alineación en el campo, ni especiales cimentaciones.

Se utiliza fundamentalmente en la desalación de aguas salobres e instalaciones pequeñas a medianas, dado que sus caudales están entre los 0,5 y los 50 m^3/h con presiones no superiores a 40 kg/cm^2.

Su mayor inconveniente es su relativamente baja eficiencia, pues aunque ésta depende de la capacidad de la bomba y además existen diversos tipos, sus mejores prestaciones apenas superan eficiencias del 65 %.

Dentro de estas capacidades podemos establecer los siguientes rendimientos:

- Hasta 14 m³/h, eficiencia: 45-55 %.
- 20-25 m³/h, eficiencia: 55-60 %.
- 40-50 m³/h, eficiencia: 65-68%.

La curva de eficiencias es en cambio muy tendida, lo que indica que aceptan variaciones importantes de caudal con pequeños descensos de eficiencia, cosa que no ocurre con las bombas de pistón, menos flexibles en cuanto a caudal.

Bombas multicelulares de segmentos. Las bombas de segmentos están constituidas por módulos hidráulicos en forma de aros relativamente estrechos. Cada módulo costa de un impulsor, un difusor de varias hojas y un anillo para permitir el paso de varillas o tornillos.

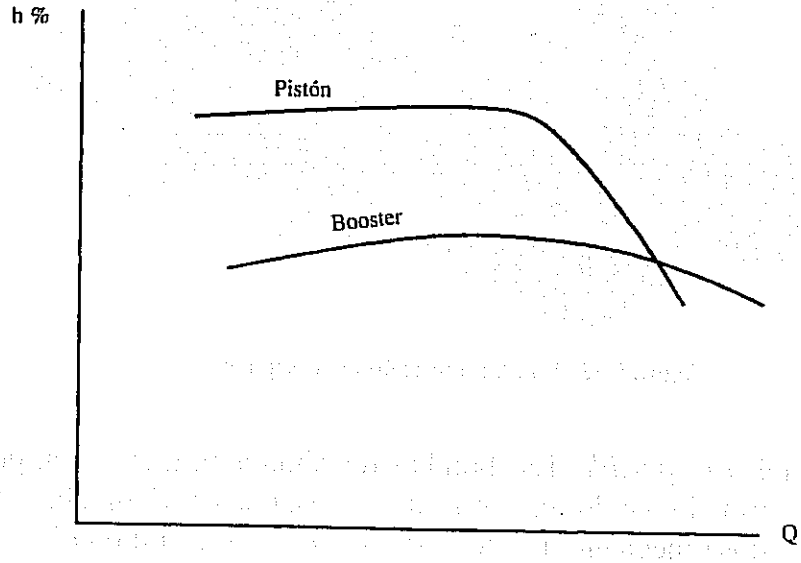


Figura 5.33. Curvas de eficiencia de bombas de pistón y booster.

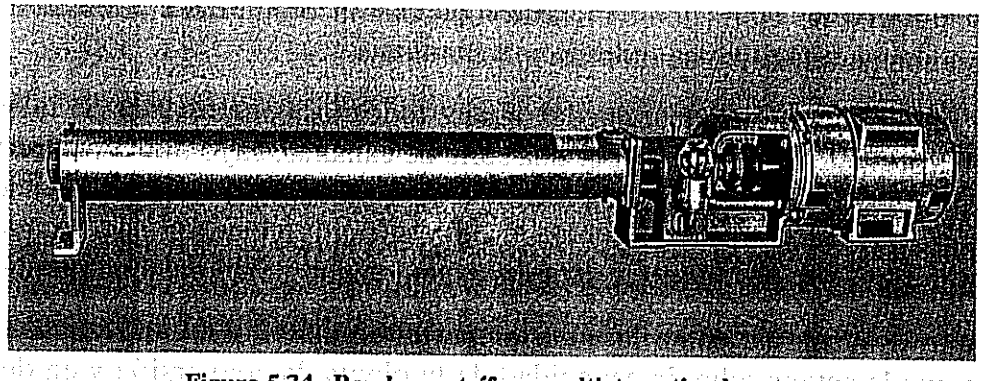


Figura 5.34. Bomba centrífuga multietapa tipo booster.

A través de estos, cuatro largos pernos sujetan estos módulos entre las cajas interior y exterior. El número de módulos se varía para ajustar la presión de la bomba. Además se pueden instalar en cada módulo una serie de combinaciones impulsor/difusor.

Pueden adaptarse por tanto a una amplia gama de presiones y caudales, pero el número de anillos se incrementa de forma considerable, especialmente al aumentar la presión, por lo que ocupan bastante espacio.

Todos los impulsores se colocan en la misma dirección con lo que existe un cierto esfuerzo axial que actúa sobre el eje. Para absorberlo, se coloca un cojinete de empuje con lubricación integral por agua. En consecuencia los cojinetes exteriores soportan pequeñas cargas y requieren poco mantenimiento.

Sin embargo éste o la reparación de averías resultan incómodos puesto que se requiere desconectar la bomba de las tuberías y desmontarla completamente.

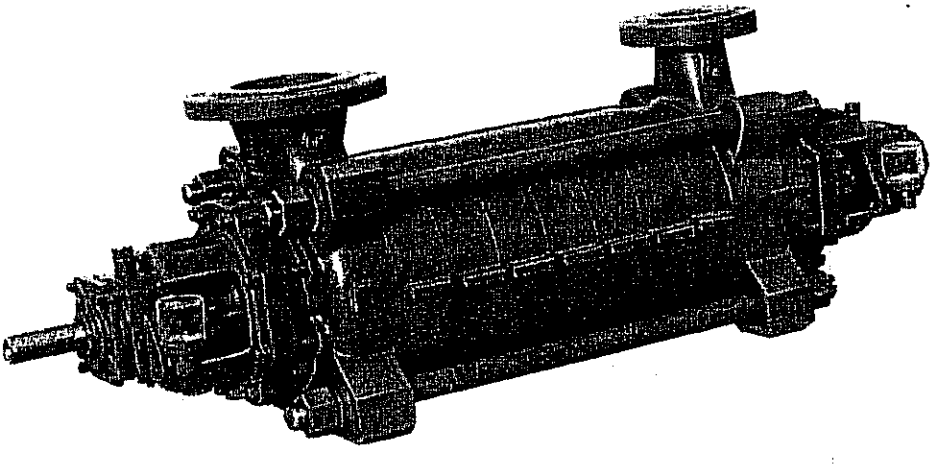


Figura 5.35. Bomba multicelular de segmentos.

Bombas de cámara partida. Las bombas de cámara partida tienen por el contrario el cuerpo formado por dos carcasas que se disponen horizontalmente una sobre la otra, uniéndose mediante una serie de pasadores o tornillo colocados verticalmente, con tuercas en la parte superior.

Las tuberías de aspiración e impulsión quedan incorporadas a la mitad inferior de la bomba para facilitar su montaje y desmontaje.

Al retirar la parte superior quedan al aire todos los componentes de la bomba, que interiormente está formada por una serie de cámaras, cuyo número depende de la presión requerida, en las que giran sendos impulsores distribuidos simétricamente respecto al centro de la bomba y colocados en oposición para asegurar su equilibrio. Son bombas robustas, de gran estanqueidad y fácil mantenimiento.

Tanto esta bomba como la anterior permiten añadir o quitar etapas con lo que se puede actuar sobre la capacidad de la planta, la conversión y en definiti-

va el consumo energético. Su utilización es interesante para caudales a partir de 100 m^3/h.

Las mayores aplicaciones están en caudales superiores a 200 m^3/h en bombas y en 100 m^3/h en turbinas, con rendimientos del 80 al 85 % en las primeras y del 70 al 80 % en las segundas.

De rendimientos equivalentes a las de segmentos, ya que se trata de dos concepciones diferentes de un modelo único de bombas, las principales diferencias se encuentran en la facilidad de acceso al interior de las bombas lo que permite un mantenimiento sin problemas. Además el menor número de piezas a unir facilita también su montaje y desmontaje.

Su mayor inconveniente lo constituye el precio, pues al no ser un diseño específico de instalaciones desaladoras, incorpora una serie de elementos de seguridad importantes cuando se trabaja a muy elevadas presiones y líquidos calientes que no resultan tan necesarios para la ósmosis inversa.

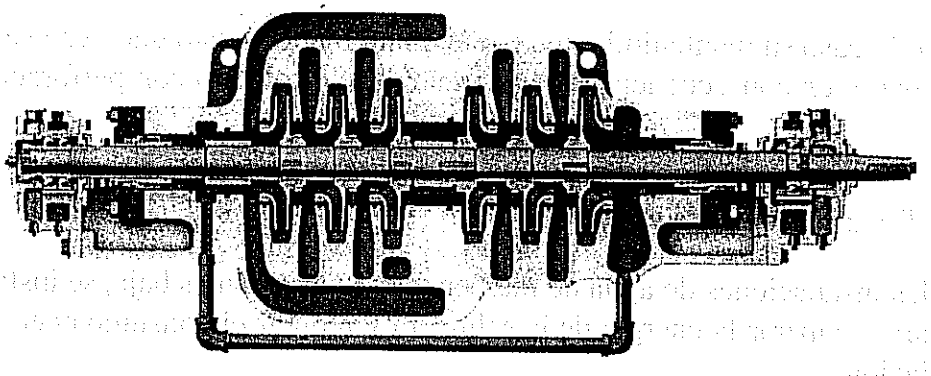


Figura 5.36. Bomba multietapa de cámara partida.

Bombas verticales. Son bombas centrífugas dispuestas en posición vertical, provistas de una serie de rodetes parecidos a los de las bombas sumergidas aunque la concepción es distinta.

La bomba con sus diferentes rodetes va encerrada en un barril estanco y tanto la aspiración como la impulsión se realiza mediante unas tuberías colocadas en la parte superior de la bomba.

Sus mayores eficiencias son para caudales elevados, pero a medida que aumenta el caudal y la presión de la bomba se requieren más módulos y por tanto aumenta la longitud de la misma, que puede llegar a 3,5-4 m.

Esto supone que la instalación de este tipo de bombas exige la construcción de unos pozos o depósitos en los que se aloja la bomba, para que tanto la tubería de aspiración como la de impulsión estén a nivel del suelo, del que sobresale la parte superior de la bomba y el motor.

Figura 5.37. Bomba vertical.

En todo caso su mantenimiento resulta complicado puesto que debe ser extraída del pozo y en consecuencia se requieren edificios altos o con perforaciones en el techo.

5.5.2. Recuperación de energía

En las instalaciones de agua de mar, cuya recuperación es baja, se instalan turbinas para recuperar la energía de la salmuera y reducir el consumo energético de la instalación.

Debe disponerse por tanto de un colector de alta presión para transportar el rechazo del bastidor hasta la turbina, en cuyo recorrido es imprescindible la instalación de una válvula de retención.

Los tipos más frecuentes de turbinas que encontramos en las instalaciones son las bombas multietápicas funcionando de forma invertida y las turbinas Pelton.

Bombas invertidas. La disposición de las primeras se hace para que la salmuera entre por la tubería, dé impulsión de ésta y salga por su aspiración. El rechazo a elevada presión hace girar la bomba en sentido contrario al normal, obteniéndose la misma eficiencia que en funcionamiento regular. La potencia que se recupera puede transmitirse al eje del motor del conjunto de alta presión, que será por tanto de menor potencia que si no se dispusiera de la turbina. La conexión de la turbina al motor se hace directamente o a través de un embrague.

En el primer caso se requiere una tubería de by-pass para producir la aceleración de la turbina en el arranque del bastidor, hasta que alcanza su régimen normal de funcionamiento.

La velocidad de giro de las turbinas, al igual que la de las bombas de alta presión suele ser de unas 3.000 rpm.

Turbinas Pelton

Realizan el mismo cometido que las bombas invertidas, pero su eficiencia suele ser superior, aunque para grandes tamaños se requiere un diseño muy afinado para evitar averías y pérdidas de eficiencia que se producen por desgastes del eje y las cazoletas de la rueda de la turbina.

Este tipo de turbina de impulsión utiliza una rueda giratoria para convertir la energía potencial de un líquido a presión en energía cinética, en la forma de un chorro de líquido a alta velocidad.

Una boquilla dirige el chorro de líquido tangencialmente a una rueda de la turbina especialmente diseñada, la cual transforma la energía cinética del chorro en energía mecánica rotativa y descarga el líquido a la presión atmosférica.

La base del sistema es esta boquilla de la que emerge el agua como un chorro compacto que entra en la rueda. En el borde de ésta aparecen distribuidas hojas en forma de cazoletas que para conseguir una descarga mejor del agua aparecen divididas por un borde o repartidor en dos partes simétricas. El chorro de agua es desviado por el cubo y transfiere su energía a la rueda.

Las turbinas Pelton se regulan aumentando o disminuyendo el diámetro del chorro, lo que se realiza por medio de una aguja que cierra o abre la apertura de la boquilla. Sus eficiencias son superiores al 85 % para variaciones desde el 50 al 120 % de la capacidad a plena carga.

No existe el requerimento de contrapresión de las turbinas de reacción, que puede reducir la recuperación de energía en un 7 %. Es ideal para aplicaciones con una amplia variación de caudal.

La turbina puede disponer de una válvula de aguja ajustable que es activada con un servomotor neumático o hidráulico o un dispositivo eléctrico. Los actuadores pueden ajustarse con un controlador que se programa en función del caudal que entra o de la demanda del sistema.

La simplicidad de las máquinas facilita su manutención. Las únicas partes que se desgastan son la válvula de aguja y el asiento, así como el rodete y los cojinetes que son estándar. Las turbinas pueden tener una o más boquillas.

En todos los casos hay que asegurarse que la máquina se instala de forma que la descarga sea libre por gravedad. Cuando esto resulta imposible pueden efectuarse adaptaciones.

La aplicación de las turbinas Pelton a las instalacionés de desalación de O.I., proviene de la experiencia adquirida con dichas turbinas, pero de grandes dimensiones en las centrales hidroeléctricas.

Esta adaptación exige fundamentalmente un trabajo concienzudo de diseño y la aplicación de tecnologías de fundición de gran precisión para fabricar un alto acabado en las superficies y una precisión necesaria para mantener la alta eficiencia en las unidades pequeñas. Asimismo los materiales a emplear deben ser muy resistentes a la corrosión y a la erosión por cavitación.

La curva de eficiencias de la turbina Pelton es muy plana, lo que significa que ésta prácticamente se mantiene, con pequeñas variaciones del 5 %, para grandes variaciones del caudal en torno al punto de mayor eficiencia.

La turbina Pelton se conecta directamente al eje del motor y no precisa del embrague citado anteriormente.

En las instalaciones pequeñas con recuperación de energía el sistema normal debe ser bomba multietapa-turbina Pelton, mientras que en las instalaciones mayores, a partir de 2.000 m^3/día se usan tanto las anteriores como el sistema bomba-bomba invertida.

También se puede utilizar la turbina Pelton junto con una bomba de alta presión de desplazamiento positivo, no así la bomba invertida.

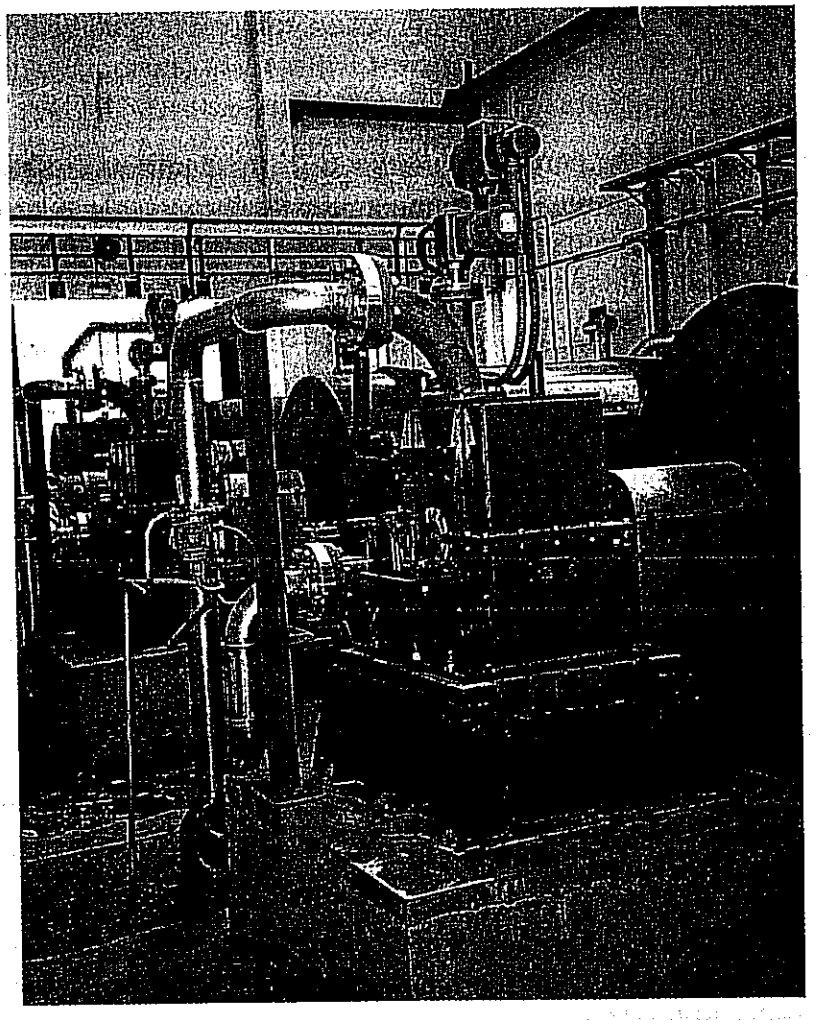


Figura 5.38. Turbina Pelton.

Turbinas verticales

Al igual que en las otras bombas ya citadas, las bombas verticales pueden incorporar una turbina de recuperación.

La turbina consta de otra serie de impulsores o rodetes, alojados en otro cuerpo distinto del de la bomba, que se dispone en la parte superior de la misma, y que tiene el eje de giro común con ella.

Incluso existen bombas en que la turbina superior es del tipo Pelton.

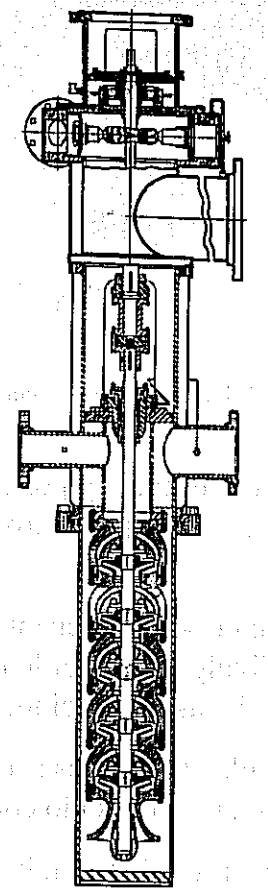


Figura 5.39. Bomba-turbina vertical.

5.5.3. Equipos especiales o compactos

Tratando de abaratar costes y reducir el consumo energético se han desarrollado otros equipos que generalmente tratan de integrar en una unidad más compacta la bomba y la turbina. El más antiguo conocido como sistema TPMDX fué desarrollado por la casa Guinard.

En esencia consisten en una bomba y turbina centrífugas, colocadas de forma inversa en el interior de una carcasa común y provistas de un eje único. Su tamaño es muy inferior al que ocuparían ambos elementos de la misma capacidad, colocados de forma independiente.

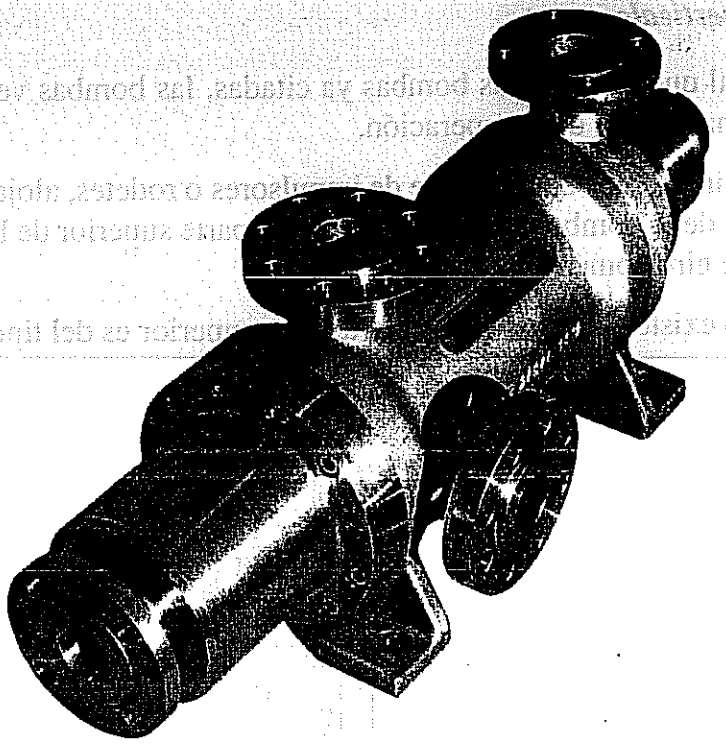


Figura 5.40. Turbobomba compacta.

Son equipos que ocupan menor espacio y por ello, para impulsar grandes volúmenes, son más revolucionados, 6.000 rpm, pero su eficiencia no es tan elevada como se esperaba.

Su dificultad de mantenimiento y las frecuentes averías a causa de su elevada velocidad no han facilitado su divulgación, por lo que tras unos inicios prometedores no se han instalado en demasiadas instalaciones.

Siguiendo un principio similar se ha desarrollado otro equipo de parecidas prestaciones y mucho menor tamaño, conocido como Turbo-charger.

Combina también en una sola unidad bomba y turbina, pero al contrario de otras turbinas de recuperación que transforman la energía de presión o velocidad en energía mecánica que a través de un eje se aprovecha para ayudar a una bomba o un motor, este dispositivo lo que hace es transferir la energía de una corriente de líquido a otra corriente de líquido distinto.

No está por tanto unido a ningún motor como las otras turbinas y por ello puede aplicarse en distintos puntos del circuito de una instalación de ósmosis. Consta de una sección de bomba y otra de turbina, provistas cada una de un impulsor y compartiendo un eje común.

El impulsor de la turbina extrae la energía hidráulica de la salmuera y la convierte en energía mecánica que es aprovechada por el impulsor de la bomba para elevar la presión del agua de alimentación. Con este equipo puede eliminarse la válvula de control de la salmuera.

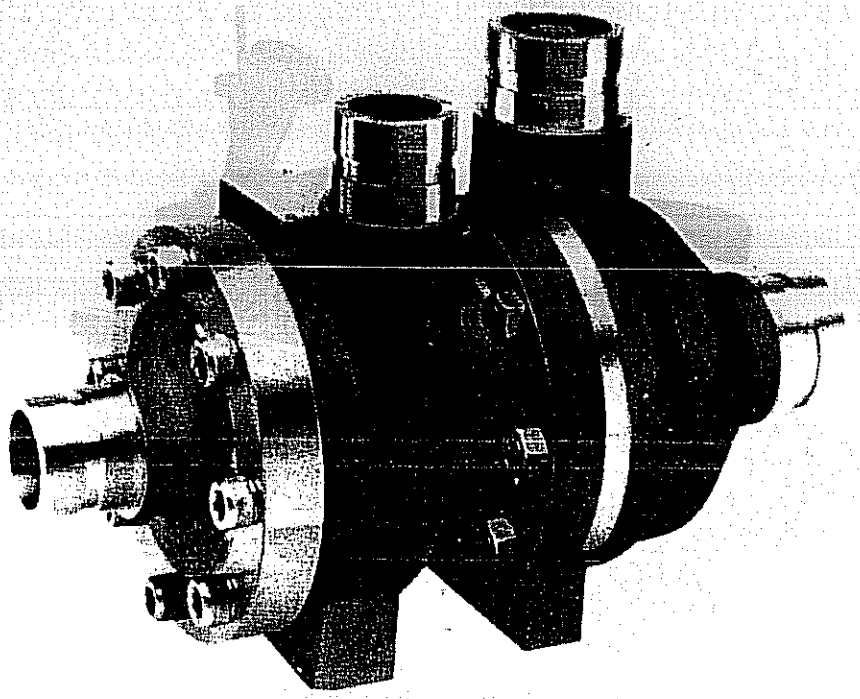


Figura 5.41. Turbo-charger.

El turbo tiene tres cojinetes todos ellos lubricados por agua. Los cojinetes de la bomba y central son del tipo enchufe. El giro del rotor produce unos gradientes de presión que proporcionan el caudal suficiente a través de las holguras de los cojinetes, para su lubricación y enfriamiento.

El cojinete de empuje es del tipo hidrostático, utilizando agua a alta presión procedente de la aspiración de la bomba. Generalmente estos cojinetes son de cerámica maciza.

El eje no precisa de cierres puesto que todo él está en el interior de la turbobomba.

Para regular el caudal de salmuera y la presión está provisto de dos inyectores y una válvula de control, lo que evita el by-pass o la válvula de desahogo.

De esta forma se aprovecha completamente el caudal de salmuera a presión, ya que si éste es el esperado, entra directamente en la turbina por la boquilla principal, mientras que si es superior, la válvula de la boquilla auxiliar se abre y deja pasar una parte del mismo, que a través de dicha boquilla entra en la turbina por otro punto.

El arranque de la instalación se realiza como si no se dispusiera de turbina de recuperación. La válvula auxiliar de control de la salmuera se maneja como una válvula normal de control de presión de la salmuera, para aliviar la carga de arranque de la bomba, y durante la operación, para controlar el caudal y presión de la salmuera.

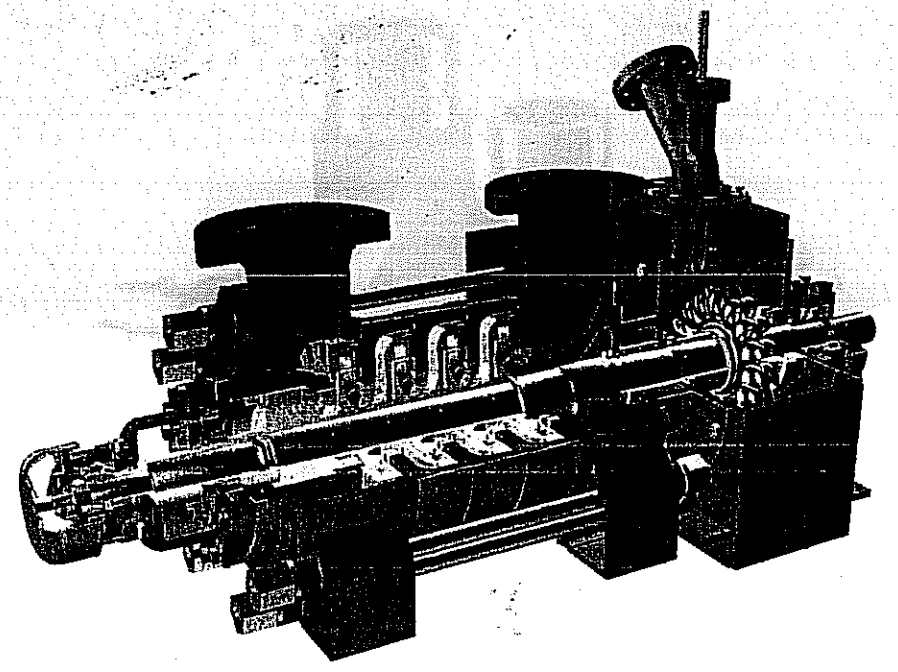


Figura 5.42. Turbomba integrada.

El equipo resulta especialmente adecuado para instalaciones de pequeña capacidad.

Turbobomba integrada

Más recientemente se ha introducido en el mercado un nuevo equipo que trata de incorporar bomba y turbina en un mismo bloque. Al contrario del que se ha citado anteriormente, la bomba que utiliza es una tradicional multietapa en funcionamiento normal de 3000 rpm y sobre el mismo eje sitúa una turbina tipo Pelton.

5.6. Bastidores de ósmosis inversa

Están constituidos por una estructura metálica sobre la que se colocan los distintos tubos de presión, con sus correspondientes membranas, debidamente sujetos para evitar posibles desplazamientos como consecuencia de los golpes de ariete que se producen en los arranques de la instalación.

Al aumentar la capacidad del bastidor la altura del mismo también lo hace, por lo que pueden resultar incómodas algunas operaciones de manipulación. Debe estudiarse por tanto la distribución adecuada de los tubos de presión para evitar alturas innecesarias. Sobre estos bastidores se sujetan también tanto los colectores de alta presión de alimentación y rechazo, como los de baja presión de agua producto.

En la parte superior de todos ellos es conveniente disponer de llaves de purga para la eliminación del aire en los arranques de la instalación.

Como ésta es la parte de la instalación en que se producen las fugas de agua más frecuentes, es conveniente colocar debajo de cada fila de tubos de presión una canaleta, fijada al bastidor, para recoger los correspondientes goteos y conducirlos al drenaje general.

La separación entre bastidores debe ser suficiente para poder realizar trabajos de manutención entre ellos. Asimismo entre los extremos anterior y posterior de los bastidores y las paredes inmediatas más próximas debe existir una distancia de al menos 2 m en tubos de presión de 6 membranas y 3 metros en los de siete, para facilitar tanto la instalación de los tubos como la de membranas.

En los bastidores muy altos, tanto en su parte frontal como trasera, para facilitar los trabajos se puede colocar una plataforma sujeta del techo que permita tanto su desplazamiento lateral como de arriba hacia abajo.

En las figuras que siguen pueden verse distintos bastidores para membranas, tanto de fibra hueca como de arrollamiento en espiral. Generalmente, todos los tubos y membranas de una línea de producción se agrupan en un solo bastidor, aunque se trate de dos o tres etapas.

Sin embargo cuando existe un segundo tratamiento de afino que procesa el producto del primer paso se colocan dos o más bastidores independientes, cuyo tamaño va lógicamente en disminución.

Como las membranas tienen conductos para el producto y la salmuera abiertos en ambos extremos, los colectores de uno y otro tipo pueden colocarse a conveniencia tanto por su parte frontal como trasera.

Es conveniente colocar en la salida de cada membrana individual, en el caso de los bastidores con membranas de fibra hueca, y en la de cada tubo de presión, en

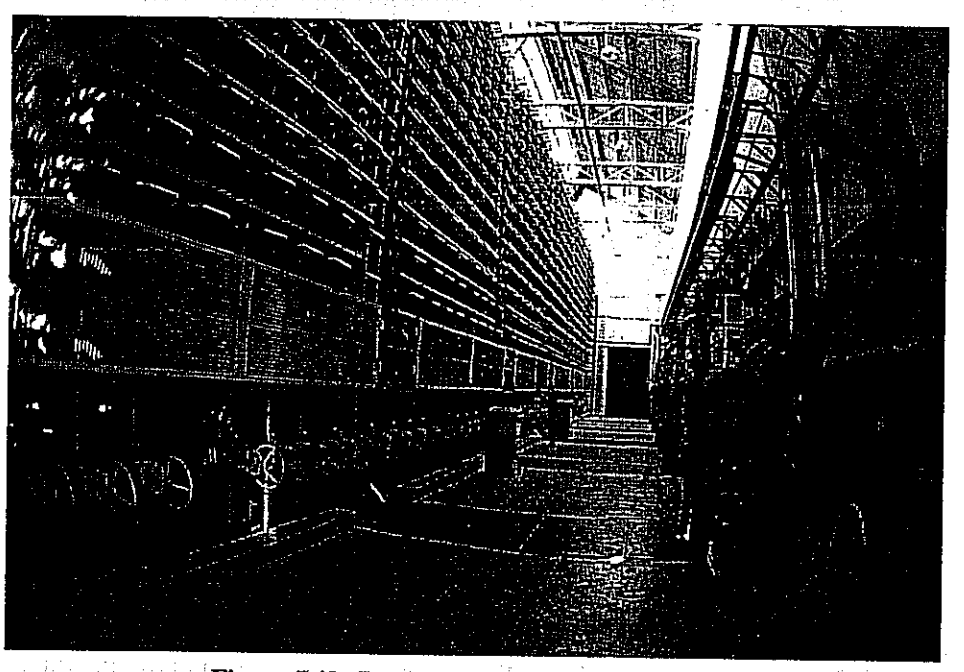


Figura 5.43. Bastidores membranas espirales.

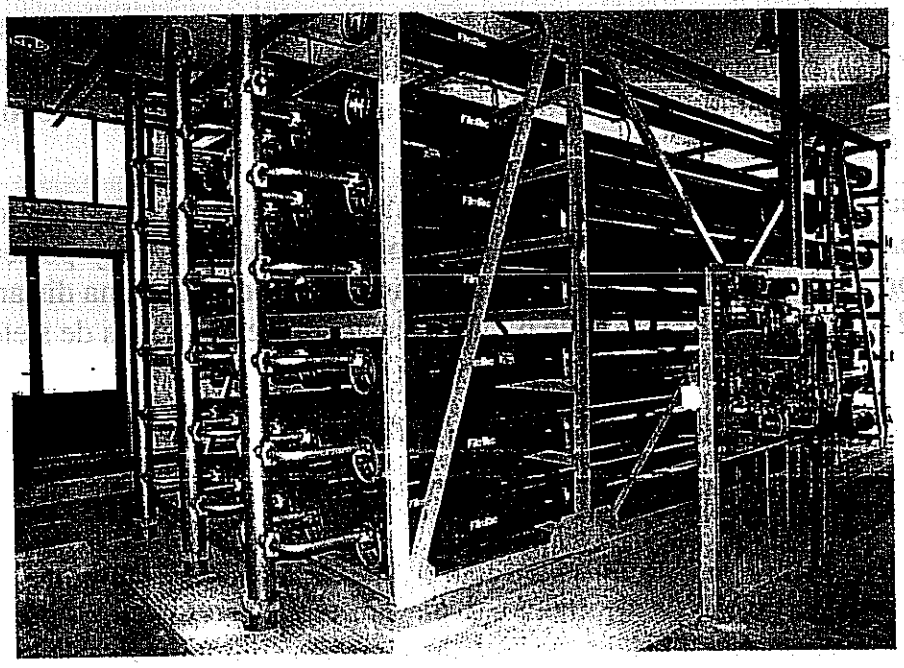


Figura 5.44. Bastidores membranas con arrollamiento en espiral.

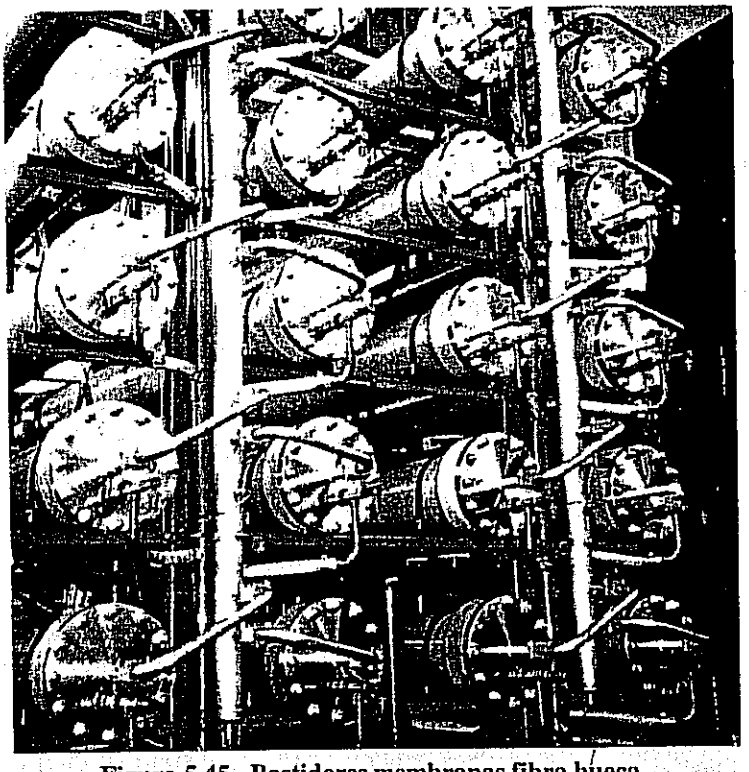


Figura 5.45. Bastidores membranas fibra hueca.

los de membranas en espiral, una conexión con tubo muy fino que permita realizar la correspondiente toma de muestras periódicamente.

Los distintos «tubitos» del conjunto del bastidor se conducen a un panel de toma de muestras, provisto de un conductivímetro en el que se disponen válvulas que permiten controlar la calidad del agua producto en cada instante y detectar cual o cuales son las membranas defectuosas cuya excesiva salinidad afecta a la salinidad media del conjunto.

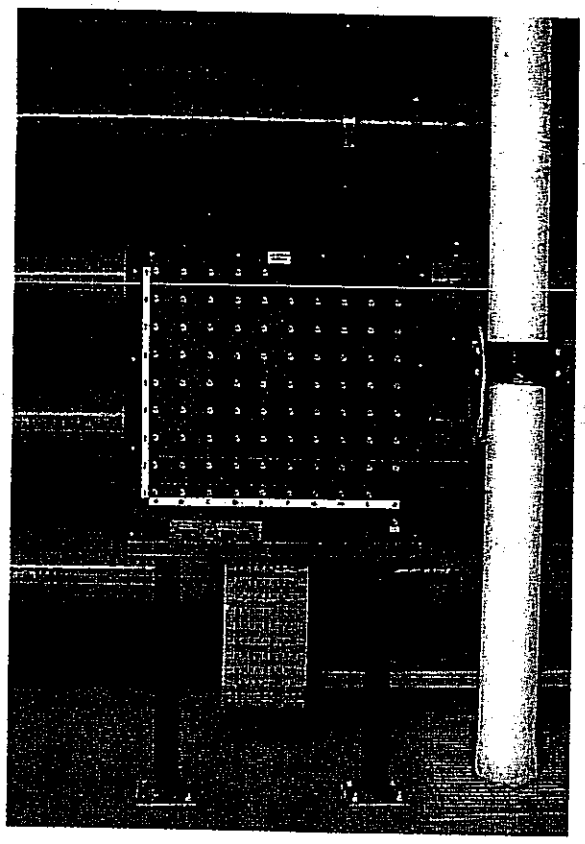


Figura 5.46. Panel de toma de muestras.

5.7. Depósito de equilibrio osmótico

Las membranas separadoras tienen hasta un 60 % de agua en su composición, por lo que deben estar permanentemente húmedas.

Si se dejan secar se contraen, pudiéndose desprender la capa de separación de la capa soporte, arruinándose irreversiblemente la membrana.

Por esta razón, cuando las membranas están fuera de servicio, se conservan en una solución que además contiene bisulfito sódico que actúa como conservante.

Otra situación es la que se presenta cuando se para una instalación. Entonces las dos caras de la membrana están en contacto con agua, pero al no existir presión se produce el fenómeno de la ósmosis natural, con lo que el agua producto pasa a través de la membrana hacia la parte del agua de alimentación. Este flujo continúa hasta que se equilibran las salinidades a ambos lados de la membrana.

Si no existe agua en la zona del agua producto, la succión que produce la membrana, como consecuencia de la ósmosis directa, arruga y encoge la membrana inutilizándola. Por tanto, cuando la planta se para, hay que suministrar agua en el lado del producto.

En consecuencia es necesario diseñar la instalación para que haya siempre humedad en ambos lados. Esto se consigue en las instalaciones pequeñas dando a la

tubería del agua producto, mediante un sifón, un recorrido ascendente hasta una altura al menos igual a la de la membrana más alta, de forma que siempre haya agua en el sifón.

Para instalaciones de mayor capacidad puede disponerse además de un depósito elevado que según el tamaño del bastidor puede ir colocado sobre el mismo o en otro lugar diferente pero también elevado.

El colector de agua producto a la salida del bastidor se hace pasar por este depósito antes de llevarlo al depósito general de almacenamiento de la instalación.

La entrada del agua desalada a este depósito, que se conoce también como depósito de compensación, se hace por su parte inferior y la salida desde éste al general por la superior.

De esta forma se garantiza que al pararse la instalación por cualquier causa, el agua desalada existente en este depósito retrocede y empapa las membranas.

Cuando las membranas son de poliamida aromática de arrollamiento en espiral, aunque este depósito es también conveniente, sus exigencias son menores, de forma que existen instalaciones que no disponen del mismo.

Cuando por las dificultades constructivas, la altura del bastidor o su tamaño, no es posible colocar el citado depósito en su parte superior, puede instalarse en

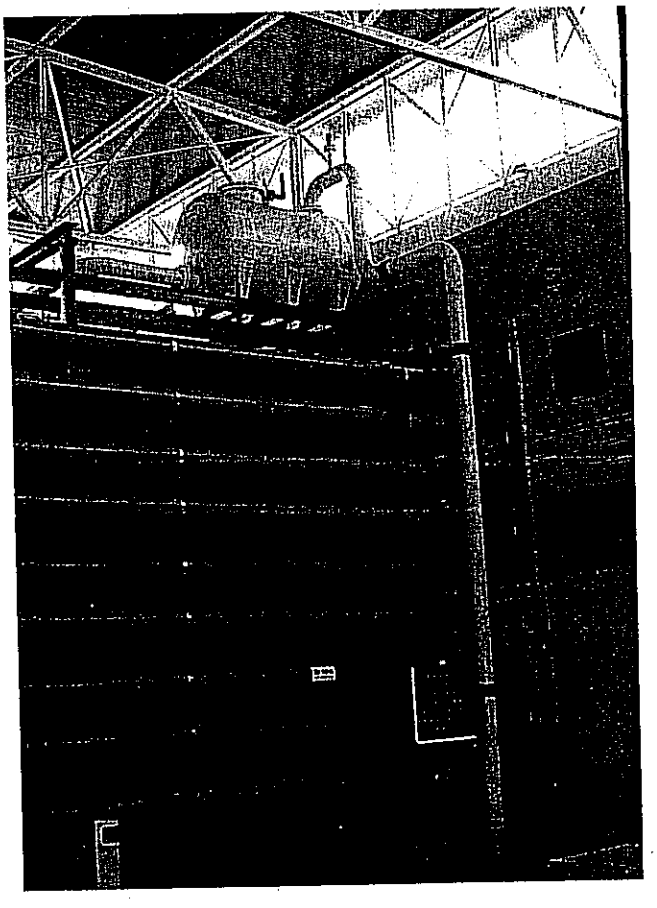


Figura 5.47. Depósito compensación.

otro lugar a nivel inferior y utilizar una pequeña bomba con sistema automático de puesta en marcha, al producirse el paro del bastidor.

La capacidad del depósito de equilibrio osmótico debe ser el suficiente para llenar todas las membranas del bastidor y sus correspondientes colectores de interconexión.

5.8. Otros equipos de bombeo

5.8.1. Bombas de captación

El tipo de bombas que se utiliza en la captación de agua depende de la solución adoptada para ésta, aunque ha de tratarse de que tengan la mayor eficiencia posible. Son preferibles las bombas verticales a las sumergidas por su mayor eficiencia y su más fácil mantenimiento.

Estas bombas operan a velocidades de 3.000 rpm y precisan de un equipo de vacío, que puede ser individual o conjunto, para realizar su cebado y asegurar un funcionamiento homogéneo sin cavitaciones.

La colocación de estas bombas debe mantener, como ya se indicó en el apartado correspondiente a las tomas de agua, los valores que definen las condiciones de funcionamiento hidráulico de los equipos, tanto en aspiración como en impulsión.

Cuando las condiciones no permiten sino la utilización de bombas sumergibles en el interior de sondeos de pequeño diámetro, se mejoran las prestaciones eligiendo en lugar de las bombas sumergidas normales de alta velocidad, otras bombas de menos revoluciones, 1.500 rpm, pero más eficientes, aunque su precio sea más elevado. Este tipo de bombas son más seguras para caudales elevados.

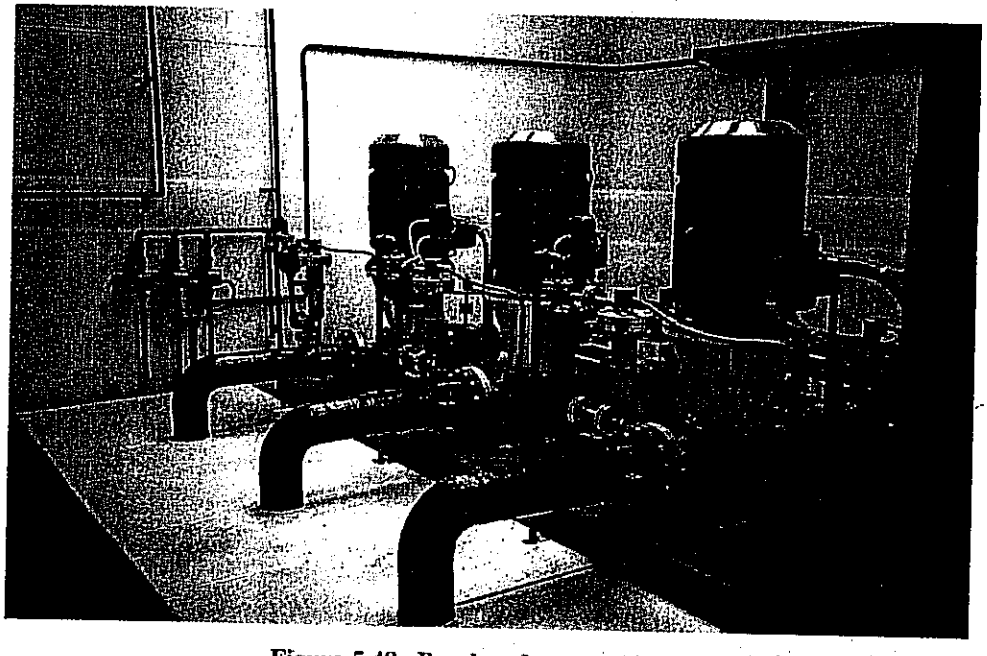


Figura 5.48. Bombas de captación.

Lo ideal es utilizar siempre que sea posible varias bombas, tanto horizontales como sumergidas, cada una de las cuales tenga la capacidad suficiente para alimentar a un sólo bastidor, y colocar una más de repuesto. Sin embargo, resulta más barato colocar una bomba que abastece a varios bastidores a la vez, y además su eficiencia suele ser ligeramente superior.

Cuando la bomba de lavado de filtros se coloca también en la toma de agua, es conveniente que sea intercambiable con las otras.

5.8.2. Bombas de transferencia

Son necesarias en el caso de utilizar filtros de arena abiertos pues el agua filtrada y almacenada en un depósito debe ser presurizada de nuevo para poder tratarla mediante los filtros de cartuchos a presión y suministrar la presión mínima necesaria en la aspiración de las bombas de alta presión.

Se utilizan generalmente bombas centrífugas de acero inoxidable o de materiales plásticos, en el caso de agua de mar, que deberán ser de elevada eficiencia dado que su funcionamiento es continuo y transportan los caudales brutos de la instalación, que son los que suponen el mayor consumo energético.

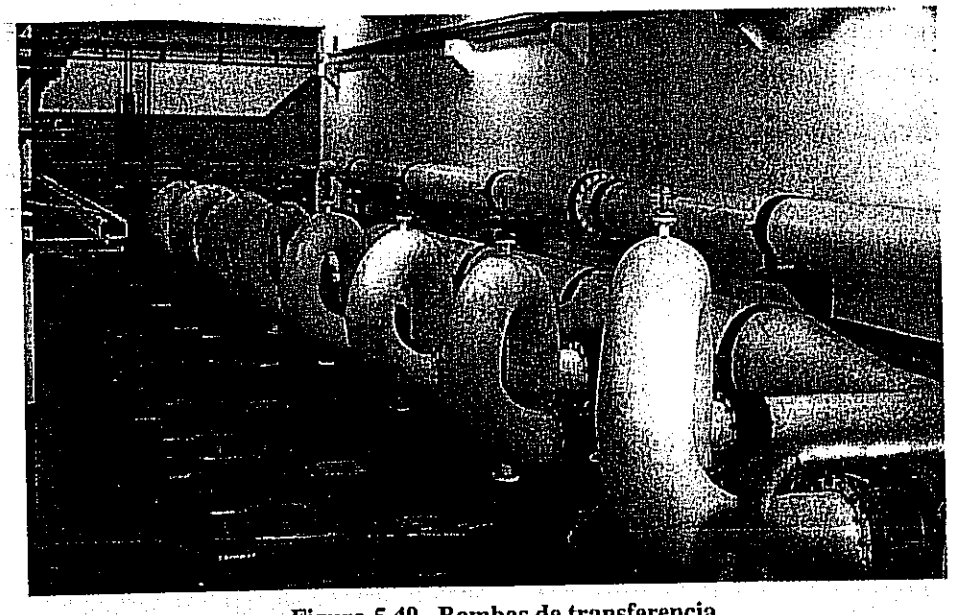


Figura 5.49. Bombas de transferencia.

5.8.3. Bombas de impulsión de producto

Forman parte de toda instalación ya que el agua producida por ósmosis inversa sale casi sin presión del bastidor.

Con ellas se bombea generalmente desde el depósito regulador que suele existir en todas las instalaciones, hasta el punto de consumo del agua desalada.

Dado que el agua desalada suele tener un pH ácido, los materiales de estas bombas deben ser adecuados para soportar la corrosión.

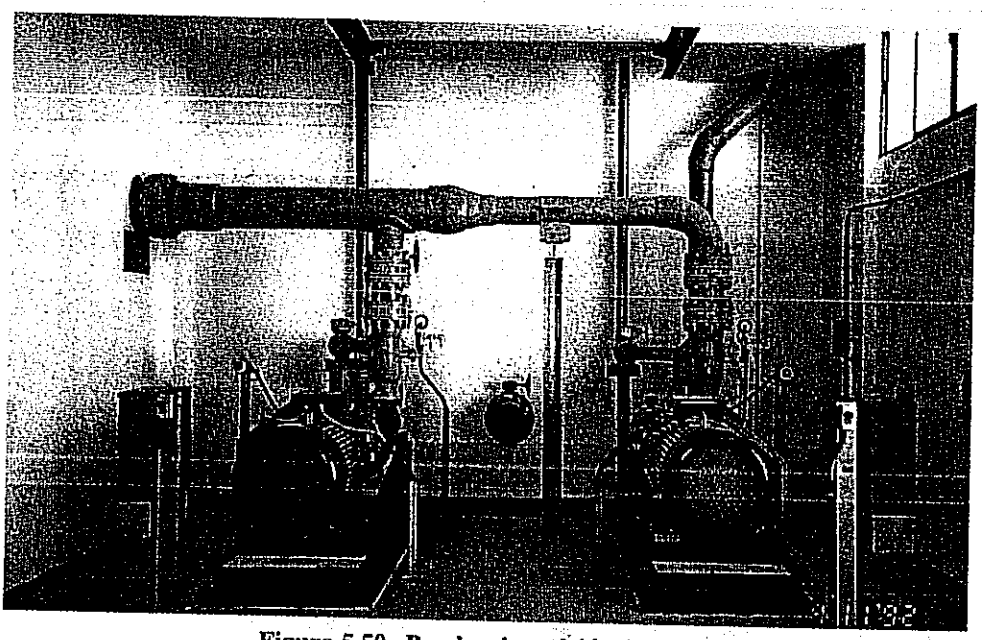


Figura 5.50. Bombas impulsión de producto.

5.8.4. Bombas de lavado de filtros

El retrolavado de los filtros de arena precisa de bombas que funcionando a presiones entre 2,5 y 4 kg/cm^2 proporcionen los caudales necesarios para producir el esponjamiento de los materiales filtrantes y el posterior arrastre de los elementos que han quedado retenidos en los mismos.

Las bombas se suelen colocar por parejas para disponer de una de reserva en caso de avería.

Los materiales empleados en estas bombas deben ser resistentes a la corrosión, dado que el hierro desprendido en la oxidación de éstas puede pasar a las membranas, produciendo un ensuciamiento rápido de éstas.

Para las de agua de mar se precisan materiales más nobles, pero debido a su coste, cuando los equipos de limpieza son independientes y utilizan el agua filtrada, se emplean bombas con carcasas de materiales plásticos y rodetes recubiertos por dichos materiales.

Cuando la fuente de alimentación no plantea problemas como es el caso de ríos, lagos o el mar, la bomba de lavado se suele instalar en la propia toma de agua, junto a las bombas de captación y se trata de utilizar bombas de las mismas características de las de captación para poder ser utilizadas como reserva de éstas y reducir costes de mantenimiento y repuestos. Esto obliga por tanto a dimensionar los filtros de arena para que la capacidad de lavado y arrastre de dichas bombas sea suficiente.

Como el funcionamiento de estas bombas no es continuo, el consumo energético que suponen en el conjunto del consumo específico total de la instalación es pequeño. En consecuencia no tiene tanta importancia la eficiencia de estos equipos,

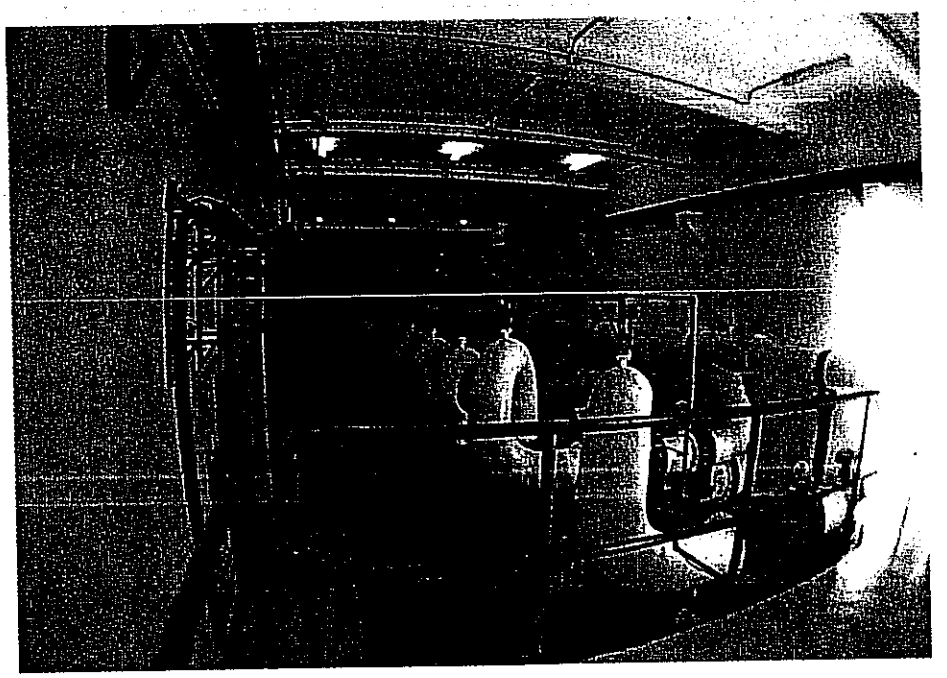


Figura 5.51. Bombas lavado filtros.

cuando se colocan independientemente de los de la captación, y puede sacrificarse en favor de la seguridad.

Cuando la instalación dispone de bombas de transferencia, la bomba o bombas de lavado se coloca junto a ellas, y se alimenta del mismo depósito de agua. Puede ser por tanto, según los casos, una bomba de las mismas características que las de transferencia, o de distinta capacidad que ellas.

5.8.5. Soplantes para el lavado de filtros

Suministran el aire para realizar la fase de lavado de los filtros correspondientes. Deberán tener también una red independiente para acometer los filtros por su parte inferior.

La capacidad de estos equipos debe ser acorde con el tamaño de los filtros que tratan de limpiar.

5.8.6. Bombas de desplazamiento

Por último, cuando la instalación se para durante un período más o menos largo, como puede ser en caso de avería o para someter a una revisión los distintos equipos, es preciso disponer de un sistema que permita eliminar o desplazar el agua estancada de los circuitos de alta presión, las bombas de alta presión y las membranas.

Dicho desplazamiento se realiza con agua producto por lo que se suele utilizar el propio depósito de lavado de membranas, para almacenar y recircular dicha

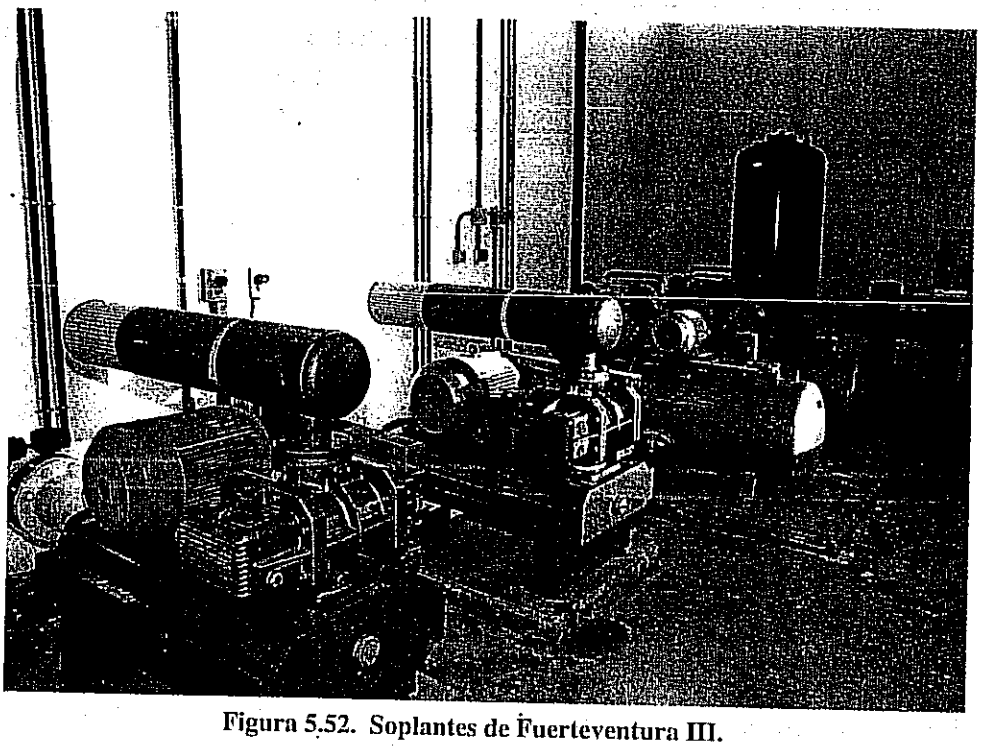


Figura 5.52. Soplantes de Fuerteventura III.

agua. Una bomba de capacidad adecuada, situada próxima a las bombas de lavado y generalmente de su misma capacidad, realiza la impulsión de este agua limpia y la incorpora al circuito que se va a desplazar.

La instalación de esta bomba permite su utilización como reserva de la de lavado en caso de avería de aquellas.

En instalaciones muy grandes puede ser conveniente colocar bombas e instalación de desplazamiento completamente independientes de la de lavado, impulsando el agua desde el propio depósito regulador del agua producto.

El desplazamiento es especialmente importante cuando en el proceso se incorporan antiincrustantes puesto que la eficacia de estos es limitada en el tiempo. Si no se realiza el desplazamiento del agua que ha quedado estancada durante la parada precipitarían las sales ocasionando problemas a las membranas y bombas.

5.9. Equipo de lavado de membranas

Las membranas deben ser sometidas periódicamente a una limpieza con distintos reactivos químicos, para eliminar los precipitados salinos, materia orgánica, bacterias o elementos coloidales que se han ido depositando sobre ellas a lo largo del ciclo de funcionamiento y reducido su eficiencia.

La limpieza consiste en la recirculación durante un tiempo de una serie de reactivos disueltos en el agua para eliminar la causa del ensuciamiento de las membranas.

Dicha recirculación se realiza a unas velocidades y presiones determinadas, por lo que se requieren colectores de baja presión que permitan establecer un circuito cerrado y permitir que la solución de limpieza esté circulando durante algún tiempo.

La base del equipo de lavado la constituye por tanto un depósito en el que se disuelve el reactivo correspondiente en el agua que se va a recircular. La capacidad del depósito tendrá en cuenta el tamaño del bastidor que se va a lavar de una sola vez, y los colectores de envío y retorno del agua de lavado, con objeto de que todo el circuito, incluidas las membranas, esté sumergido en agua durante las distintas fases del lavado.

Para facilitar la disolución de los reactivos se le coloca un electroagitador. Asimismo, como en algunas ocasiones y según cual sea la causa del ensuciamiento o contaminación, las membranas responden mejor al lavado con agua calentada a 30-35 °C, en las paredes del depósito, que será de PRFV, se colocará una resistencia circular que permita el calentamiento.

Una bomba impulsará la solución de lavado del depósito a través de un filtro de cartuchos, de la misma selectividad que los otros de la instalación hasta las membranas.

Para ello se precisan colectores de PRFV que conectarán a través de las correspondientes válvulas con la tuberías de alta presión de alimentación al bastidor y de salida de la salmuera.

5.10. Equipos auxiliares

En las instalaciones de tamaño medio a grande, para completar el funcionamiento se necesitan una serie de elementos que permiten la automatización de las distintas operaciones a realizar, de las que las más importantes son:

5.10.1. Agua de servicios internos

Dado que tanto por motivos de seguridad y de higiene, como para facilitar la disolución de reactivos, es necesario disponer de agua tratada, una red de conducciones la llevará desde un grupo de presión hasta las distintas partes donde puede necesitarse, como sala de reactivos, toma de agua, sala de proceso, etc.

5.10.2. Aire comprimido

Un equipo de aire comprimido con la correspondiente red de tuberías y válvulas permitirá la utilización de válvulas automáticas cuando el diseño de la instalación así lo prevea.

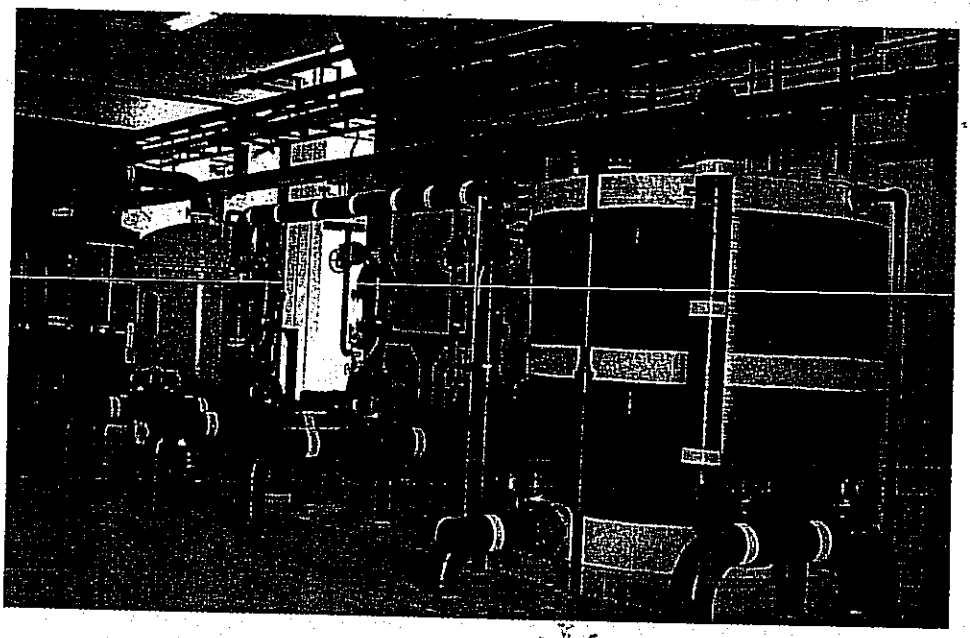


Figura 5.53. Equipo de lavado.

Este equipo deberá constar además de los compresores y el depósito de presión, de secador para reducir la humedad del aire, y filtros que garanticen la limpieza del aire que va a accionar las distintas válvulas.

5.11. Válvulas

Una instalación de ósmosis inversa consta de numerosas válvulas, pero tanto en instalaciones grandes como en pequeñas hay dos válvulas fundamentales que regulan el proceso:

5.11.1. Válvula de control

Situada en la impulsión de la bomba de alta presión, regula en cada momento la presión de alimentación a las membranas.

El tipo de válvula que se utiliza en esta función depende de la importancia de la instalación. En las instalaciones de agua salobre de uso doméstico o agrícola pero de capacidades pequeñas (hasta 500 m^3/día) puede hacerse esta operación de forma manual por lo que se pueden emplear válvulas de compuerta normales de alta presión pero de calidad para garantizar su apertura y cierre correcto, aunque son más usadas por su seguridad de control las válvulas de aguja.

En las instalaciones de mayor capacidad que requieren automatización se emplean dos tipos fundamentales de válvulas.

Válvulas electrónicas, provistas de actuador y tarjeta electrónica, que permiten ser manipuladas desde el centro de control, mediante una señal digital.

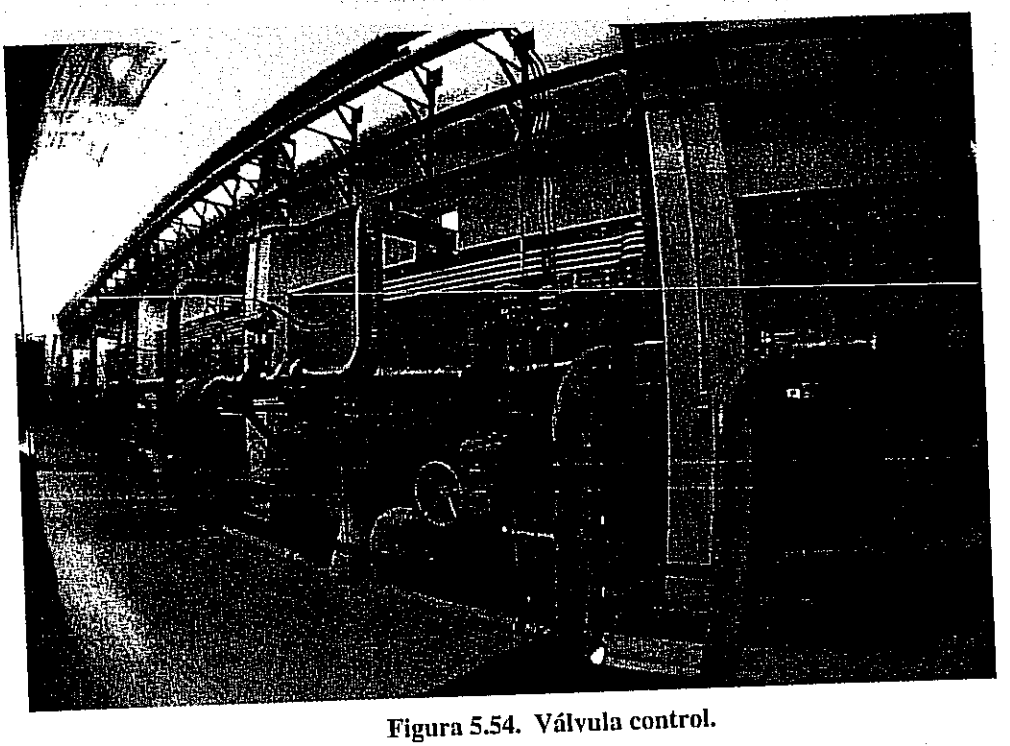


Figura 5.54. Válvula control.

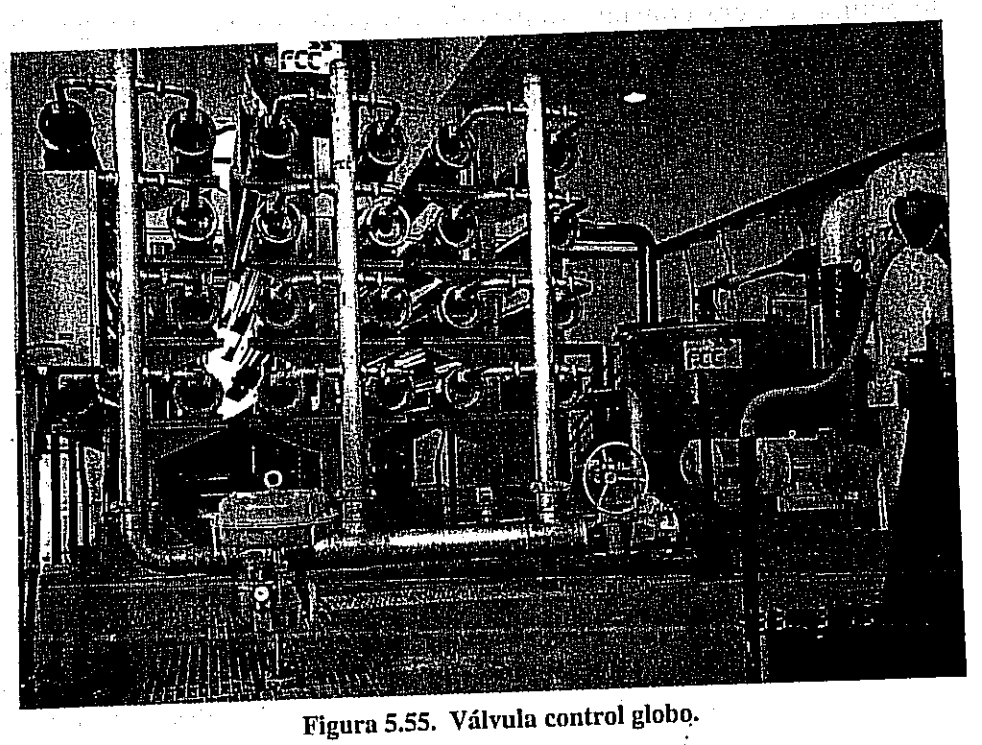


Figura 5.55. Válvula control globo.

Válvulas hidráulicas de globo en el que la señal electrónica activa el dispositivo hidráulico de apertura o cierre.

5.11.2. Válvula de salmuera

Es la que regula la conversión de la instalación. En las instalaciones sin recuperación de energía se coloca en la tubería de salmuera, y normalmente es una vál-

vula de aguja que realiza la reducción de presión de la salmuera para que pueda ser eliminada sin riesgos para el operario.

Cuando la instalación recupera energía esta válvula se coloca en el by-pass de la turbina, si ésta es del tipo bomba invertida y en la regulación de la entrada a la turbina Pelton en el otro caso. La primera es generalmente una válvula de globo, mientras que la segunda lo es electrónica.

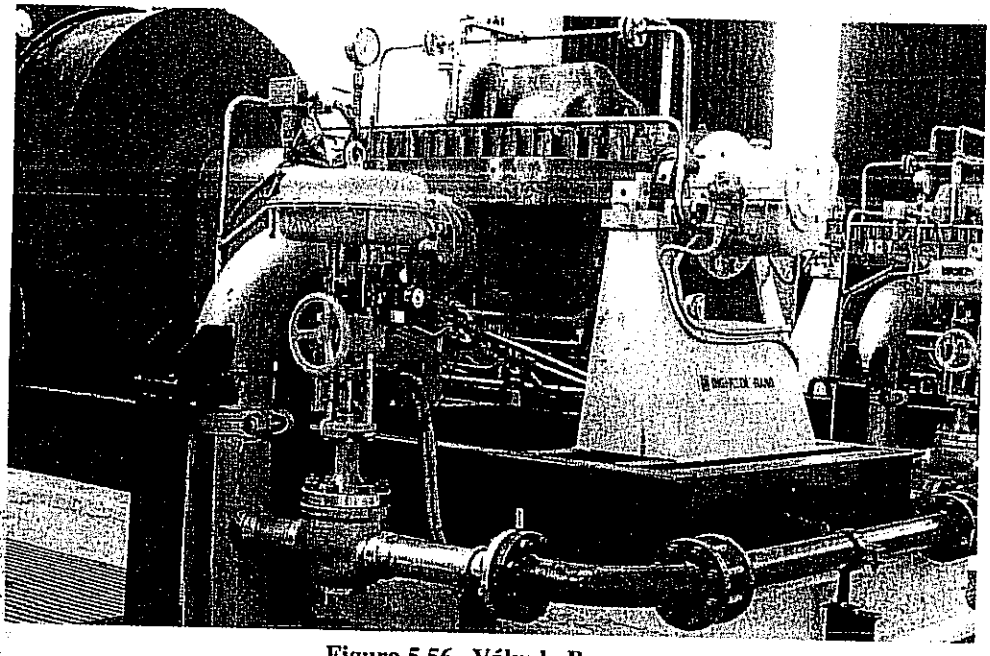


Figura 5.56. Válvula By-pass.

5.11.3. Otras válvulas

Además de las citadas, en todas las instalaciones desaladoras aparecen numerosas válvulas que regulan distintos aspectos del proceso, que pueden ser de alta o baja presión según los circuitos o partes de la instalación en que se encuentren. Según el tipo de válvula, entre las más importantes podemos citar :

Válvulas de baja presión

Captación de agua

— Válvulas de mariposa automáticas en impulsión bombas.

— Válvulas de retención en impulsión bombas.

— Válvula manual de vaciado del colector impulsión.

— Válvulas manuales de aislamiento instrumentos manuales.

Filtros de arena

— Válvulas mariposa automáticas:

- Entrada agua a filtros.

- Entrada agua de lavado.
- Salida agua filtrada.
- Salida agua lavado.
- Vaciado de filtros.
- Llegada de aire.
- Salida de aire.
- Purga de aire.

— Válvulas mariposa manuales:
- By-pass de filtros.
- Aislamiento filtro de reserva.
- Interconexión filtros.

Lavado filtros de arena

— Mariposa manuales en impulsión de soplantes.

— Mariposa automática para derivación de una parte lavado.

Filtros de cartuchos

— Válvulas mariposa manuales:
- Entrada filtros bujías.
- Salida agua tratada.
- Vaciado filtros bujías.
- Purga de aire en cada filtro.
- Parte superior.
- Parte inferior.
- Aislamiento instrumentos.
- By-pass filtros.
- Salida a bombas de lavado.

Bombeo de alta presión

— Válvulas mariposa automáticas:
- Aspiración bombas.
- Llegada agua desplazamiento.
- Vaciado colector aspiración bombas.

— Válvulas mariposa manuales:
- Aislamiento salida turbinas.
- Bolas aislamiento instrumentos.

Bastidores de ósmosis inversa

— Válvulas mariposa manuales:
- Aislamiento salida agua tratada.
- Aislamiento agua tratada 1ª etapa.
- Aislamiento agua tratada 2ª, y/o 3ª etapa, cuando existen.
- Salida de agua producto.
- Bolas venteo tuberías.
- Bolas aislamiento instrumentos.
- Salida agua tratada a cuba reactivos.

Limpieza membranas

— Válvulas mariposa manuales:
- Vaciado de depósito de lavado.
- Vaciado del retorno reactivos.
- Recirculación bombas.
- Entrada filtro.
- Salida filtro.
- Llegada vaciado reactivos.
- Aislamiento aspiración bombas.
- Aislamiento impulsión bombas.
- Bolas aislamiento instrumentos.
- Válvulas retención impulsión bombas.

Válvulas alta presión

Bombeo a alta presión

— Válvulas macho manuales:
- Aislamiento impulsión bombas.
- Aislamiento retorno a turbinas.
- Bolas aislamiento instrumentos.
- Aislamiento vaciados tuberías.

— Válvulas retención:
- Impulsión de bombas.
- Retorno a turbinas.

— Válvulas automática by-pass turbinas.

Bastidores ósmosis inversa

— Válvulas macho automáticas:
  - Aislamiento entrada reactivos lavado.
  - Aislamiento salida reactivos a turbinas.
  - Entrada reactivos a bastidores.
  - Salida de reactivos de bastidores.
  - Salida reactivos.
  - Agua desplazamiento 2ª etapa.

— Válvulas macho manuales:
  - Aislamiento entrada columnas manifold.
  - Aislamiento salida columnas manifold.

— Aislamiento instrumentos.

— Venteos tuberías manifold.

5.12. Instrumentos de medida y control

El funcionamiento de la instalación precisa de unos elementos de medida para comprobar que la misma cumple con las prescripciones en que fué diseñada, es decir, las especificaciones relativas al caudal y calidad del agua producida y al consumo energético de la instalación.

Pero también, teniendo las características del agua a tratar una incidencia muy importante en el proceso, es necesario controlar la misma a lo largo de las distintas fases previas a su entrada a las membranas.

Finalmente una instalación de estas características también debe contar con elementos que permitan comprobar si el funcionamiento de los distintos equipos instalados es correcto, prevenir fallos en la instalación y avisar sobre posibles averías que pueden ocasionar daños de importante repercusión económica.

A ello se dedican los distintos elementos de medida y control de que se dota a la instalación, aunque según el tamaño de ésta y que se elija un funcionamiento manual, semiautomático o completamente automatizado, será mayor o menor la complejidad de los mismos.

5.12.1. Instrumentos de medida

Los tres parámetros básicos y mínimos a medir para comprobar el correcto funcionamiento de la instalación son caudal, conductividad y consumo energético.

Todas las instálaciones por pequeñas y simples que sean deben contar al menos con estos elementos de medida.

El número mínimo y la ubicación de los mismos será la siguiente:

— *Medida de la conductividad* en la toma de agua y en el producto.

— *Medida de caudal* en el producto, aunque también a efectos de comprobación de la conversión de la instalación, se suele colocar otro medidor en la alimentación de la instalación o en el rechazo, y en muchos casos en ambos.

— *Medida del consumo eléctrico*, un contador general para la instalación, aunque si ésta es importante se coloca al menos uno para los equipos de alta presión y otro u otros para el resto, según se quieran o no especificar los consumos parciales.

Esto no resulta especialmente complicado en las instalaciones de gran capacidad, donde normalmente las bombas de alta presión, por su gran potencia funcionan a 3.000 ó 6.000 voltios, y las restantes bombas, salvo excepciones a 400 V, por lo que ya de por sí la planta necesita transformadores independientes.

5.12.2. Instrumentos de control y protección

Sin embargo hay otros parámetros también importantes que para una correcta operación de la instalación deben controlarse, como pH, temperatura, presión y potencial redox.

Se colocarán tantos cuantos sean necesarios en función de las características de la instalación y su objeto es conocer en cada momento el valor de algunos parámetros que pueden afectar tanto al funcionamiento de los equipos como a las membranas.

Instalaciones simples o monobloc

Habrá que controlar los principales parámetros que afectan a las membranas que son el *pH*, por su influencia tanto en la precipitación de sales, como en la agresividad o corrosividad del agua, y en el caso de las membranas de acetato de celulosa en su hidrólisis; la *temperatura del agua*, que influye en el flujo de las membranas y rechazo de sales; y la *presión de funcionamiento*, de la que depende el caudal y la resistencia mecánica de la propia membrana.

Por tanto constará como mínimo con un medidor de pH (ph-ímetro), un medidor de temperatura (termómetro) y un medidor de presión (manómetro), que deberán estar situados antes de la entrada de agua a membranas.

En una instalación pequeña, de funcionamiento manual, con estos tres instrumentos, además de un medidor de caudal de alimentación y producto y un conductivímetro en esos mismos flujos sería suficiente.

También es conveniente colocar otro manómetro en la salida de la salmuera de los bastidores, para poder controlar la pérdida de carga que se produce en ellos y decidir el momento del lavado de las membranas.

5.12.3. Instalaciones complejas

A medida que aumenta el tamaño de la instalación, la instrumentación va aumentando de complejidad, puesto que la inversión correspondiente queda plenamente justificada dentro del coste global que representa la instalación.

Lo que se pretende en definitiva es tener en cada momento la situación de funcionamiento de las distintas partes de la instalación al menor coste posible.

De acuerdo con los distintos equipos instalados podemos distinguir entre la siguiente instrumentación mínima y la conveniente de:

5.12.4. Captación de agua

— Mínima:
- Medidor de pH.
- Conductivímetro.
- Medidor de temperatura del agua.

— Conveniente:
- Medidor del nivel del agua en la toma o pozo.
- Manómetros en las impulsiones de las bombas.
- Presostatos de baja en la aspiración de las bombas.
- Medidores de temperatura de los motores.

5.12.5. Filtros de arena y cartuchos

— Mínima:
- Medidor de presión diferencial en ambos filtros.
- Medidor de potencial redox a la salida de los filtros de cartuchos.
- Medidor de caudal tipo rotámetro en el colector de impulsión del agua de lavado a los filtros de arena.

— Conveniente:
- Manómetros a la entrada y salida de cada filtro.

5.12.6. Bombeo de alta presión

— Mínima:
- Manómetros en la aspiración e impulsión de las bombas.
- Manómetros a la entrada de las turbinas.

— Conveniente:
- Presostatos de baja en la aspiración de las bombas de alta presión y en la alimentación a las turbinas tipo Francis.

- Medidor de temperatura de los arrollamientos de los motores.
- Medidor de temperatura de los rodamientos.

5.12.7. Equipos de dosificación de reactivos químicos

— Medida de los niveles del líquido en los depósitos de reactivos.

5.12.8. Bastidores de membranas

— Mínimo:
- Medidor de temperatura a la entrada del bastidor.
- Medidor de pH a la entrada del bastidor.
- Manómetro a la entrada y en la salida del producto y rechazo.
- Medidor de conductividad a la salida del agua producto.
- Medidor de caudal de alimentación y producto.

— Conveniente:
- Medidor de pH en el agua producto.
- Presostato de alta en la entrada al bastidor.
- Presostato de alta en la salida del producto.
- Medidor de conductividad en la salida del rechazo.
- Medidor de caudal de rechazo.

5.12.9. Bombeos de agua producto

— Mínimo:
- Manómetro en la impulsión de las bombas.

— Conveniente:
- Presostato en la aspiración de la bomba.

5.13. Equipo de control

La utilización de los distintos instrumentos descritos tiene como objetivo último la automatización total o parcial de la planta desaladora mediante la instalación de un sistema de control, con dos misiones principales:

— Recogida de la información de funcionamiento de la instalación en tiempo real, para su análisis crítico y poder introducir correcciones que mejoren el funcionamiento de la misma.

— Facilitar la operación de la instalación, mediante la transmisión de órdenes que afectan al funcionamiento de las distintas partes de la instalación.

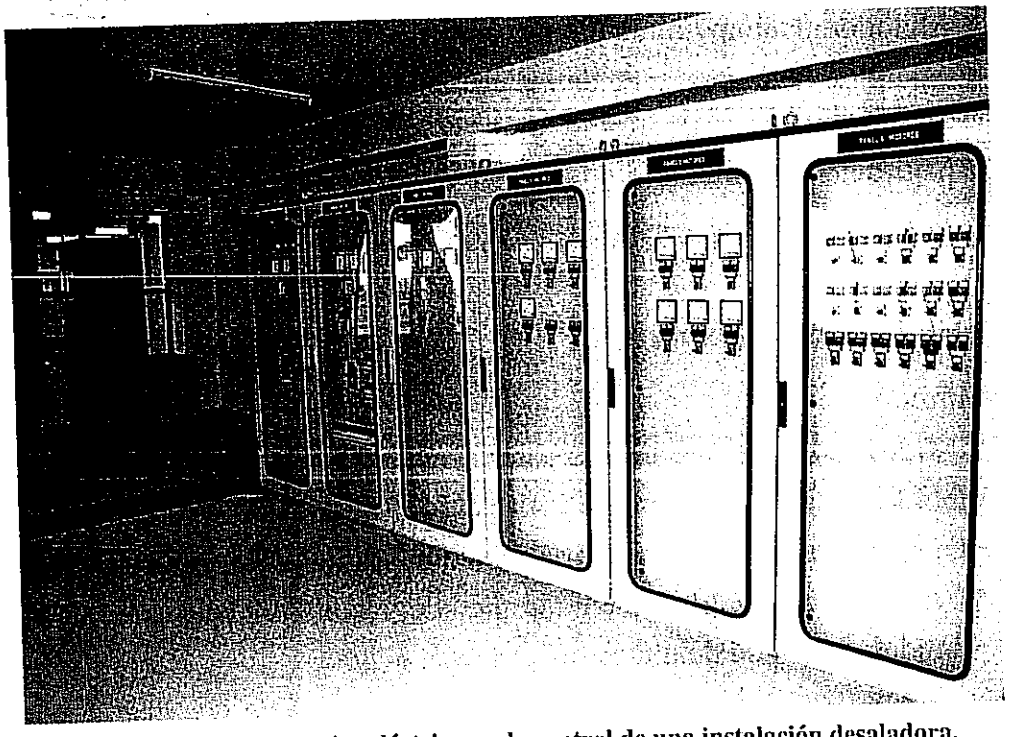


Figura 5. 57. Armarios eléctricos y de control de una instalación desaladora.

Aunque en las instalaciones modulares de pequeña capacidad la operación de la instalación se suele realizar de forma manual, colocándo únicamente algunos elementos de protección mas que de control, como pueden ser presostatos o relés que paran los equipos al rebasarse unos valores de algunos de los parámetros clave; las instalaciones cada vez están más sujetas a la utilización de modernos sistemas de control automáticos, constituídos por una unidad central (UC) y bloques de entradas y salidas unidos por un bus de comunicación.

La mayor o menor complejidad y tamaño de la instalación puede suponer desde un simple sistema de recepción de señales que provoca la parada de los correspondientes equipos, cuando se superan los valores límites de operación y permite además su arranque, hasta un sofisticado sistema distribuído en el que se interrelacionan unos parámetros con otros de manera que cualquier alteración sobre los valores operacionales programados, puede corregirse alterando las condiciones de funcionamiento de algún equipo sin tener que parar la instalación excepto en casos extremos.

Para poder actuar sobre los mismos, los distintos elementos o instrumentos de la instalación se conectan a través de cables con las bornas o terminales instaladas en unos armarios en los que se aloja la unidad operativa que realiza el verdadero control o procesado de los datos.

La utilización de dos tipos de señales, analógicas o digitales, permite visualizar sobre una pantalla de televisión tanto los diferentes datos de funcionamiento, como la situación de operación de los distintos instrumentos o equipos, disponiéndose además de un teclado para poder actuar sobre los mismos.

El operario tras analizar los datos recibidos toma las decisiones que rigen el funcionamiento de la instalación.

En estos equipos los riesgos de interrupción del funcionamiento deben reducirse al mínimo, para lo que se emplea la redundancia de los sistemas.

Doblar simplemente los componentes de los sistemas resulta muy costoso y no siempre asegura el objetivo que se busca; por el contrario existen varios tipos de redundancia, que a menor coste proporcionan resultados satisfactorios.

La redundancia consiste en esencia en la utilización de dos unidades centrales, que actúan simultánea o alternativamente, dando lugar a los dos tipos de redundancia existentes:

— *Redundancia pasiva:*

Cuando de las dos unidades de control solo una pilota las entradas-salidas, mientras que la otra, pasiva, está preparada para tomar el relevo en caso de fallo.

Su puesta en marcha es fácil y su coste mínimo, pero precisa de personal cualificado en vigilancia permanente, que pueda compensar la fiabilidad de los materiales.

— *Redundancia activa:*

Cuando ambas unidades reciben las señales y sólo pilotan las entradas-salidas cuando las dos están de acuerdo. En caso de desacuerdo una lógica de decisión resuelve la indeterminación.

No requiere personal cualificado permanente, que se suple con un mantenimiento lógico con personal muy especializado.

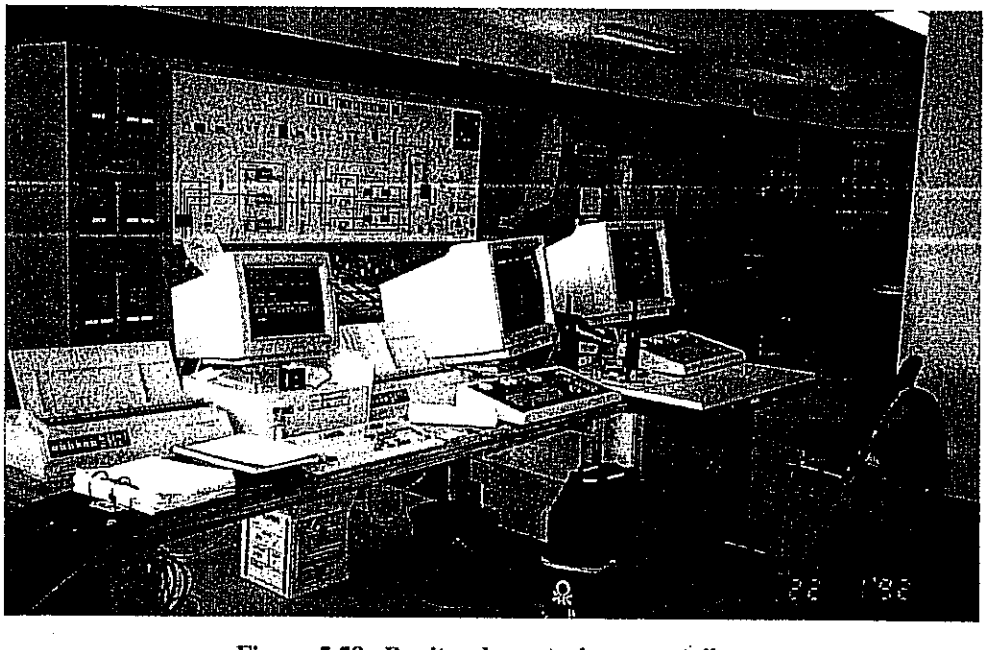


Figura 5.58. Pupitre de control con pantallas.

CAPITULO 6

PRETRATAMIENTOS FISICOS

Introducción

Como hemos visto en un capítulo anterior, el agua que se va a desalar contiene una serie de componentes orgánicos y no orgánicos que deben ser controlados dentro de unos determinados límites, para que pueda aplicarse directamente a unos elementos tan sensibles como las membranas, sin que produzca un deterioro importante de las mismas.

Debe por tanto acondicionarse, sometiéndola a una serie de tratamientos que globalmente responden a dos tipos:

— Físicos, destinados a eliminar fundamentalmente los elementos sólidos, algas y materia orgánica.

— Químicos, para evitar ataques a la membrana o precipitados de sales sobre la misma.

Pero además el agua desalada requiere también tratamientos químicos, dado que su pureza la hace en muchos casos inadecuada para determinados usos, o corrosiva para los depósitos en que se almacena o las conducciones a través de las que circula.

Es por ello que al hablar de tratamientos en el proceso de desalación se habla de pre y post-tratamientos.

6.1. Pretratamientos físicos

Los componentes físicos en suspensión del agua comprenden desde arenas hasta partículas coloidales.

Partículas en suspensión proceden de la erosión de los terrenos, la disolución de sustancias minerales y la descomposición de sustancias orgánicas.

Todos estos elementos extraños deben eliminarse de los circuitos hidráulicos de la instalación, o al menos controlarse dentro de unos límites.

Además muchas veces resulta difícil incluso desligar la incidencia de los componentes físicos de los químicos del agua, pues la presencia de los primeros también induce la de los segundos.

El ensuciamiento por elementos sólidos por ejemplo no tiene sólo efectos de tipo físico, por rozamiento y desgaste u obstrucción de los poros de las membranas, sino que en la mayoría de los casos, la película o capa de partículas depositada sobre la superficie de éstas produce además un cambio en las condiciones hidráulicas de funcionamiento de las mismas, que induce la formación de precipitados químicos. Asimismo cuando en el agua a tratar existen contaminantes orgánicos se favorece también el ensuciamiento biológico.

Para mejorar estos aspectos físicos del agua se recurre fundamentalmente a distintos procesos de filtración que cubren la fase de separación de sólidos contenidos en líquidos.

En general, la eliminación de las partículas no coloidales se resuelve mediante la utilización de filtros, formados por una o más capas de material filtrante. También una parte de las partículas coloidales es retenida por estos filtros, con los que se consigue reducir dicho contenido en un 50 %.

Pero en muchas ocasiones la filtración debe mejorarse con la aplicación de otras técnicas como la decantación, la coagulación-floculación, y la coagulación-floculación-decantación.

Si los niveles de partículas siguen siendo excesivos debe recurrirse a una fase posterior de filtración que podríamos denominar de afino, constituida fundamentalmente por la filtración sobre cartuchos.

No obstante este último tipo de filtración se realiza en todos los casos, por motivos de seguridad y como exigencia comprendida dentro de las garantías que ofrecen los fabricantes de membranas.

Por último, en casos especiales como instalaciones para desalar aguas residuales, o aguas industriales de elevada pureza, se recurre a nuevas técnicas avanzadas de filtración como la micro y ultrafiltración. Estas tecnologías no se aplican en cambio en circunstancias normales debido a su elevado coste.

Antes de seguir adelante vamos a profundizar un poco más en el conocimiento de los coloides.

6.2. Elementos coloidales

Las partículas coloidales ocasionan serios problemas a las membranas de ósmosis inversa porque son suficientemente pequeñas para pasar la mayor parte de

los sistemas de filtración, aunque suficientemente grandes para ser rechazadas y concentradas en la superficie de la membrana.

Por ello debe tenerse especial cuidado en el diseño del sistema de pretratamiento, ya que una vez decidido éste, resulta difícil y caro realizar cualquier reforma posterior.

Las partículas coloidales son intermedias en tamaño entre las soluciones verdaderas y la materia en suspensión. Aunque no existe un límite claro sobre su tamaño, puede decirse que corresponde tal denominación a cualquier partícula mayor de 10 Angstroms y menor de dos micras de diámetro. En la práctica se ha encontrado que la mayor parte de las partículas coloidales que se encuentran en las aguas naturales son arcillas silicato aluminosas, con un tamaño entre 0,3 y 1 micra. Se encuentran por tanto por todo el mundo. Cuando estas partículas arcillosas entran en las membranas, pronto se concentran en su superficie y empiezan a coagular, ensuciándola.

La mayoría de estas partículas arcillosas coloidales tienen una carga superficial negativa, que es consecuencia de la enorme superficie que tienen en relación con su volumen. Esta gran área superficial da a los coloides la tendencia a concentrar o absorber sustancias en su superficie, procedentes del agua que les rodea.

Después que las partículas coloidales han absorbido iones negativos en su superficie y desarrollado una carga negativa, atraen iones positivos de la solución circundante.

Las fuerzas electrostáticas ejercidas por la superficie del coloide hacen que los iones positivos de la solución sean retenidos fuertemente y muy próximos a la superficie del coloide formando una capa de iones alrededor de cada partícula coloidal. Este efecto, en el que una partícula coloidal cargada está rodeada por capas de iones de carga opuesta, se conoce como efecto de doble capa.

Una porción de la doble capa está unida a la superficie del coloide muy firmemente, y localizada muy cerca de la superficie extendiéndose a una corta distancia de ésta. Esta parte de la doble capa se llama «capa de Stern» y no es afectada por la agitación térmica.

La mayor parte de la carga superficial es neutralizada por los iones de la capa de Stern. La carga restante que no ha sido neutralizada es protegida por la citada capa que la hace ser relativamente débil.

Aunque la mayoría de la carga superficial de los coloides queda neutralizada por los iones de la capa de Stern, todavía queda una ligera carga atrayendo iones hacia el coloide. Los iones retenidos por esta carga lo son menos firmemente que aquellos de la capa de Stern y están a una mayor distancia de la superficie del coloide. Esta porción de la doble capa se conoce como «capa difusa», que sí se ve afectada por la agitación térmica, concentración de sales de la solución y otros factores. Esta capa debe ser alterada antes de que sea posible la coagulación de los coloides de una solución y se ocasionen problemas.

Puesto que la mayoría de los coloides están compuestos de iones positivos, se repelen entre sí. La capa difusa actúa como un colchón evitando que los coloides se pongan en contacto unos con otros y coagulen.

La estabilidad de las partículas coloidales está determinada por la carga que el coloide ejerce sobre la capa difusa y la distancia a que se encuentran los iones de esta capa de la superficie del coloide. Si la distancia de los iones a la superficie es grande y la carga de la superficie coloidal también, el coloide es muy estable. Dichos coloides no se acercan unos a otros y no coagulan. Si la carga ejercida por el coloide es débil y la distancia de los iones a la superficie pequeña, el coloide es inestable y puede coagular en partículas mayores.

Los coloides inestables se acercan más entre sí que los estables. Hay un punto en el cual la estabilidad de las partículas coloidales desciende hasta el punto en que los coloides pueden ponerse en contacto y coagular. En este punto las fuerzas relativamente débiles de Van der Waals-london son lo suficientemente fuertes para mantener los coloides unidos.

Cuando sucede esto, los coloides coalescen formando partículas mayores llamadas flóculos.

Uno de los factores más importantes que influyen en la estabilidad coloidal es la concentración de las sales disueltas en la solución circundante. Cuando el TDS del agua aumenta, la estabilidad de los coloides disminuye. Si hubiera coloides en el agua desionizada, serían muy estables y sería muy difícil desestabilizarlos.

Por la misma razón sería posible disminuir la estabilidad de los coloides hasta el punto en que se produjera su coagulación simplemente incrementando el TDS del agua.

Es decir, que al menos de forma teórica, concentrando el agua de mar hasta el infinito se eliminarían los coloides de dicha solución.

Hay dos tipos de coloides hidrofílicos e hidrofóbicos.

Las partículas hidrófilas deshidratadas se dispersan espontáneamente en el agua y son rodeadas de moléculas de agua que impiden su posterior contacto; su estabiblidad depende más de su afinidad por el agua que de la ligera carga que poseen.

Las partículas hidrófobas no quedan rodeadas de moléculas de agua (no tienen afinidad por ésta) y su dispersión en el agua no es espontánea, por lo que se le debe facilitar por medios físicos y químicos.

La carga en los coloides se consigue muchas veces absorbiendo iones positivos de la solución. La repulsión electrostática entre las partículas coloidales cargadas produce un sol estable.

Las partículas hidrófobas son generalmente inorgánicas, mientras que las hidrófilas son orgánicas.

La función de las membranas de ósmosis inversa es concentrar las sales disueltas en un lado de la membrana, mientras se deja pasar el agua pura a su través para ser recogida en el otro lado.

Como las partículas coloidales son mayores que las sales disueltas también son rechazadas por las membranas de ósmosis inversa. Esto significa que el TDS del agua y la concentración de las partículas coloidales aumentan en la superficie de las membranas. Por tanto cuando el nivel de sólidos disueltos aumenta, las partículas coloidales se desestabilizan y empiezan a coagular.

El flóculo o coágulo que se forma empieza a obstruir la membrana y ésta produce menos agua. Entonces el operador aumenta la presión de operación para recuperar el flujo perdido, lo que causa una mayor coagulación hasta que la membrana queda permanentemente dañada u obstruida.

Si la presión de operación está en su máximo y la productividad es todavía insuficiente, la membrana debe ser lavada o sustituida.

Pero además, la acumulación de coloides sobre la superficie de la membrana afecta también a una característica tan trascendental de ésta, como es el paso de sales, incrementándolo.

De todo esto se deduce la importancia de conocer previamente si los coloides del agua a tratar pueden suponer un problema, para poder diseñar un pretratamiento correcto.

6.3. Parámetros característicos

Las partículas sólidas que arrastra el agua se pueden clasificar desde el punto de vista de su tamaño en los siguientes grupos:

— Arena gruesa.

— Arena fina.

— Limo.

— Arcilla.

En relación con los procesos de ósmosis inversa puede suponerse que responden a dos grandes grupos:

— Partículas coloidales cuyo diámetro está comprendido entre 0,3 y 1 micra.

— Elementos no coloidales, cuyo tamaño es mayor de esas cifras.

La determinación de las partículas gruesas que contiene el agua se realiza por medios tradicionales en el laboratorio, pasando el líquido a través de distintos tamices que van separando los distintos tamaños.

Sin embargo este tipo de determinaciones no es tan importante en los procesos de ósmosis, habida cuenta que los citados filtros sobre medios filtrantes son bastante efectivos.

Lo realmente importante son esas partículas coloidales de tamaño tan reducido que, de hecho, acaban atravesando toda la batería de filtros que se colocan en las instalaciones y depositándose sobre las membranas.

El agua que se va a tratar viene identificada, desde el punto de vista físico, por una serie de parámetros que son los que imponen las membranas.

Los más importantes son el potencial Z, la turbidez y el índice de colmatación.

El mayor problema que se planteó con la aparición de la ósmosis inversa fue el establecer una tecnología fiable que pudiera determinar el contenido de coloides de un agua y relacionarlo con el ensuciamiento de las membranas.

Inicialmente se recurrió a índices conocidos como el de turbidez, el conteo de partículas o el potencial Z.

Respecto al conteo de partículas, pronto se vió que a los niveles coloidales de los que se trata en la ósmosis, las lecturas no eran fiables, y había una serie de factores en la situación del agua que podían influir en dichas lecturas.

Aún cuando modernamente se han desarrollado contadores de partículas electrónicos que miden y graban con bastante precisión el número de partículas en suspensión, en función del tamaño, no se ha podido encontrar una correlación entre estos y el ensuciamiento de las membranas.

El índice de turbidez, más fiable que el anterior, tampoco establecía una correlación fija con el ensuciamiento de las membranas, de manera que había ocasiones en que respondía bastante bien y en otras ocasiones los resultados eran distintos de los esperados.

Ello llevó a los fabricantes de membranas a estudiar otro nuevo elemento de evaluación que respondiera de forma más segura al objetivo propuesto, el índice de colmatación.

6.3.1. Potencial Z

Las partículas de pequeño tamaño tienen en su superficie una carga, generalmente negativa, que atrae a otras cargas opuestas de las proximidades formando una capa compacta, la cual a su vez por atracción de nuevas partículas da lugar a otra capa más difusa.

La combinación de ambas capas determina un potencial electrostático alrededor de la partícula, que repele a otras partículas de la misma carga, conocido como potencial zeta.

El potencial Z por tanto es una medida de la carga eléctrica de la capa difusa del coloide y de la distancia, hasta la que se extiende el efecto de la carga, en la so-

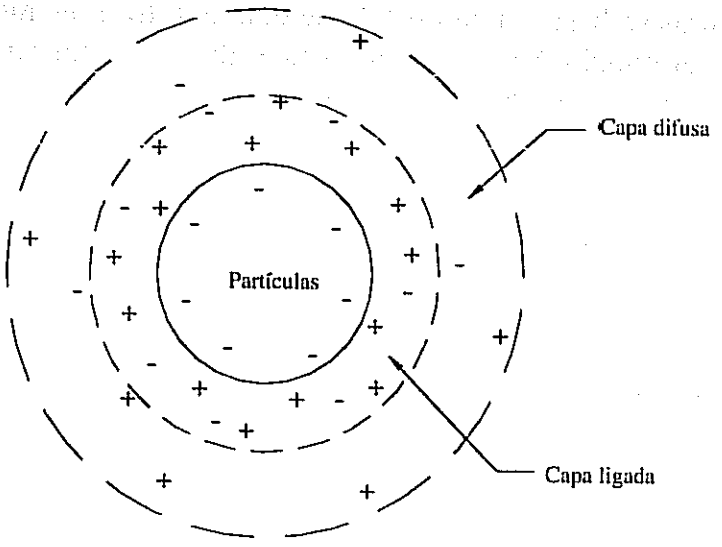


Figura 6.1. Potencial Z, elementos cargados.

lución. Se calcula mediante el uso de un medidor Zeta que aplica una carga a la solución que contiene los coloides y mide la velocidad a la cual estos migran hacia sus respectivos electrodos. Dado que la velocidad de migración es función directa del potencial Zeta, éste puede determinarse.

Se ha conseguido establecer una relación aproximada entre el potencial Z y el índice SDI.

SDI	Potencial Z	Grado de ensuciamiento
3 o menos	-15 a - 30 mv	Pequeño o ninguno
3 a 6	0 a - 15 mv	Moderado, precisa más pretratamiento
> 6	Insignificante	Severo, se requiere tratamiento adicional

6.3.2. Turbidez

Está ocasionada por la presencia de materiales en suspensión como arcilla, limo, partículas orgánicas coloidales, plancton y otros organismos microscópicos.

La turbidez es la expresión de ciertas propiedades de absorción de la luz que tiene el agua. Es un parámetro cuya validez depende en cierta medida de la técnica de medición.

Depende de una forma compleja de factores como el tipo, número, tamaño e índice de refracción de las partículas y de la longitud de onda de la luz incidente.

Aunque hay distintos métodos de medida los más frecuentes son el nefelométrico y el turbidimétrico. Históricamente, el primer aparato utilizado fue el turbidímetro Jackson.

Las lecturas se basan en la medida de una muestra contenida en un recipiente graduado determinado. Se calcula la profundidad de la muestra que es suficiente para extinguir la imagen de una vela estándar incandescente, observada verticalmente a través de la muestra.

La unidad de turbidez Jackson (JTU) se define en términos de dicha profundidad. Una profundidad de 21,5 cm corresponde a 100 JTU. El turbidímetro Jackson solo es aplicable a aguas con turbidez superior a 25 JTU.

Posteriormente, se han introducido otros instrumentos de mayor precisión como el turbidímetro Patterson, que permiten dichas lecturas menores.

Las lecturas pueden ser transformadas a concentraciones de sólidos en suspensión, para lo cual se emplean diatomeas para formar las suspensiones estándar.

Actualmente se emplea más el método nefelométrico, que mide la intensidad de la luz dispersada a 90 °C del rayo de luz incidente. Diferencias en el diseño físico del aparato pueden dar lugar a medidas diferentes. Para calibración del aparato se emplean suspensiones de polímeros de formazina.

La solución patrón (50 mg/l de sulfato de hidracina en 500 mg/l de hexametilaminatetramina) tiene un índice de 40 NTU que corresponde aproximadamente a 40 JTU, cuando se mide con el turbidímetro Jackson.

Existen relaciones entre la turbidez y el conteo de partículas para valores de NTU de 0,2 a 1.

Las partículas que ocasionan la turbidez varían de 10 nm a diámetros de 0,1 mm y pueden dividirse en tres grupos:

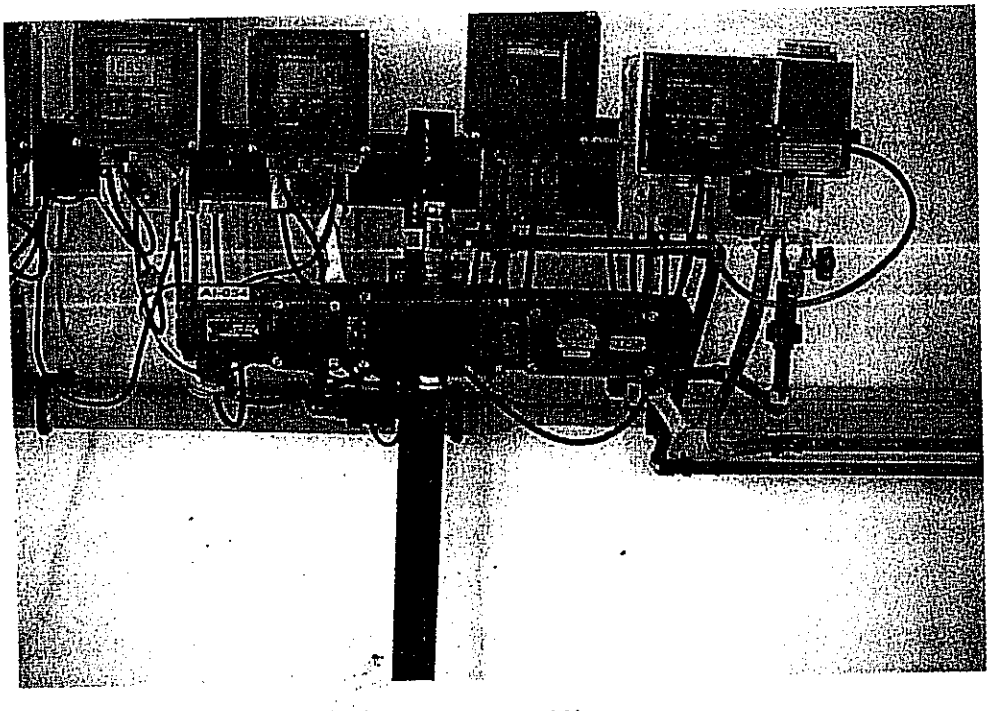


Figura 6.2. Turbidímetro.

— Arcillas.

— Partículas orgánicas resultantes de la descomposición de restos de animales y plantas.

— Partículas fibrosas.

Las partículas arrastradas del suelo por erosión constituyen la mayor parte del material en suspensión del agua. Las arenas más gruesas y limos quedan recubiertas total o parcialmente de una capa de materia orgánica.

La fracción arcillosa está compuesta por óxidos e hidróxidos de hierro y aluminio, cuarzo, sílice amorfa, carbonatos y feldespatos. Las sustancias húmicas a veces tienen un efecto predominante. La turbidez orgánica procedente de la acumulación de microorganismos a veces es muy elevada y da lugar a un agua oscura y maloliente.

Mediante filtración se consigue reducir la turbidez a 1 NTU. Esta lectura da idea de si la filtración es eficaz o no. La presencia de turbidez es importante porque puede enmascarar la presencia de otros contaminantes. La turbidez se debe generalmente a sustancias inorgánicas, mientras que el color es imputable a partículas de materias orgánicas e hidróxidos metálicos.

6.3.3. Indice de colmatación o ensuciamiento. SDI

Se determina filtrando el líquido que se va tratar, al que se le aplica una presión de 2 kg/cm^2, a través de un filtro de 0,45 micras. Para ello se ha desarrollado el instrumento que aparece en la figura 6.3.

La determinación del índice es como sigue: Se filtran a través del aparato 500 ml del agua a tratar, que se recogen en un depósito en la parte inferior, a la vez que se anota el tiempo necesario para llenar ese depósito de la capacidad citada (t_i).

Se deja que continúe el líquido pasando por el filtro y se vuelve a realizar la misma operación al cabo de 5, 10 y 15 minutos (t_f).

Con los datos recogidos siendo:

t_i = tiempo inicial para filtrar los 500 ml.

t_f = tiempo final para filtrar los 500 ml.

t_t = tiempo total (5, 10 o 15 minutos según los casos).

y manteniendo constante durante todo el proceso la presión a 2 kg/cm^2, se aplica la fórmula:

$$SDI = \% P/t_t = 100 (1 - t_i/t_f)/t_t$$

Normalmente el tiempo entre lecturas es de 15 minutos, pero si la colmatación es muy elevada se recurre a tiempos menores.

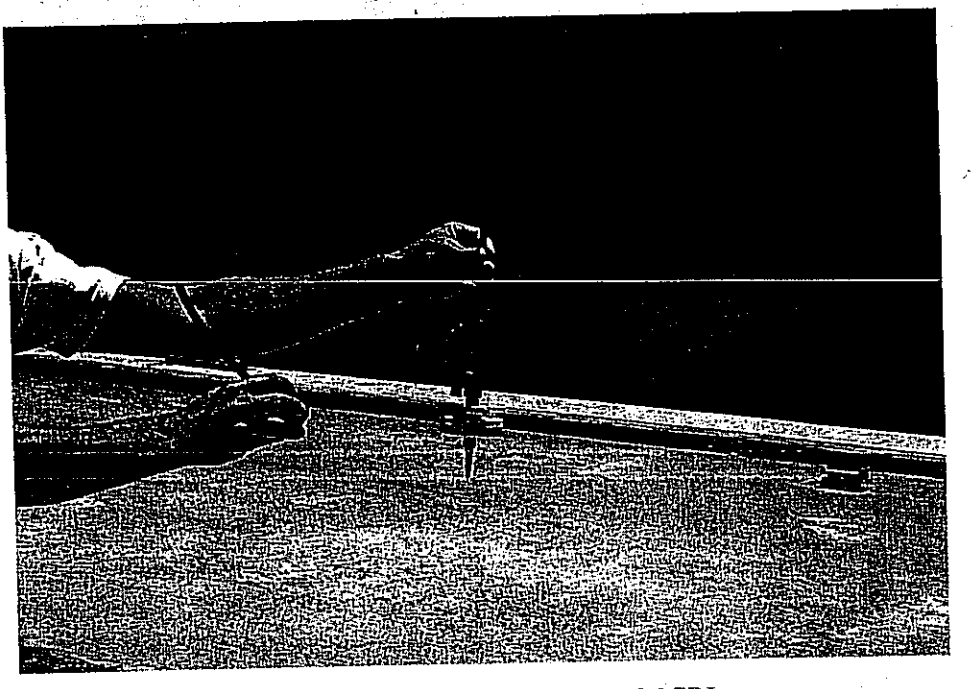


Figura 6.3. Aparato de medida del SDI.

Los fabricantes de membranas suelen exigir al agua a tratar índices de colmatación inferiores a 5.

Sin embargo los valores de Turbidez de 1 NTU, o incluso los índices de SDI de 5 exigidos por las casas fabricantes de membranas, no garantizan completamente que las membranas no se ensucien.

En ocasiones se han utilizado incluso *jar tests*, pero no son procedimientos especialmente adecuados para predecir el ensuciamiento de las membranas.

Quizás lo más oportuno sea la realización de pruebas en pequeñas instalaciones piloto, operadas en condiciones similares a las de la instalación definitiva.

Por último, la presencia en el agua a tratar de distintos elementos que pueden plantear problemas a las membranas desde el punto de vista físico, se pueden detectar mediante métodos visuales o de medida.

La presencia de algas microscópicas o materia orgánica, principalmente ácidos fúlvicos y húmicos, determina un color determinado del agua, que va desde el tono verdoso en el primer caso a los tonos pardos del segundo.

6.4. Filtración

La sensibilidad de las membranas a los elementos sólidos del agua es elevada, por lo que el proceso de filtración o separación de los mismos debe ser muy exigente. Ello obliga a establecer una serie de etapas más o menos complejas pero que en esencia responden a dos conceptos principales:

— Filtración grosera.

— Filtración de afino.

La primera trata de hacer una separación de materiales de tamaños y estructuras determinadas, mientras que la segunda llega a separaciones del tamaño micrométrico.

Empleados tanto de forma individual como conjunta los equipos que normalmente se utilizan son:

— Filtros de arenas.

— Filtros de cartuchos y bujías.

— Filtros de precapa.

— Filtros especiales.

6.4.1. Filtración sobre arena

Con este nombre genérico se conocen los filtros que constan de una o más capas de material filtrante, sean o no de arena, pues en muchos casos más que de arenas se trata de distintos materiales de granulometría variable, que se colocan en capas de distinto espesor, unos sobre otros.

En ellos se introduce el agua por la parte superior y va percolando más o menos lentamente a través de las distintas capas, para recogerse el agua filtrada por la parte inferior. La velocidad de filtración depende de varios factores como:

— Presión aplicada.

— Granulometría utilizada.

— Profundidad de la capa o capas de material.

Los filtros que se utilizan pueden ser tanto depósitos abiertos como cerrados, y en ellos se deposita un material poroso que actúa a modo de medio filtrante. Ello determina los dos sistemas fundamentales de filtros de arena existentes, abiertos o de gravedad y cerrados o de presión.

Pero además, por la forma en que se realiza el proceso de filtración, puede hablarse de filtración lenta y rápida.

Los filtros lentos utilizan velocidades de filtración muy bajas, 0,1-0,4 $m^3/m^2 \cdot h$, lo que determina mayores necesidades de espacio para su instalación. Son más fáciles de operar y se limpian solamente con agua a contracorriente.

Los filtros rápidos funcionan a velocidades más elevadas que varían entre los 5 a 7,5 $m^3/m^2 \cdot h$ para los filtros de gravedad y 7 a 12 $m^3/m^2 \cdot h$ para los filtros de presión. Estos valores, sin embargo, no son definitivos y pueden aumentar cuando el agua a tratar no es demasiado sucia. La filtración rápida es más eficaz, aun-

que puede ser preciso realizar la floculación-coagulación para conseguir un buen rendimiento. En las instalaciones de ósmosis inversa sólo se emplean los filtros rápidos.

En los *filtros abiertos*, constituidos por un depósito de forma rectangular, la altura de la columna de agua necesaria para efectuar la filtración es de 1-1,5 m y por ello la velocidad de filtración no es tan elevada.

En la parte inferior llevan un falso suelo en el que se disponen una serie de boquillas uniformemente repartidas para recoger el agua filtrada, que se almacena en un depósito situado en la parte inferior de los filtros y desde él se vuelve a bombear hacia la siguiente fase del proceso de desalación. En algunos casos se prescinde del citado depósito y el agua va a parar a un colector del que aspira la bomba.

Uno u otro diseño dependen de las condiciones topográficas del terreno en relación a la captación de agua y del espacio disponible.

Los *filtros de presión* empleados en las instalaciones de ósmosis inversa trabajan a 3,5-7,5 kg/cm^2 y pueden ser verticales u horizontales.

Son unos depósitos generalmente metálicos y en ocasiones plásticos, cuyo tamaño viene limitado por el precio y la resistencia de los materiales que se emplean. En su parte inferior se colocan, al igual que en los filtros abiertos, unos colectores o placas con boquillas que recogen el agua que atraviesa en forma descendente el material filtrante.

La filtración en los filtros verticales es más uniforme que en los horizontales, puesto que en los primeros el espesor del lecho filtrante es el mismo en toda la superficie del filtro, mientras que en los horizontales puede ser mayor en el centro que en los bordes.

Por ello debe estudiarse la altura de colocación de los colectores o placas en su interior, para evitar la creación de caminos preferentes de flujo que pueden empeorar la calidad del filtrado.

El espesor de la placa de que se construye el filtro influye en gran medida en el coste de éste, y como dicho espesor depende de la presión que debe resistir el filtro, que a su vez es proporcional a su diámetro, no deben rebasarse determinados diámetros para no encarecer su precio.

Los diámetros más grandes que se utilizan están entre los 3,5 y 4 m.

Tampoco conviene hacerlos demasiado largos, por los problemas de manipulación, transporte y soldadura que se presentan, no rebasándose generalmente en los filtros horizontales los 20 m.

Los filtros verticales se construyen con la misma limitación de diámetros que los horizontales, siendo sus dimensiones normales de 1,5 a 4 m de alto y diámetros de 1 a 3,5 m.

Las mayores velocidades de filtración de los filtros de presión hace de ellos los preferidos, sin embargo, debido a la limitación del tamaño en grandes instalaciones, para evitar un excesivo número de filtros y la complicación de los numerosos colectores y válvulas de interconexión y funcionamiento de todos ellos, también se suelen utilizar filtros abiertos.

Materiales filtrantes

Aunque con aguas sin demasiados problemas de turbidez, como suele ser el caso de las tomas de agua en pozo, una simple capa de arena es suficiente, cuando el agua es más problemática, para mejorar las características del filtrado se emplean filtros multicapa, formados por varias capas de materiales distintos, cuya selección requiere la realización de las correspondientes pruebas.

En estos casos suele haber al menos una o más capas de grava de distinta granulometría, que se colocan en la parte inferior del filtro y sobre ellas se van colocando las sucesivas capas de distintas arenas.

También se emplean otros materiales como granate, green sand, etc. y generalmente en la parte superior se deposita una capa de antracita. Esta es mucho menos pesada que la arena y de mayor porosidad.

El tamaño medio de estos materiales más usados son; antracita 0,8-1,2 mm, arena 0,5-0,8 mm, granate 0,4-0,6 mm y magnetita 0,3-0,4.

La granulometría de los materiales de filtración se determina mediante el cernido a través de mallas de un tamaño determinado, y viene definida por dos parámetros:

— *Tamaño efectivo.* Corresponde a un tamaño del tamiz tal que el 10 % de las partículas pasan a través del mismo y el restante 90 % no; es decir, que el 10 % en peso de los granos son menores que él y el 90 % mayor.

— *Coeficiente de uniformidad.* Es la relación entre el tamaño de grano del que la muestra tiene un 60 % más fino que él y aquél en que la muestra tiene un 10 % más fino que él.

Así como en los filtros lentos la arena suele tener un tamaño efectivo de grano de 0,35 mm, para filtros rápidos las arenas deben ser lógicamente más gruesas, aunque inferiores a 2 mm, con un coeficiente de uniformidad variable entre 1,3 y 1,6.

En tomas en pozo son frecuentes granulometrías de 0,8 a 1,2 mm, pero a medida que las condiciones del agua van empeorando se requieren materiales filtrantes más estudiados e incluso se recurre con frecuencia a los filtros multicapa, formados por dos a cuatro capas de granulometría y materiales diferentes.

Cuando se utiliza una segunda capa, la antracita es el material preferido. Más porosa y angulosa que la arena, elimina las partículas más gruesas eficaz-

mente y permite el paso de las partículas más delgadas a las capas de arena más profundas.

Algunos diseños incluyen un tercer medio para aplicaciones especiales como el granate y otros materiales. Más fino y denso que la arena se coloca en el fondo.

Cuando se coloca una capa más gruesa sobre el lecho filtrante, se eliminan mejor las partículas más grandes, permitiendo una penetración más profunda y uniforme de las partículas más pequeñas. De esta forma aumenta el caudal de 1,5-3 $l/m^2 \cdot h$ a 6-8 o valores superiores.

Esta disposición permite una mejora de las características de la filtración de una instalación ya existente, reemplazando por ejemplo los 5-15 cm superiores por unos 15-20 cm de antracita.

Sin embargo todos estos valores son aproximados, pues lo más correcto es determinar *in situ* mediante pruebas piloto la granulometría adecuada para conseguir bajar el índice SDI a 5. Los caudales de los filtros de gravedad varían de 3 a 6 $l/m^2 \cdot h$. La máxima altura es de 3,6 m.

Cuando los filtros se atascan con demasiada frecuencia, pueden también mejorarse utilizando materiales más gruesos de 1-2 mm y profundidades de 1,2-2,4 m.

Sistemas de lavado

Cuando el filtro se ensucia, es decir los huecos del material filtrante se obstruyen a causa de las partículas que arrastra el líquido que se filtra, es necesario proceder a su limpieza.

En las instalaciones desaladoras la limpieza se realiza cuando las pérdidas de carga a través del filtro alcanzan una pérdida de carga determinada, generalmente 0,5-1 kg/cm^2 en los filtros a presión y 0,3-0,8 kg/cm^2 en los filtros abiertos.

Sin embargo, en las instalaciones más pequeñas sin demasiados automatismos y equipos de control, también se puede hacer cada cierto tiempo fijado previamente, en función del conocimiento que se tiene sobre el agua, o incluso analizando la turbidez a la salida.

La limpieza consiste en la recirculación del agua en sentido contrario al de la filtración, aplicando un caudal de agua, superior al de ésta, que permita la expansión del medio poroso en un 15-20 %, para que los sólidos se remuevan y desprendan de las partículas y sean arrastrados por la corriente de agua.

Este sistema se conoce como lavado a contracorriente (backwashing).

Los caudales de lavado que se emplean son variables en función del material utilizado entre los 8-11 $l/m^2 \cdot h$ para arena y los 5-8 $l/m^2 \cdot h$ para la antracita.

Aunque en los filtros pequeños, con un solo material filtrante, se emplea por su sencillez y economía solamente este sistema de lavado; con él no se consigue la suficiente agitación de los granos del medio filtrante para separar las partículas retenidas.

El lavado a contracorriente sirve para reclasificar los materiales en los filtros multicapa, dejando las partículas más grandes pero menos densas en la parte superior y las menores pero más densas abajo.

Pero como se vio que este sistema de lavado planteaba problemas en el caso de utilizar un solo medio filtrante, puesto que al final aparecían los granos más finos arriba y los más gruesos abajo; se empezó a utilizar también el aire, de forma que al final los materiales quedaran sin clasificar manteniendo su capacidad de retención. En la actualidad este sistema se emplea en todas las instalaciones de filtración de un cierto nivel.

Para realizar el lavado se precisa una bomba para el agua y una soplante para el suministro de aire. En las instalaciones grandes, con objeto de unificar equipos y ahorrar en repuestos, se suele instalar como bomba de lavado de filtros una igual a las de la toma de agua de alimentación a la planta.

Para esto es necesario establecer líneas de producción en el diseño, de forma que cada línea esté formada por una bomba de captación, un filtro de arena, uno o más filtros de cartuchos, un equipo de alta presión y el bastidor correspondiente.

Si ésta no fuera la distribución, sería necesario dimensionar una bomba de lavado, distinta de las de captación, que se adaptase a la capacidad de los filtros.

Como agua de lavado debe utilizarse siempre que sea posible agua filtrada, por lo que los filtros deben dimensionarse para que durante la parada por limpieza de uno de ellos, los restantes puedan filtrar no sólo el caudal de éste, sino el necesario para la limpieza del mismo. Ello implica además diseñar los colectores adecuados para poder realizar esta operación.

Cuando la captación de agua está alejada de la ubicación de la planta, suele colocarse un depósito intermedio de regulación desde el que se toma el agua de alimentación a la planta. En estos casos la bomba de lavado debe ser igual a la de transferencia y se coloca junto a éstas, tomando el agua del depósito citado.

También se puede utilizar como agua de lavado la salmuera de la ósmosis, que es un agua muy limpia, antes de su vertido.

En las instalaciones de agua de mar para poder realizar este lavado se necesita una arqueta en el trayecto de la tubería de eliminación de la salmuera, desde la que se toma con una bomba el agua para el lavado. Con esta solución se ahorra la impulsión del agua de lavado desde largas distancias.

Parámetros de diseño

Un filtro viene definido fundamentalmente por las velocidades de filtración y a partir de ellas se determina la superficie filtrante.

Como el coste de un filtro es función de la superficie filtrante, el diseño debe tratar de conseguir la mayor producción sobre la menor superficie, pero ello implica un profundo conocimiento del tipo de agua a filtrar y de su variación en el tiempo, y la adecuada elección del medio o los medios filtrantes.

El objetivo final es conseguir un filtro que proporcione un agua que responda a las características exigidas, que los ciclos de funcionamiento sean lo más largos posibles, y que una vez que se ensucia u obstruye, el lavado del mismo permita recuperar sus condiciones de funcionamiento.

Deben tratar de prolongarse los períodos entre lavados, pero siempre que sean compatibles con la calidad buscada de permeado. El prolongar innecesariamente los ciclos de lavado puede ocasionar problemas en el funcionamiento de los filtros, y aumentar el consumo energético como consecuencia del incremento de las pérdidas de carga.

Pero además en el caso de la ósmosis existen algunos inconvenientes, especialmente en dos situaciones frecuentes que pueden presentarse:

— En los casos de contaminación orgánica, puesto que el material filtrante puede ser un excelente medio de cultivo que incremente la proliferación bacteriana, sobre todo si además se emplean polímeros en la coagulación.

— En presencia de hierro, dado que al bajar el nivel de oxígeno en el agua se puede producir una reducción del ión férrico, soluble, a ión ferroso, insoluble, que atravesaría los filtros de arena e incluso los de cartuchos y podría alcanzar las membranas.

Los ciclos cortos incrementan a su vez los costes de operación de la instalación, ya que obligan a poner fuera de servicio constantemente alguno de los filtros, con el consiguiente consumo de energía y productos.

La optimización resulta ciertamente difícil, sobre todo en el caso de tomas abiertas, puesto que las características del agua pueden variar bastante a lo largo del año o incluso del día, y lo que es más importante, no se conocen con total precisión hasta que la instalación empieza a funcionar.

Todos estos filtros granulares realizan la separación de sólidos de dos formas:

— En la superficie, a través del medio filtrante más fino situado en la parte superior del filtro.

— En profundidad, al quedar retenidos los sólidos en los huecos del interior de la capa filtrante, aún cuando en muchas ocasiones es una mezcla de ambos.

Cuanto mejor sea la distribución de sólidos retenidos a lo largo de la profundidad del medio mejor es el efecto de filtración y mayores son los periodos de funcionamiento de los filtros sin recurrir al lavado.

El diseño del filtro debe conseguir que la filtración en profundidad sea la predominante. Por tanto en el diseño deben analizarse cuatro aspectos principales:

— Tipo de medios filtrantes.

— Granulometría del medio filtrante.

— Velocidad de filtración.

— Espesor de las capas filtrantes.

Si el filtro es el adecuado, al trabajar a caudal o presión constante la curva de pérdidas de carga es lineal. Si se toman datos de las pérdidas de carga de un filtro en funcionamiento se obtienen curvas como las de las siguientes figuras:

— La 6.4, que tiene una pendiente uniforme, corresponde a un filtro en el que predomina fundamentalmente la filtración en profundidad.

— En la 6.5, por el contrario, la filtración es de tipo superficial. La curva es de tipo exponencial y los sólidos son retenidos rápidamente por el material más fino depositado en la parte superior del filtro.

Para las instalaciones grandes es conveniente construir previamente un filtro piloto que ayude en el diseño.

En una instalación ya existente, el operador debería con los datos de la misma confeccionar estas curvas que le permitirán conocer si la filtración es correcta o no. Si la curva obtenida es del segundo tipo es conveniente reemplazar la capa superior por otra de material más grueso, para permitir que los sólidos penetren en la masa filtrante, pues de lo contrario acaba formándose una capa compacta superfi-

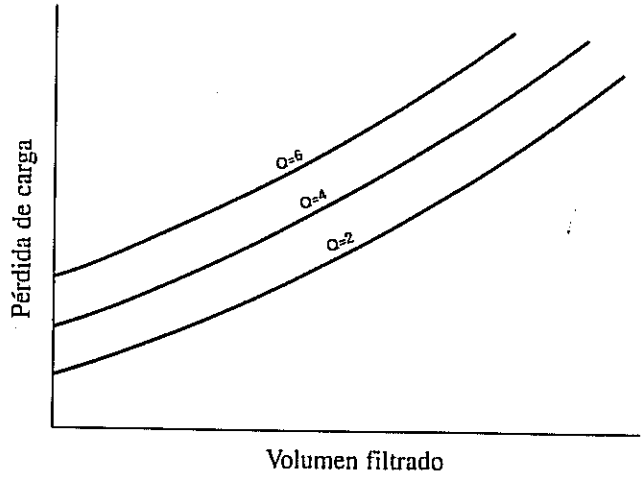


Figura 6.4. Curva de pérdidas de carga de un filtro en profundidad.

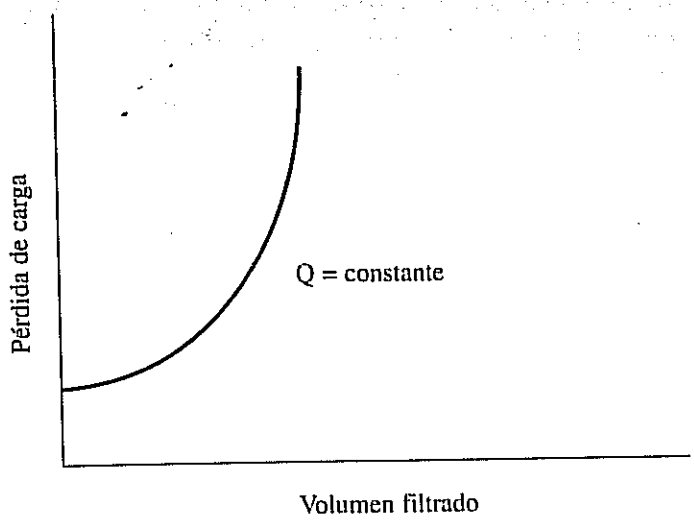


Figura 6.5. Curva de pérdidas de carga superficiales.

cial. En dichos casos aumenta la pérdida de carga de manera significativa y para mantener los caudales es necesario aumentar la presión de funcionamiento.

Respecto al medio a utilizar, el material más empleado ha sido tradicionalmente la arena silícea, pero en el proceso de lavado, y más si éste es frecuente, se produce como ya se ha dicho una reclasificación de las partículas, de forma que las más finas quedan en la parte superior del filtro.

Como consecuencia, los sólidos en suspensión son retenidos en la parte superior del filtro llegando a formar una capa compacta de difícil penetración. Para resolver esto se pueden seguir varios caminos:

— Seleccionar un material muy uniforme, de coeficiente de uniformidad muy bajo, menor que 1,7. Cuanto menor sea este coeficiente más difícil resulta su selección y por tanto es más caro.

— Seleccionar dos materiales, de forma que el más grueso se coloque en la parte superior del filtro.

Esta última solución ha dado lugar a los filtros multicapa tan frecuentes en las instalaciones desaladoras.

La elección de las distintas capas no debe hacerse aleatoriamente, sino que deben buscarse ciertas relaciones entre ellas, de forma que en el proceso de lavado no surjan problemas de mezcla de los materiales.

Como al lavar con agua y aire en la primera fase se requiere que se produzca una expansión del lecho filtrante, ello obliga a unas velocidades del aire y agua del lavado que son distintas en función del material de que se trate. En esta fase, para conseguir el desprendimiento de las partículas atrapadas en el medio filtrante, se debe producir una agitación y fluidificación del mismo, que obliga a tratar de mantener una relación entre los tamaños de los distintos lechos utilizados.

Existen distintas tablas confeccionadas al efecto que ayudan en dicha selección, en las que además se tiene en cuenta el efecto de la temperatura.

Existe una velocidad óptima de fluidificación para cada material y dentro de éste para cada tamaño de material.

Como la densidad de los diferentes materiales es distinta, en los filtros las velocidades de lavado nunca son las óptimas y en el diseño debe buscarse aquella que mejor se adapte al conjunto de capas filtrantes del mismo.

El segundo aspecto a considerar es el espesor de la capa filtrante, que es todavía más complicado que lo anterior, dado que no existe un método preciso para su determinación y por ello se recurre frecuentemente a pruebas en pequeñas instalaciones piloto. Espesores que se usan normalmente para las distintas capas son:

— Antracita: 45-60 cm.

— Arena silícea: 35-45 cm.

La limpieza con aire *(air scour)* se realiza para mejorar la efectividad del lavado a contracorriente y reducir el caudal de agua de lavado.

El aire, al agitar los granos, provoca el desprendimiento de las partículas retenidas que son posteriormente arrastradas por el agua a contracorriente.

Es necesario regular adecuadamente el suministro de aire para que no se produzca el arrastre del medio filtrante.

El aire se introduce por la parte inferior del filtro, bajo el falso fondo y las velocidades normalmente utilizadas son de 18-27 $m^3/m^2 \cdot h$ mientras que la del agua es de unos 18 $m^3/m^2 \cdot h$.

En filtros de diseños especiales, recientemente desarrollados en Estados Unidos el caudal de aire es de 54,6-90 $m^3/m^2 \cdot h$ y el de agua de 36-54,6 $m^3/m^2 \cdot h$.

En los sistemas de filtración más frecuentemente empleados en las instalaciones de desalación las velocidades de diseño están comprendidas entre 8 y 11 m/h ($m^3/m^2 \cdot h$).

El tamaño de diseño de los filtros es tal que cuando se lava uno de ellos mientras los demás siguen funcionando, filtrando el caudal total, la velocidad asciende a 12-13 m/h.

Filtración doble sobre arena

En ocasiones la filtración sobre la arena no es suficiente para llegar a los niveles exigidos a la misma, NTU de 1 y SDI igual o inferior a 5, o los filtros se obstruyen con demasiada rapidez. En estos casos se recurre a una segunda etapa de filtración de las mismas características.

Los filtros son de los materiales y medios filtrantes descritos anteriormente, aunque suelen ser distintos los de la primera y los de la segunda etapa al menos en

la granulometría y también las velocidades de filtración, superiores en esta segunda etapa.

A una velocidad de 8 a 10 m/h de la primera siguen 14-18 en la segunda, con lo que la velocidad del agua en el lavado puede ascender hasta 24 m/h.

Si los filtros son de un único medio filtrante como la arena, una granulometría frecuente en la primera etapa es de 0,8-1,2 mm y de 0,5-0,7 mm en la segunda.

En las tomas de agua abiertas donde las algas y materia orgánica abundan, son frecuentes este tipo de filtros, siendo conveniente una mayor superficie de filtración en la primera que en la segunda etapa.

Esta disposición prolonga el periodo de funcionamiento ininterrumpido de los filtros y por tanto de la instalación.

Selección de filtros de arena

El primer aspecto a considerar es el tipo de filtro a instalar, es decir, abierto o cerrado.

Aunque según los casos pueden conseguirse velocidades de filtración bastante parecidas entre unos y otros, existen dos aspectos que influyen de manera importante en dicha selección:

— El espacio o la superficie disponible.

— El tamaño de los bastidores.

Respecto al primero, con los filtros abiertos de forma rectangular se aprovecha mejor el espacio, y además permiten tamaños mayores, que por consiguiente reducen el conjunto de colectores, válvulas y mecanismos que no sólo dificultan la operación del sistema, sino que lo encarecen y crean numerosas servidumbres y espacios muertos.

Sin embargo los filtros abiertos no tienen mucho sentido, si no es a partir de unas dimensiones mínimas de unos 15 m^2 de superficie filtrante, por las dificultades constructivas del hormigón.

Por otra parte, considerando importante disponer de líneas de producción completas e independientes, formadas por filtros, turbobombas y bastidores de membranas, la capacidad del bastidor determina la superficie filtrante requerida, que de acuerdo con las dimensiones citadas más arriba contribuyen también a precisar qué filtro se ha de montar.

En cuanto a la elección entre filtros de presión horizontales o verticales la menor capacidad de estos últimos los reservará para las instalaciones más pequeñas, con caudales máximos de 75 m^3/h por filtro. Considerando además el menor espacio ocupado por ellos, en muchos casos tratándose de bastidores únicos será preferible instalar dos o tres filtros verticales en paralelo, que uno horizontal de capacidad equivalente.

6.4.2. Filtración sobre cartuchos

Son imprescindibles en las instalaciones de ósmosis inversa, pues los filtros que hemos citado anteriormente sólo alcanzan un nivel de filtración grosera, insuficiente para las membranas.

Con la filtración de cartuchos o bujías se consigue la eliminación de partículas de pocas micras. Constituyen una filtración de afino para protección de las membranas desaladoras.

El nivel de filtración al que hay que llegar es de 5 micras, pues éste es el valor que imponen los fabricantes de membranas, como condición indispensable para garantizar el funcionamiento continuo de éstas. En ocasiones se puede incluso descender hasta un nivel de filtración de 1 micra. Los cartuchos que constituyen el elemento filtrante están formados por un alma o eje hueco, con perforaciones laterales, sobre el que se enrolla un hilo, que es el que garantiza el tamaño de poro acorde con las características de separación del filtro.

Dicho tamaño se logra con una selección del espesor del hilo, el tipo de enrollamiento y la tensión o presión que se aplica al mismo.

El eje debe ser de un material resistente a la corrosión, por lo que según los casos se emplean productos plásticos como PVC o aceros inoxidables 316-L o de alto contenido en Molibdeno según la aplicación se haga en aguas salobres o de mar.

Las dimensiones de estos cartuchos son variables en longitud entre 0,25 m que constituye la unidad tipo y 1,25 m (quíntuple), pero pueden construirse a medida, según sean las necesidades del diseño del filtro.

Las velocidades medias de filtración que se establecen son de 2 a 3 m^3/h por cartucho de 1 metro de longitud 2 ½" de diámetro.

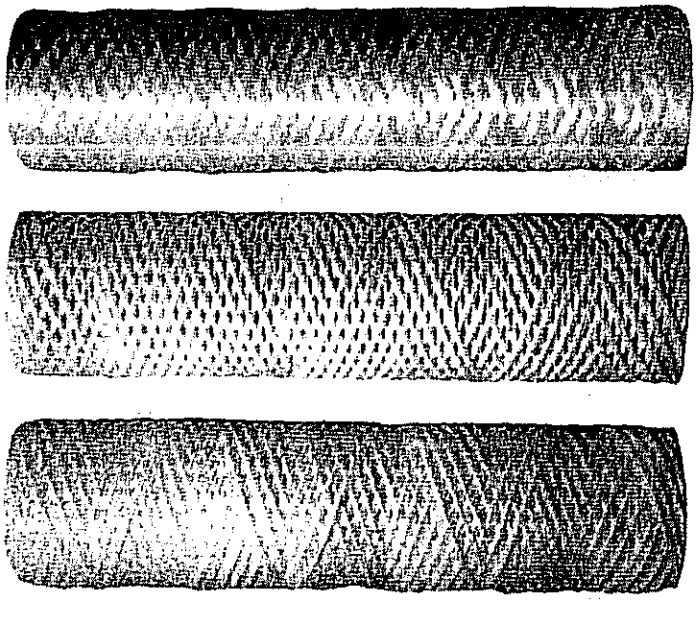


Figura 6.6. Cartuchos.

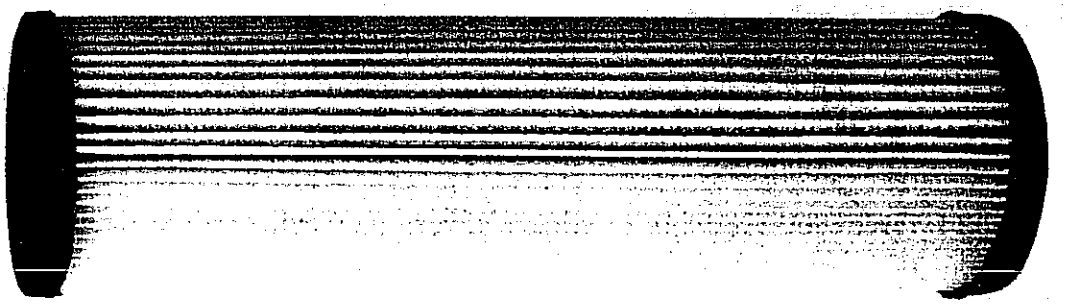


Figura 6.7. Cartucho plegable.

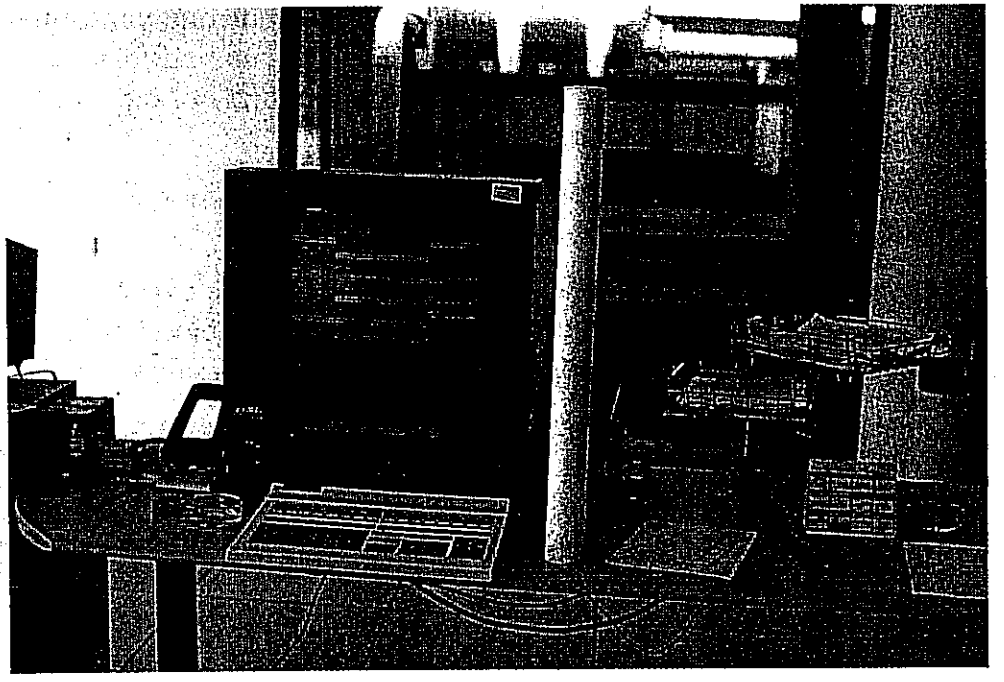


Figura 6.8. Cartuchos especiales.

Las partículas retenidas por los cartuchos incrementan las pérdidas de carga del mismo, por lo que cuando se alcanza un valor determinado se procede a su sustitución, puesto que éstas no se desprenden fácilmente, como ocurre con otros filtros. Desde su relativamente reciente aparición en el mercado cada vez se utilizan más los filtros plegables. Su mayor superficie filtrante les permite, en igualdad de circunstancias, disminuir las pérdidas de carga o lo que es lo mismo, aumentar el tiempo de funcionamiento ininterrumpido.

Desde otro punto de vista con este tipo de filtros y considerando una velocidad fija de filtración, normalmente inferior a 3 m/seg, se precisa menor número de unidades para realizar el filtrado de un determinado caudal, que con filtros de hilo enrollado normales. De esta forma se puede abaratar la instalación, ya que además los depósitos dentro de los que van los correspondientes cartuchos también serán

menores. La relación entre los tiempos de funcionamiento ininterrumpido de dos cartuchos de distinta superficie filtrante es de la siguiente forma:

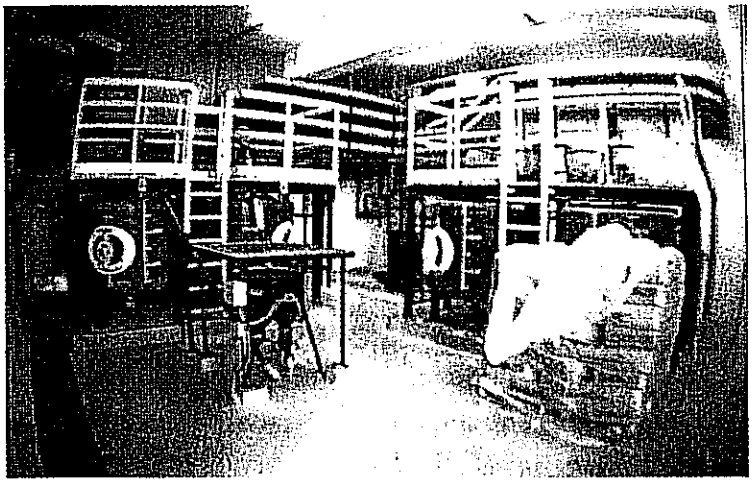
$$T_1 / T_2 = (A_1 / A_2)\ n$$

También existen en el mercado filtros en que el cartucho está constituido por un material plástico esponjoso.

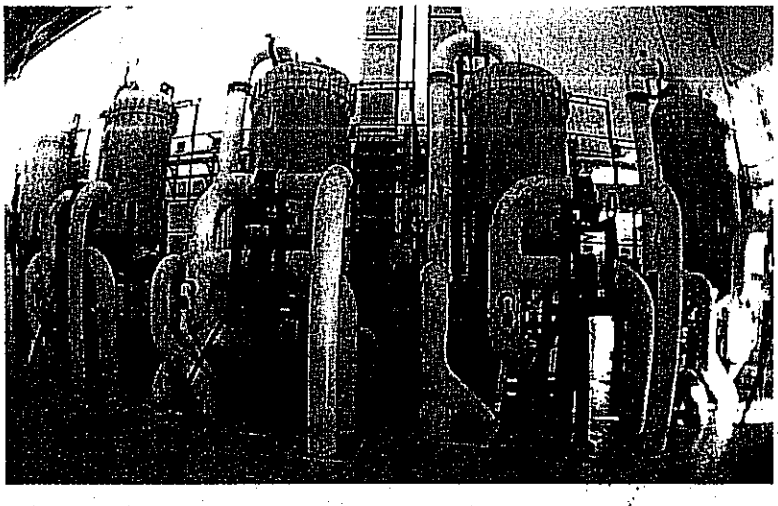
6.4.3. Filtración sobre precapa

Se ha desarrollado fundamentalmente en la industria alimentaria, química y farmacéutica que requieren permeados de gran calidad y en abastecimientos urbanos con aguas de baja turbidez.

Aunque no son frecuentes en las instalaciones de desalación, el alto nivel de filtrado que se consigue mediante el sistema permite ser considerado en el diseño de instalaciones problemáticas en cuanto a la calidad del agua a tratar y de suficiente tamaño para permitir el complejo mantenimiento que conlleva.



a)



b)

Figura 6.9. Equipo de filtros de precapa de presión.
a) Cubas de preparación de la precapa. b) Filtros.

Consiste en esencia en una filtración mixta, en la que se utiliza como elemento soporte un sustrato que puede ser tanto de forma tubular como de hoja o lámina, sobre el que se deposita una capa o lecho filtrante de muy poco espesor (3-5 mm), que refuerza la acción de filtrado. Esta capa, que puede ser de distintos materiales, siempre muy finos, actúa de barrera protectora del soporte filtrante, prolongando la duración del mismo, los ciclos de filtración y permitiendo en definitiva un aumento de la producción. El sustrato es de hilo enrollado, malla de fibra enrollada, o una lámina porosa.

El material debe ser inerte para que no interfiera químicamente con los distintos componentes del agua, dado que lo que se pretende de él es una acción física y no química. Su pequeño tamaño y espesor impide que quede muy comprimido sobre el soporte, ofreciendo al mismo tiempo un gran volumen de huecos que favorece la filtración.

En el proceso de filtración, el agua, con los elementos sólidos en suspensión, se encuentra en primer lugar con la superficie de la precapa que actúa a modo de filtro superficial, eliminando las partículas de mayor tamaño que el de los poros del material. A continuación penetra en la barrera que actúa como un filtro en profundidad que por tanto llega a separar partículas de menor tamaño que los citados poros.

Por último el agua llega al material soporte que constituye el último escalón de la filtración.

Se emplean como filtros de afino, después de los filtros de arena y anteriores a los filtros de bujías o cartuchos, con objeto de que si se produce algún desprendimiento de la precapa, sea retenida por los cartuchos y no llegue a las membranas.

Materiales

El más usado es la diatomea, que se produce a partir de depósitos fósiles de esqueletos microscópicos de animales y plantas, conocidos como tierras de diatomeas. Se trata de partículas irregulares y angulosas de una gran variedad de formas y tamaños, que forman un medio muy poroso, que facilitan la retención de impurezas.

Sus dimensiones pueden ser variables dado que los suministradores de este material hacen separaciones de partículas de distintos tamaños; así se pueden encontrar diatomeas de tamaño muy fino: 4-6 micras, mediano: 20-40 micras y otros.

También se utilizan otros materiales como la perlita, obtenida a partir de cenizas volcánicas, el carbón activo, y distintos polímeros sintéticos, que aunque más caros, responden mejor a las exigencias de cada caso, dado que permiten obtener una gradación de granulometrías mucho más precisa.

En la selección del material de la precapa hay que buscar un equilibrio entre calidad del filtrado y longitud de los ciclos. La calidad del producto es función del tipo, tamaño, y superficie de la precapa. Cuanto más fino es el material de la precapa más calidad tiene el producto pero antes se obstruye y por tanto mayor es la pérdida de carga a su través. En general debe elegirse el material más grueso que proporcione la calidad requerida.

La mejor forma de selección es hacer una prueba en laboratorio o *in situ*. Para ello se toma una muestra del agua a tratar y se filtra a través de una capa de 10-15 mm del material filtrante, analizando el producto obtenido y el tiempo del ciclo de ensuciamiento.

En ocasiones se puede colocar una segunda precapa sobre la primera para mejorar su eficiencia. Esta segunda capa permite la utilización de los filtros de precapa como protectores de la instalación en circunstancias de toma de agua complicada, como pueden ser las tomas abiertas con potencial contaminación de aceites, petróleo o vertidos.

Como la precapa constituye el último material en contacto con el agua y por tanto con los elementos que ésta contiene, es importante también conocer los fenómenos que se producen en esa interfase como consecuencia de las cargas eléctricas.

La mayor parte de los sólidos en suspensión tienen cargas eléctricas superficiales negativas. Cuando estas partículas se filtran a través de un medio que tiene cargas del mismo signo, las fuerzas que rigen el transporte de las partículas hacia el medio filtrante tienen más dificultades para realizar este movimiento, debido a las fuerzas de repulsión que existen entre ambos.

Si esto ocurre pueden utilizarse reactivos químicos que son capaces de cambiar la carga superficial de las partículas o de la precapa.

Tipos de filtros

Hay dos tipos principales de filtros de precapa:

— de presión, y

— de vacío.

El filtro de presión es un depósito cerrado, similar al filtro de cartuchos, en los que estos actúan de soporte sobre el que se deposita la precapa. El filtro está por tanto en la impulsión de la bomba de precapa.

El filtro de vacío es un depósito rectangular abierto, sobre el que se colocan unas láminas que son en este caso el soporte. El filtro se coloca en la aspiración de la bomba de precapa, de forma que la aplicación se realiza al aspirar ésta el fluido que contiene la precapa.

La capa de partículas retenida en los filtros abiertos está siempre a presión inferior a la atmosférica mientras que en los filtros de presión está sometida a una presión superior a la atmosférica.

La limpieza de los filtros abiertos se hace manualmente y solamente es necesaria una bomba pequeña. Para la limpieza de los filtros de presión es necesario romper la precapa con aire y además son necesarios un mayor caudal y bomba. Como no se puede acceder al interior del filtro de presión, la operación de limpieza es

más complicada y debe ser más precisa. El depósito de presión también es más caro que el abierto.

Sin embargo, a pesar de esos inconvenientes en las instalaciones de ósmosis inversa se prefieren, si son necesarios, los filtros de presión, debido a que el filtro abierto tiene una limitación en cuanto a la máxima pérdida de carga que puede soportar. Puesto que está en la aspiración de una bomba, la pérdida de carga tolerada es la carga positiva del depósito del que recibe la precapa, más la altura máxima de aspiración de la bomba correspondiente.

No ocurre lo mismo en los filtros de presión, y ésta es su principal ventaja sobre los otros, pudiendo controlar la pérdida de carga hasta los niveles que se consideren convenientes para cada instalación.

Los valores de velocidad de diseño son parecidos a los de los filtros de cartuchos, pues en realidad se trata de variaciones sobre el mismo.

6.4.4. Filtros especiales

Se trata de una serie de filtros que están apareciendo en el mercado y que utilizan materiales nuevos como elementos de filtración.

Podemos citar como más significativos dentro del tipo filtro de arena o multicapa, los que emplean como material filtrante un material polimérico en forma de microgranos o bolas a las que se agrega algún aditivo que les confiere propiedades especiales puesto que a la vez realizan una filtración en función de su granulometría, y una retención electroquímica de determinado tipo de partículas coloidales en función de su carga o afinidad química.

Asimismo, entre el tipo de filtros de afino podríamos citar:

— los filtros de placas, constituidos por un conjunto de dobles placas circulares o rectangulares conectadas a un eje vertical o colector horizontal, al que pasa el agua que tras atravesar las placas circula por el interior de éstas, y

— los filtros de polipropileno extruido, que suponen una mejora de los tradicionales de cartuchos que en lugar de hilos enrollados están formados por una masa compacta de microfibras que les confiere una gradación en la densidad del material y un máximo volumen de huecos, que permite asegurar un recorrido interior en la masa del material muy sinuoso, realizando una filtración en profundidad, en lugar de la superficial de los citados cartuchos.

6.5. Filtración natural

Es la que se produce por el paso del agua a través de los distintos estratos del terreno. Su calidad depende de las características del terreno en el que se realiza la captación.

Es el sistema de filtración ideal por bajo coste y la buena calidad general del filtrado, puesto que cuando se realiza a través de pozos profundos el SDI que se obtiene suele ser igual o inferior a 1.

En pozos superficiales pueden producirse arrastres del terreno o aportaciones de aguas de otros niveles, que en muchos casos aportan además contaminantes orgánicos, por lo que deben protegerse mediante la instalación de un forro o tubería que recubra interiormente las paredes del pozo. Dicho forro suele ir ranurado en su parte inferior para facilitar la entrada de agua de los niveles más profundos, que son los que normalmente aportan agua de mejor calidad.

Este tipo de filtración es más frecuente en las aguas salobres obtenidas a partir de acuíferos subterráneos.

En el caso de las tomas de aguas de mar la distancia del pozo a la costa puede influir en el grado de filtración que se obtiene.

6.6. Floculación-coagulación

Cuando el tratamiento a través de un medio filtrante es insuficiente, antes de pasar el agua a desalar por el filtro de cartuchos es preferible recurrir a la coagulación-floculación en línea; de hecho todas las instalaciones de una cierta importancia llevan incorporados equipos para poder realizar este tipo de proceso.

La coagulación tiene por objeto desestabilizar las partículas en suspensión y facilitar su aglomeración. Se realiza mediante la inyección y dispersión rápida de los productos químicos. La floculación tiene por fin favorecer, mediante una mezcla lenta, el contacto entre las partículas desestabilizadas.

Estas partículas se aglutinan para formar un flóculo que puede eliminarse fácilmente por decantación o filtración.

Aunque estos dos procesos se citan conjuntamente y a veces crean confusión, al hablar de coagulación nos referimos a una serie de operaciones químicas y mecánicas mediante las cuales se aplican los coagulantes y estos ejercen su acción.

Estas operaciones normalmente implican dos fases distintas.

a) Mezcla, durante la cual el coagulante aplicado se dispersa rápidamente en el agua tratada mediante una agitación violenta, y

b) Floculación, que es la agitación del agua a menores velocidades y durante periodos más largos, durante los cuales surgen pequeñas partículas que se aglomeran en flóculos perfectamente definidos y de suficiente tamaño para sedimentarse.

Ambos términos se refieren, pues, tanto a procesos químicos como físicos.

El objetivo de la coagulación, que es la desestabilización de los coloides, se consigue en cuatro etapas:

a) Compresión de la doble capa que rodea a los coloides.

Como es conocido, cuando partículas coloidales parecidas se acercan, sus capas difusas reaccionan y generan una fuerza de repulsión.

Cuando la distancia entre las partículas es superior a un valor crítico L dominan las fuerzas de repulsión sobre las de atracción de Van der Waals, por lo que se mantienen en movimiento. Las partículas cuya energía cinética es suficiente para superar el potencial de repulsión se aglomeran, mientras que las otras permanecen dispersas.

Aumentando la fuerza iónica del agua se disminuyen las fuerzas de repulsión y se comprime la capa difusa hacia la partícula. En la zona situada cerca de ésta, las fuerzas de Van der Waals son bastante importantes para neutralizar la fuerza de repulsión.

b) Neutralización de sus cargas superficiales, debido a las fuerzas de Van der Waals.

c) Agrupación de las partículas en un precipitado, para lo que previamente se desestabilizan los coloides formando un flóculo, que posee carga positiva cuando el pH está entre ácido y neutro. Esto requiere añadir una cantidad suficiente de coagulante.

Los coagulantes más usados son distintas sales de hierro y aluminio, pero por la sensibilidad de las membranas a este último, en el caso de la ósmosis inversa suelen emplearse coagulantes de hierro, generalmente cloruro férrico.

Se pensaba que las sales liberaban estos iones que a su vez neutralizaban la fuerza de repulsión entre las partículas coloidales y favorecían así la coagulación.

Sin embargo se ha comprobado que el mecanismo es más complejo y que los productos de la hidrólisis de dichas sales de aluminio y hierro son incluso coagulantes más eficaces que los propios iones.

Los polielectrolitos de larga cadena también facilitan la desestabilización.

d) Adsorción de los polielectrolitos y metales hidrolizados como las sales de hierro sobre los coloides, creando puentes entre las partículas.

Después de su desestabilización, las partículas coloidales tienen tendencia a aglomerarse cuando entran en contacto unas con otras. El grado de aglomeración de las partículas depende de la probabilidad de los contactos y de la eficacia de estos últimos.

La floculación tiene precisamente por objeto aumentar la probabilidad de los contactos entre partículas, los cuales están provocados por la diferencia de velocidad entre éstas.

6.6.1. Factores que influyen en la coagulación

El proceso necesita ser optimizado en cada caso, para lo cual es necesario conocer los factores que lo determinan, entre los que podemos relacionar los siguientes:

pH

Es la variable más importante, existiendo para cada tipo de agua un rango de pH para el que la coagulación tiene lugar muy rápidamente. Este rango es función del coagulante utilizado, de su concentración y de la composición del agua a tratar.

Para las sales de hierro y aluminio dicho rango se extiende entre 5,5 y 7,8.

Sales disueltas

La coagulación con sales de hierro y aluminio está más influida por los aniones que por los cationes. Así los iones sodio, calcio y magnesio apenas ejercen influencia. Los aniones en cambio amplían el rango de pH óptimo hacia la acidez.

Temperatura

Al disminuir la temperatura, sobre todo hasta valores bajos, el flóculo decanta más difícilmente y tiene tendencia a penetrar más profundamente en los filtros.

Coagulante

La elección del coagulante puede influir en las características de la coagulación. Así, aunque la alúmina es el coagulante más empleado en tratamiento de aguas, en muchos casos puede ser ventajoso sustituirlo por sulfato férrico, que en muchas aguas tiene un rango de pH óptimo más amplio y además es menos soluble que la alúmina.

En el caso del agua de mar el coagulante más frecuente es el cloruro férrico, cuya eficiencia es alta y su precio reducido. Los polímeros también son cada vez más frecuentes, por sus menores dosis de aplicación y su facilidad de manipulación.

Mezcla

La mezcla de los productos químicos se debe realizar en dos etapas.

En la primera, la mezcla es enérgica y de corta duración. Su objetivo es dispersar los productos en la totalidad del volumen a tratar. Por ello se realiza en zonas de turbulencia que se crean especialmente para ello.

En la segunda etapa, la mezcla es lenta y tiene por objeto favorecer el contacto entre las partículas de flóculo, la turbidez y color.

Turbidez

Se debe a partículas de diámetro variable por lo que su coagulación se realiza más fácilmente que si se tratara de partículas de diámetros similares.

Las aguas contaminadas por aguas residuales son más difíciles de coagular y exigen concentraciones de coagulante mayores. Es necesario añadir una cantidad mínima de coagulante para obtener una cierta cantidad de flóculo. Al aumentar la turbidez, hay que aumentar la cantidad de coagulante.

Cuando la turbidez es muy elevada, la cantidad de coagulante es relativamente débil, pues la probabilidad de colisión entre las partículas es muy elevada.

Color

El pH óptimo para su eliminación varía entre 4 y 6.

El 90 % de las partículas causantes del color tiene un diámetro superior a 3,5 nm, son por tanto bastante menores que las de limo, causantes de la turbidez, y poseen cargas negativas en su superficie.

6.7. Decantación

Para mejorar los resultados del anterior proceso se realiza la floculación-coagulación-decantación. Se aplica sobre todo cuando los índices SDI son superiores a 25, no obstante su elevado coste sólo permite su aplicación a instalaciones grandes.

Consiste en la colocación anterior a los filtros de un decantador o clarificador que retiene los flóculos formados.

Este tipo de instalación no es frecuente en desalación de agua de mar, pero sí en aguas salobres procedentes de ríos y lagos. También puede usarse en aguas que contienen productos de la corrosión del hierro.

Los decantadores muy frecuentes tanto en las estaciones de agua potable como en las de aguas residuales, son suficientemente conocidos y no van a ser tratados en este libro, por lo que se remite al lector interesado a otros tratados en los que se estudian con más amplitud.

La decantación se basa en retener el agua durante un período de tiempo suficientemente largo en un depósito, en el que el agua circula a una velocidad muy lenta, para que los sólidos que arrastra puedan depositarse en el fondo, del que son arrastrados posteriormente.

Para ayudar en la deposición de esos elementos se agrega previamente algún producto químico que al rodear el sólido aumenta su peso y volumen y facilita su caída.

6.8. Otros procesos

Cualquier otro proceso de tratamiento de aguas que permita la reducción de coloides puede ser aplicado como pretratamiento físico de la ósmosis inversa, vigilando únicamente el posible efecto negativo de algunos de los reactivos químicos que puedan precisarse. En casos de aguas con contenidos elevados de materia orgánica y microalgas, la flotación puede ser efectiva.

Los tratamientos físico-químicos que realizan la precipitación de sólidos en suspensión y determinados iones metálicos también pueden ser empleados en ocasiones, aunque es preferible realizar pruebas a escala reducida y evaluar costes, para determinar si la inversión a realizar y los resultados que se esperan obtener compensan en relación con el aumento de eficiencia de la ósmosis que se consigue, tanto en consumo energético como en aumento de la recuperación.

La decantación lamelar da buenos resultados en el caso de agua con cargas importantes de materia orgánica.

Los filtros antialgas en la aspiración de las bombas también tienen utilidad en casos de acumulación de éstas en el agua de la captación. Consisten en un filtro circular de mallas relativamente gruesas, 100-400 micras, en cuyo interior dispone de un brazo giratorio provisto de rociadores que impulsan agua a presión desde el interior del filtro hacia las mallas, provocando el desprendimiento de las algas que han quedado en la parte externa del filtro.

La presión del brazo giratorio se consigue mediante una conducción de pequeño diámetro conectada a la impulsión de la bomba correspondiente.

6.9. Filtros de membranas

Son filtros especiales cuya aplicación queda muy restringida por los elevados costes tanto de instalación como de mantenimiento.

Utilizan membranas parecidas a las de ósmosis inversa pero con un tamaño de poro mucho mayor.

En muchos casos trasladan al propio filtro los problemas que tratan de resolver en la ósmosis inversa, fundamentalmente el ensuciamiento, por lo que deben ser usados con especial atención.

6.9.1. Microfiltración

Efectúa la separación de partículas, incluidos sólidos en suspensión y coloides grandes, mediante membranas cuyo tamaño de poro es de unos 0,1-0,2 micras.

Estas membranas son similares a las de fibra hueca pero con una serie de características diferenciadoras como:

— Diámetros de la fibra y del alma de ésta más grandes.

— La separación es de nivel físico y no iónico.

— Materiales de fabricación distintos.

El paso del agua se realiza desde el exterior hacia el interior de la membrana, depositándose las partículas sobre la superficie de ésta.

Esta deposición obstruye los poros y crea unas pérdidas de carga que obligan a su limpieza periódica.

El tamaño de los poros es suficientemente pequeño para retener también las bacterias, pues éstas se aglutinan unas con otras adquiriendo un tamaño superior al de aquéllos.

La limpieza se realiza mediante aire que es inyectado desde el interior de la fibra y expulsa las partículas retenidas en la parte externa de la misma.

Cuando las limpiezas con aire son insuficientes para restituir las características de filtración de las membranas y disminuir las pérdidas de carga se deben efectuar lavados con reactivos químicos en recirculación para disolver los posibles precipitados que se hayan podido formar.

La membrana consiste por tanto en un conjunto de hilos huecos que se agrupan en mazos formando un módulo que se coloca dentro de un contenedor, generalmente de material plástico transparente. Los hilos quedan sujetos y rigidizados por su parte superior e inferior para permitir la evacuación del agua filtrada por un extremo o la salida de agua y aire de lavado por el otro.

Un conjunto de módulos se agrupan en un equipo de una capacidad determinada y provisto de los equipos necesarios de impulsión del agua de alimentación, el aire y agua de lavado y los depósitos de regulación necesarios para ello.

La recuperación puede ser del 100% del agua de alimentación, aunque si ésta es problemática puede ser conveniente dejar un pequeño caudal para barrido de los depósitos que se producen sobre la superficie de las membranas, con lo que la recuperación bajaría al 90-95 %.

La microfiltración permite su utilización con aguas muy sucias e incluso con una carga orgánica importante, como las aguas residuales. Sin embargo cuanto más sucia está el agua a tratar tanto más rápidamente se ensucian las membranas, por lo que los períodos entre limpiezas se acortan. Esto da lugar no sólo a paradas frecuentes del equipo, sino también a un incremento de los costes energéticos y a una pérdida de eficiencia de la instalación.

Su material constituyente, el polipropileno, no soporta bien la cloración.

Comoquiera que no es posible garantizar un suministro continuo de agua microfiltrada, se requiere disponer de un depósito intermedio de regulación desde el que el agua debe ser de nuevo bombeada a la aspiración de las bombas de alta pre-

sión. Ello requiere además una vigilancia del agua almacenada en el depósito intermedio para evitar su contaminación y en el caso de utilizarse para recuperación de aguas residuales es necesario incluso someterla a cloración y según el tipo de membrana de desalación a utilizar, a la subsiguiente decloración.

6.9.2. Ultrafiltración

Las membranas que se emplean tienen un tamaño de poro de 0,01 micra, separando partículas, proteínas y sustancias orgánicas con un peso molecular entre 1.000 y 100.000.

Esta clase de membranas pueden ser tanto de fibra hueca como de arrollamiento en espiral.

En el caso de las membranas de fibra hueca, el equipo de tratamiento es similar al de microfiltración, efectuándose asimismo el lavado mediante aire y en caso necesario con reactivos químicos disueltos en una solución que se recircula por las membranas.

La diferencia más importante entre ambas reside fundamentalmente en el diámetro de la fibra, el material constituyente y la forma de filtrado ya que en éstas se realiza desde el interior hacia el exterior.

Las membranas de arrollamiento en espiral se sitúan en el interior de recipientes de presión como las membranas de ósmosis inversa, agrupándose según la capacidad de la planta en bastidores que llevan parecidos accesorios y equipos que los de ósmosis, si bien trabajan a presiones muy bajas y soportan mejor el cloro, puesto que en su fabricación se emplea la polisulfona o PVDF.

Se colocan un máximo de tres membranas por tubo para evitar el ensuciamiento excesivo de éstas, pues el agua arrastra la suciedad de una a otra membrana. La recuperación se sitúa entre el 85 y el 90 %, dependiendo de la limpieza del agua para permitir la existencia de un caudal de barrido que extienda el ciclo de funcionamiento continuo del tren de membranas.

CAPITULO 7

TRATAMIENTOS QUIMICOS

Introducción

El agua que se va a desalar no puede enviarse a los bastidores de membranas, en la mayoría de los casos, tal y como se encuentra en su origen.

Las membranas tienen unas condiciones óptimas de funcionamiento, como temperatura, pH o presión que es necesario trasladar al agua para obtener el mayor rendimiento de la instalación.

De otra parte la composición química del agua o la actividad biológica que en ella se desarrolla también pueden crear problemas a las membranas, que hay que evitar.

Pero asimismo, el agua desalada, como consecuencia del elevado rechazo de sales que realizan las membranas y los pretratamientos químicos que se les aplican, tiene unas características determinadas que pueden no ser las mejores tanto para su consumo como para su almacenamiento o transporte.

Así hay dos aspectos principales que deben destacarse en un agua desalada:

— Su bajo pH, que la hace corrosiva y puede ser causa de ataques tanto a las tuberías como a los depósitos de almacenamiento.

— Su fuerte desequilibrio iónico, dado que apenas contiene iones bivalentes.

Se le deben aplicar también tratamientos químicos para conseguir su neutralización y su enriquecimiento en calcio, en cumplimiento de la Reglamentación Técnico Sanitaria vigente en la actualidad en la Unión Europea.

Finalmente, aunque las membranas de ósmosis inversa rechazan bacterias y virus, en el almacenamiento y manipulación posterior, el agua desalada puede volver

a contaminarse, por lo que si se dedica al abastecimiento urbano debe mantener las condiciones sanitarias adecuadas, lo que implica el mantenimiento de un residual de cloro libre.

Pasemos pues a analizar los pre y post-tratamientos principales que se aplican a un agua que se va a desalar.

7.1. Pretratamientos químicos

Se utilizan para controlar dos tipos de fenómenos o procesos que se desarrollan en el agua:

— Contaminación, que se produce a causa de:
  - Contaminantes orgánicos y biológicos.
  - Algas y otras sustancias.

— Procesos químicos, que ocasionan:
  - Ataques químicos que afectan a la propia estructura de la membrana.
  - Reacciones químicas que producen precipitados insolubles que afectan físicamente a la membrana.

Contaminación. Afecta a numerosas aguas tanto de ríos, lagos o mar como de pozo, si bien en este último caso no es tan frecuente.

Se produce de una forma natural por descomposición de restos de distintos organismos presentes en la naturaleza a lo largo del tiempo y da lugar a compuestos de naturaleza coloidal en los que predominan el nitrógeno y el carbono, que constituyen lo que se conoce en términos amplios como materia orgánica.

Sobre ella se desarrollan una serie de microorganismos, bacterias, virus y hongos algunos de los cuales pueden atacar a las membranas de separación o desarrollarse sobre ellas, ya que la composición química de éstas constituye un excelente medio nutritivo para su desarrollo.

Pero además existe otro tipo de contaminación de tipo artificial o inducida, procedente de los restos de la actividad humana o industrial, y que también puede ir a parar a las aguas superficiales o subterráneas. Por último, en el agua se desarrollan una serie de algas filamentosas o microalgas.

La incidencia de todos estos elementos o productos sobre las membranas es muy negativa, produciendo una alteración más o menos rápida de sus parámetros básicos que reduce su eficiencia y acaba por inutilizar la membrana.

Ataques químicos. Se producen como consecuencia de los elementos químicos o iones componentes naturales del agua o de los que de forma accidental se incorporan a la misma, que originan una serie de procesos o reacciones químicas que terminan por afectar a las membranas.

Estas sufren este tipo de ataques por dos mecanismos principales: oxidación o hidrólisis.

Oxidación. Se produce por la presencia de oxígeno disuelto en el agua o de algún elemento oxidante que o bien forma parte de la misma o se le incorpora posteriormente.

El *oxígeno libre* O_2 se encuentra presente en todas las aguas aunque en cantidades muy variables que van desde 2 a 10 ppm. Los mayores contenidos se dan en las aguas superficiales como ríos, depósitos o el mar.

Estos contenidos no son especialmente peligrosos para las actuales membranas, aunque hace algunos años se utilizaban membranas que eran más sensibles a la oxidación. Por esa causa en las instalaciones más antiguas de ósmosis inversa pueden encontrarse sistemas de desaireación como componentes del pretratamiento.

Sin embargo el oxígeno que «per se» no debería plantear problemas en estas condiciones, sí puede ser causa de ataque a las membranas en dos circunstancias:

— Cuando en el agua a tratar existe una importante actividad biológica.

  Dicha actividad, que en la mayoría de los casos es causada por bacterias aerobias, se ve favorecida en presencia de oxígeno disuelto, y da lugar a la aparición de una capa de limo sobre las membranas que enmascara o reduce sus características básicas.

— En presencia de iones metálicos.

  Favoreciendo la oxidación del hierro y manganeso contenidos en el agua y provocando precipitados sobre las membranas, que obligan a parar la instalación para proceder a su limpieza, disminuyendo la eficiencia del sistema.

Pero además del O_2 existen otros *elementos de mayor poder de oxidación,* que generalmente son añadidos al agua en procesos de tratamiento o incluso como resultado de la incorporación de vertidos industriales. Entre estos se encuentran el cloro y el permanganato potásico, ya citados ampliamente en otro lugar y que también son causa del deterioro de las membranas.

Estos procesos oxidativos afectan fundamentalmente a las membranas de poliamida aunque en distinto grado, según sea el material constituyente de las mismas. Las membranas de poliamida alifática, cada vez de uso menos frecuente, son destruidas de forma casi instantánea.

Las membranas de poliamida aromática, aunque también muy sensibles a los agentes oxidantes, soportan pequeñas dosis y durante períodos muy cortos, variables de unas membranas a otras en función del espesor de la capa activa, pero que pueden cifrarse en unas 2.000 ppm · h.

Las membranas de polisulfona resisten la aplicación de dosis medias de forma continua y prolongada.

Hidrólisis. Es un fenómeno de descomposición que afecta a los grupos acetilo de la estructura polisacárida de las membranas derivadas de polímeros del acetato de celulosa (CA) y que conlleva la pérdida de las propiedades de rechazo.

La velocidad de la hidrólisis depende del pH y se precisa de un ácido mineral para ajustar aquél entre 5,5 y 6, donde la vida de la membrana es máxima.

Nuevos polímeros mezcla de acetato y triacetato de celulosa son algo más resistentes y pueden operar a pH entre 4 y 8.

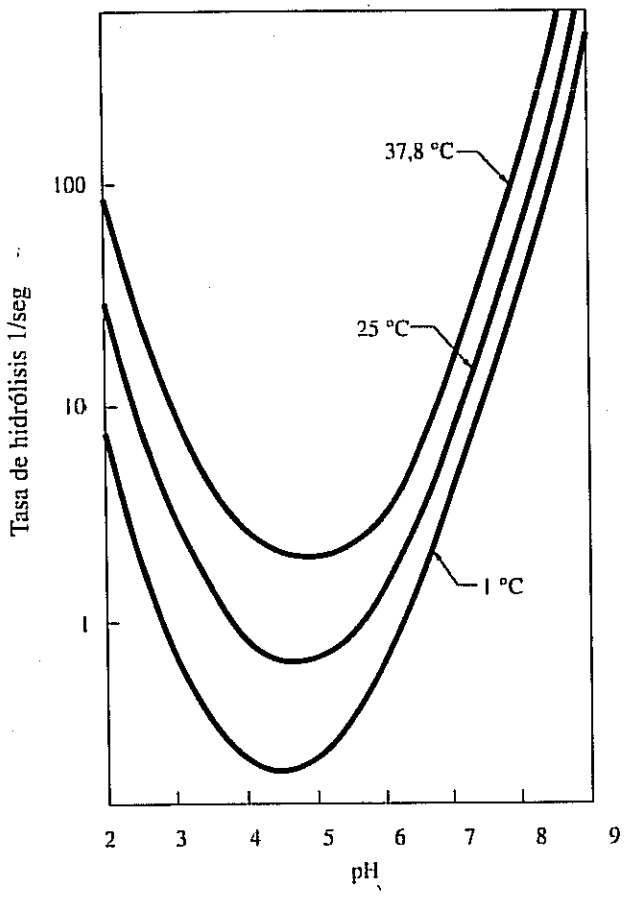


Figura 7.1. Curva del grado de hidrólisis del Acetato de celulosa en función del pH.

Las membranas de poliamida no son susceptibles, sin embargo, a este tipo de descomposición.

Para controlar los citados procesos se utilizan los siguientes pretratamientos químicos:

— Desinfección.

— Regulación de pH.

— Reducción/decloración.

— Estabilización/Inhibición.

7.1.1. Desinfección

Se realiza para la eliminación de la contaminación bacteriológica o por algas, muy frecuentes en numerosas tomas de agua.

Tanto en aguas salobres, cuando la toma se realiza de un pozo poco profundo o de un canal o depósito abierto, como en agua de mar cuando la captación es abierta e incluso en determinadas ocasiones en pozos costeros, es frecuente la presencia de materia orgánica y en consecuencia una gran actividad biológica que antes o después afecta a las membranas, produciendo un ensuciamiento biológico de la superficie de la misma que se conoce como *«biofouling»*.

La eliminación total de la materia orgánica resulta empresa bastante difícil, por lo que se sustituye por procesos de tratamiento alternativos, que tratan de evitar que se den sobre ella las condiciones favorables a la proliferación de bacterias.

Para la aplicación de estos tratamientos es primordial tener en cuenta el tipo de membranas con que se trabaja. Los procesos más usados por orden de importancia son:

Cloración

La utilización de diversos derivados clorados, como productos de desinfección, para combatir el ensuciamiento biológico de las membranas es una práctica habitual en los pretratamientos de las plantas de ósmosis inversa.

Siendo el sistema más usado, es necesario hacer un breve repaso de la química del cloro, para poder comprender el proceso y realizar las dosificaciones de cloro adecuadas.

La dosificación o inyección de cloro en el sistema se realiza principalmente de dos formas: mediante cloro gas o con soluciones líquidas de hipoclorito sódico o cálcico, aunque recientemente se están ensayando nuevos productos como el ClO_2, con resultados bastante positivos.

Tanto en un caso como en otro la base del proceso de desinfección es la formación de ácido hipocloroso (OHCl) que posee una elevada acción biocida.

No sólo controla el proceso de crecimiento de las bacterias, penetrando en las células de la pared y matándolas, sino que además evita la producción de enzimas que son necesarias para la proliferación de dichos microorganismos.

Sin embargo la eficiencia del producto es variable según el tipo de bacterias, por lo que las dosis a aplicar y el tiempo de contacto pueden ser distintos según los casos.

Así, por ejemplo, en un reciente estudio del EPRI (Environment Protection Research Institut), se dice que el *biofouling* puede controlarse mediante dosis de cloro variables según los casos entre 0 y 5 mg/l y tiempos de contacto variables entre 0 y 120 minutos por día, cifras como se ve muy dispares.

Hipoclorito y cloro gas. El cloro adopta tres formas distintas al añadirse al agua: cloro elemental, ácido hipocloroso ClOH e ión hipoclorito OCl^-.

Por tanto las reacciones básicas de la cloración según sea el producto que se emplee son:

— (Cloro gas) $Cl_2 + H_2O = HOCl + HCl$

— (Hipoclorito sódico) $NaOCl + H_2O = HOCl + NaOH$

— (Hipoclorito cálcico) $Ca(OCl)_2 + 2H_2O = 2HOCl + Ca(OH)_2$

Dependiendo del pH, el ClOH, tanto si proviene del gas cloro como si es del hipoclorito, se disocia posteriormente en iones H^+ y OCl^-

$$ClOH \Longleftrightarrow H^+ + OCl^-$$

La eficiencia del cloro como desinfectante se mide mediante lo que se conoce como cloro libre disponible o residual, que es el cloro que queda en el agua al cabo de un determinado tiempo de contacto. Puede por tanto reaccionar química y biológicamente como ácido hipocloroso o como ión hipoclorito.

Sin embargo dicha eficiencia está directamente relacionada con la cantidad de ácido hipocloroso sin disociar presente en la solución, cuya acción biocida es 100 veces mayor que la del ión OCl^-.

Además la concentración del ClOH presente en un agua depende del pH, temperatura y fuerza iónica del agua:

— *Con respecto al pH,* la concentración de ClOH disponible varía notablemente para pequeños cambios de éste.

  En un agua a pH 7 y 20 °C la cantidad de ClOH sin disociar es de un 79,29 %, mientras que a pH 8 se reduce hasta el 27,69 %.

— *En cuanto a la temperatura,* al aumentar ésta, también lo hace la disociación del ClOH y aumenta en consecuencia la concentración del ión ClO^-, es decir, disminuye la acción bactericida o biocida del cloro.

— Por último la disociación del ClOH aumenta cuando lo hace *la concentración de sales del agua*, es decir, su fuerza iónica.

En consecuencia la dosis de hipoclorito a aplicar varía en función de las condiciones del agua y por ello en cada momento o en cada instalación deberán controlarse adecuadamente, para conseguir el efecto biocida que se pretende.

En base a estos tres parámetros se han elaborado unos gráficos que permiten conocer las condiciones en que se encuentra el cloro disociado en el agua y calcular la dosificación que sería necesaria para mantener un control biológico de una instalación.

La figura 7.2 recoge dichas variaciones para una temperatura de 20 °C que puede considerarse como habitual en nuestras latitudes (Mediterráneo y Atlántico)

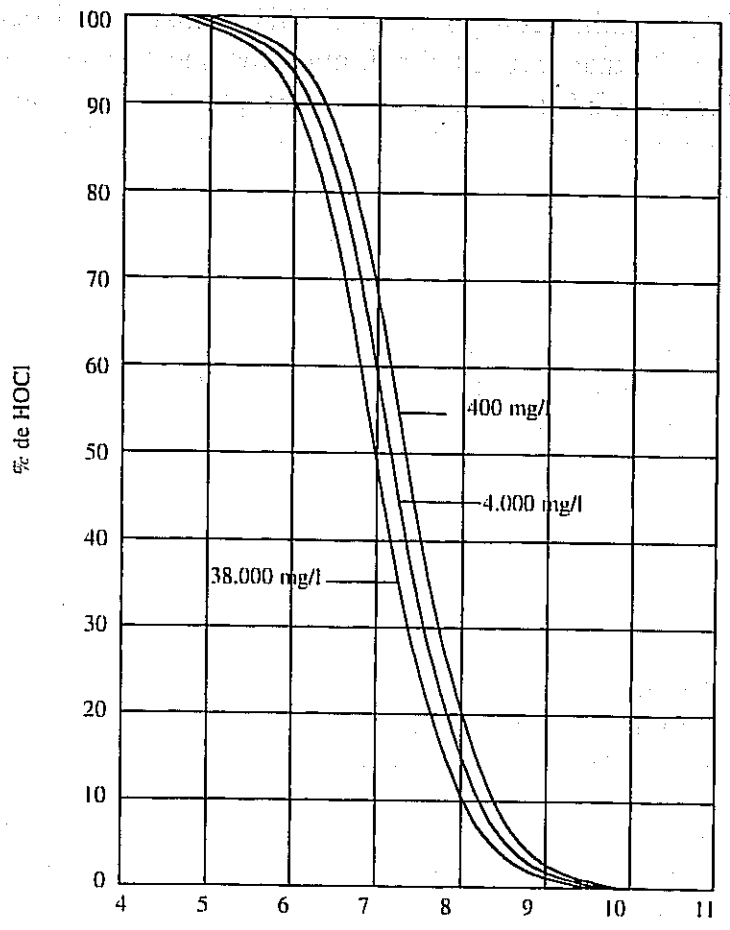


Figura 7.2. Grado de disociación del ClOH en funcion del pH a 20° C.

con tres tipos de aguas según sea agua de mar (38.000 mg/l), agua salobre (4.000 mg/l) o agua dulce (400 mg/l).

Cuadros similares para otras condiciones pueden elaborarse o consultarse en publicaciones especializadas

Pero el cloro no solo actúa como desinfectante, sino que además al ser un oxidante fuerte reacciona con otros elementos que pueden estar presentes en el agua.

Su dosis es difícil de calcular a priori, pues de las relaciones estequiométricas derivadas de las reacciones obtendríamos unas cifras que solo tendrían validez en el caso de que el agua no tuviera dichos elementos, por lo que en la práctica la dosificación de hipoclorito se controla determinando el cloro libre existente en el agua después de su cloración.

Posteriormente, mediante análisis bacteriológicos, se comprueba si la concentración de cloro residual libre presente en el agua tratada es suficiente para eliminar las bacterias presentes.

Cantidades de 1 a 3 ppm de cloro residual libre suelen ser suficientes, aunque a veces sean necesarias dosis más elevadas.

Cuando la cloración se realiza con gas cloro, el ClH formado se disocia rápidamente dando iones H^+ y Cl^- que reducen el pH, mientras que si se clora con hipoclorito sódico o cálcico, el hidróxido sódico o cálcico que se forman aumentan el pH, aunque su efecto en la disociación del ClOH y en la química del agua es muy reducido en ambos casos.

Pero las aguas, con mucha frecuencia, contienen materia orgánica y por tanto amonio y/o nitrógeno.

En este caso el cloro reacciona en primer lugar con estos, formando cloraminas de 1.º, 2.º ó 3.er orden, que son mucho menos eficaces como biocidas que el ClOH, y sólo después de su neutralización se produce la liberación del cloro.

$$ClOH + NH_3 = ClNH_2 + H_2O \text{ (monocloramina)}$$

$$ClOH + ClNH_2 = Cl_2NH + H_2O \text{ (dicloramina)}$$

$$ClOH + Cl_2NH = Cl_3N + H_2O \text{ (tricloramina)}$$

La formación de uno u otro tipo de cloraminas depende también del pH de la solución, de la temperatura y de la relación entre el cloro y el amoníaco, siendo el pH 9,3 el que corresponde a la mayor velocidad de reacción.

Para un pH y concentración de nitrógeno amoniacal determinado la formación de uno u otro tipo de compuestos depende de la dosis de Cl_2 que se aplica, según puede verse en la figura 7.3.

La determinación de la dosis adecuada de cloro se realiza mediante pruebas en laboratorio que permiten obtener la conocida curva del punto crítico.

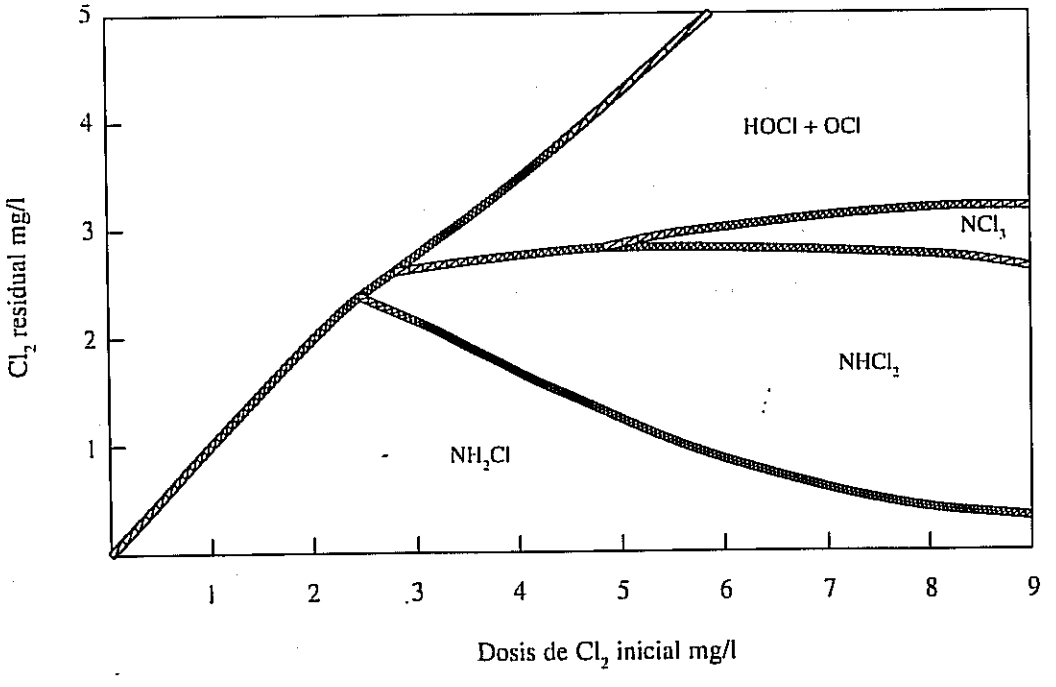


Figura 7.3. Formación de cloraminas en función de la dosis de Cl_2 aplicada (Según G.C. White).

Si a un agua determinada aplicamos una dosis de cloro creciente (gas o hipoclorito) y determinamos en cada momento el contenido de cloro libre, se obtiene una curva similar a la que se recoge en la figura 7.4.

Durante el tramo horizontal de la curva, entre los puntos 0 y A, el cloro reacciona con los agentes que están presentes en el agua, como el oxígeno, el SH_2 e incluso elementos metálicos como el hierro o el manganeso. Su efecto desinfectante es por tanto nulo.

Entre los puntos A y B la reacción es con el nitrógeno amoniacal, formando las citadas cloraminas. El punto B representa el máximo de esta fase que corresponde a la situación en que la relación molar entre el cloro y el nitrógeno amoniacal es de 1:1 que equivale a una relación en masas de 5:1.

Si esta relación sigue aumentando se produce una descomposición de las cloraminas con producción final de ácido clorhídrico, que explicaría el tramo descendente de la curva B-C.

El punto mínimo o punto crítico C corresponde normalmente a una relación cloro/amoníaco de 8-10:1 (teóricamente 7,6:1). También se llama punto de ruptura.

A partir de este punto la efectividad como desinfectante del cloro añadido es mayor, coincidiendo con la última fase creciente de la curva.

La velocidad de la reacción con que se forman las cloraminas depende casi exclusivamente de la concentración de las sustancias que reaccionan; por ejemplo para una concentración amonio-nitrógeno de 2 mg/l, si el cloro añadido es suficiente, la reacción para llegar hasta el punto de ruptura *(breakpoint)* se completa en 8-9 minutos, mientras que si dicha concentración es de 0,5 mg/l el tiempo asciende hasta unos 20 minutos.

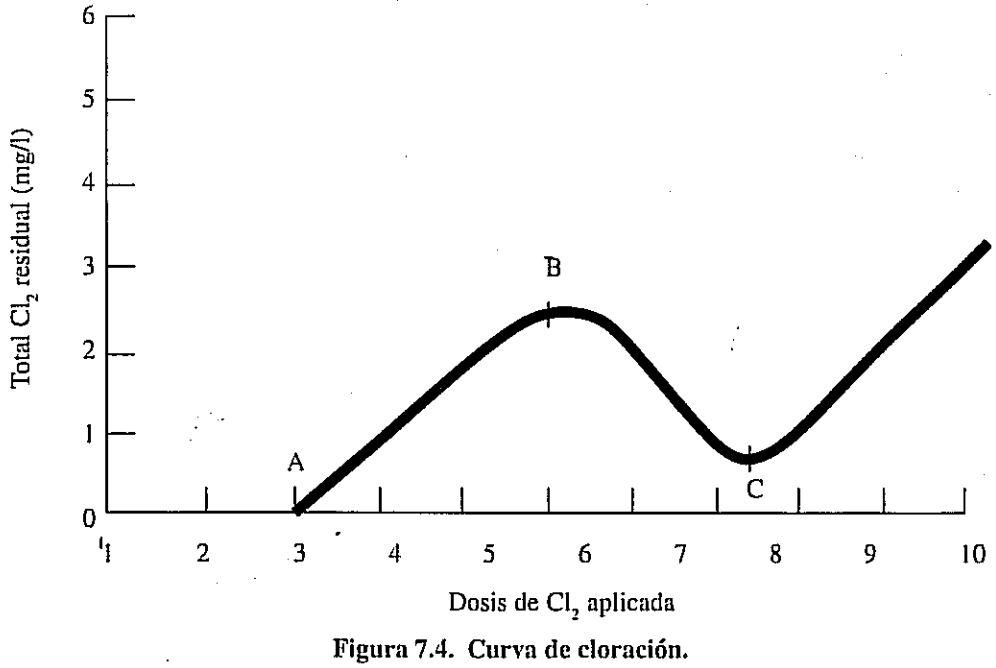


Figura 7.4. Curva de cloración.

El *breakpoint* de la cloración se produce cuando se añade cloro hasta que quede satisfecha su demanda y quede todavía un residual.

La demanda de cloro es la cantidad de cloro que puede consumir el agua para su desinfección y la destrucción de la materia orgánica. En consecuencia es la porción del cloro añadido al agua en un período de tiempo dado, que se convierte en cloro no disponible.

Además de la demanda biológica y del amonio, las especies que reaccionan para formar cloro no disponible son agentes reductores como nitritos, CN, sulfuro, iones ferroso y manganoso; compuestos orgánicos y compuestos inorgánicos no reductores.

Los compuestos orgánicos son el metano, hidrocarburos aromáticos, compuestos de doble enlace como los ácidos grasos y los compuestos orgánicos nitrogenados.

Los compuestos inorgánicos son el amoníaco y aquellos metales que catalizan la descomposición de los iones hipoclorito, como cobalto, cobre, níquel, hierro y manganeso.

Por ejemplo si el agua tratada contiene manganeso, hierro, nitritos, materia orgánica y amonio, al añadir cloro, reacciona en primer lugar con el manganeso, hierro y nitritos y por tanto no se produce la desinfección.

Si se continúa añadiendo cloro reacciona con la materia orgánica y el amonio para formar derivados organoclorados y cloraminas. Estas producen un residual de cloro, pero su poder desinfectante es bastante reducido.

Si se añade más cloro, éste destruye las cloraminas y la mayor parte de los organoclorados, y la solución alcanza el punto de ruptura.

La adición de más cloro crea un cloro libre residual que ya no reacciona con ninguna otra sustancia. A partir de este momento el poder desinfectante del cloro es muy efectivo y aumenta en la misma proporción que el cloro añadido.

La dosis a aplicar está relacionada lógicamente con la cantidad de materia orgánica presente en el agua a tratar.

El nitrógeno orgánico también reacciona con el ClOH pero no produce un cloro combinado residual estable hasta después de varias horas de contacto.

El cloro no disponible es el cloro presente en la solución que se encuentra en forma iónica diferente al ClOH y a las cloraminas. Su mayor efectividad se consigue para un pH por debajo de 6.

Si el pH está entre 7 y 9 se precisa un mayor tiempo de contacto entre el cloro y el agua para que sea efectivo. Como medida de su efectividad se suele emplear el conocido como:

— Factor de desinfección = Tiempo de contacto (min) × concentración de cloro libre (ppm)

que toma los siguientes valores:

Valor del pH	Factor de desinfección
6-7	6
7-7,5	12
7,5-8,0	20
8,0-8,5	30
8,5-9,0	35

En experiencias realizadas con aguas con fuerte contaminación, inyectando altas concentraciones de hipoclorito cálcico se ha comprobado que este método no elimina completamente las bacterias, debido a la ausencia de cloro residual en el agua.

La razón de ello está en que el agua normalmente tiene una importante demanda de cloro a causa de los propios contaminantes que contienen cloro.

Aunque en las instalaciones de osmosis inversa se dosifica generalmente hipoclorito, además hay que tener en cuenta que a altas concentraciones el cloro es muy corrosivo, por lo que también se ha ensayado la inyección de gas cloro mediante clorinador, para evitar riesgos de manejo.

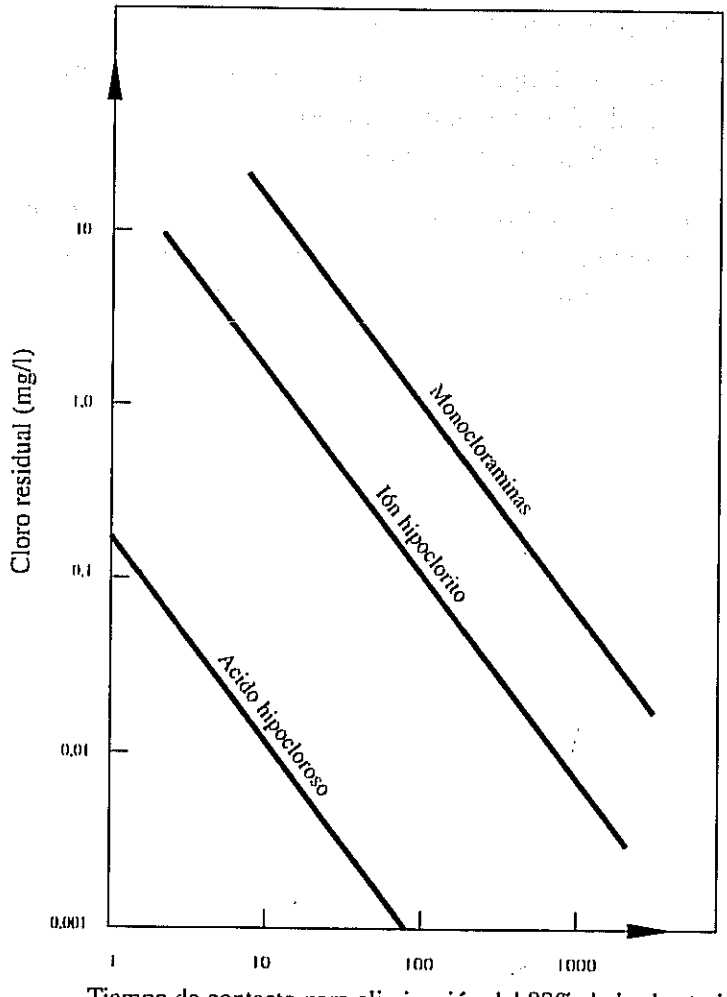


Figura 7. 5. Eficiencia de los compuestos clorados.

Este equipo tiene ciertas ventajas, pues no existen líneas de cloro a presión; el cloro se mantiene en vacío, y el regulador de vacío se encuentra en la parte superior del cilindro.

Manteniendo el nivel de cloro libre en 0,3 ppm, los resultados son satisfactorios, precisándose un tiempo de contacto de al menos 25 seg.

El mayor inconveniente de este sistema es la dificultad de control, por lo que pueden producirse aplicaciones de cloro excesivas que dañan las membranas.

ClO_2. El ClO_2 puede emplearse en la cloración, como sustitutivo del gas cloro o hipoclorito, por su menor incompatibilidad con las membranas de poliamida, con resultados positivos.

Glater en 1981 inició ensayos con este agente desinfectante, de corta duración, por lo que sus conclusiones no son definitivas.

Posteriormente W. R. Adams (1990) ha realizado ensayos de mayor duración con membranas tanto de poliamida aromática como alifática.

Aunque su efecto desinfectante es positivo, en concentraciones altas resulta dañino para ambos tipos de membranas.

A concentraciones de 1 ppm y menores, las membranas muestran sin embargo una mayor tolerancia al ClO_2 que al cloro. Dado que el ClO_2 a esa baja concentración es un buen agente desinfectante, marca una vía potencial de uso de este producto.

Como además se ha comprobado que las membranas son muy permeables al ClO_2, incluso para una concentración baja de éste se consigue una buena acción desinfectante tanto en la alimentación como en el agua producto de las membranas.

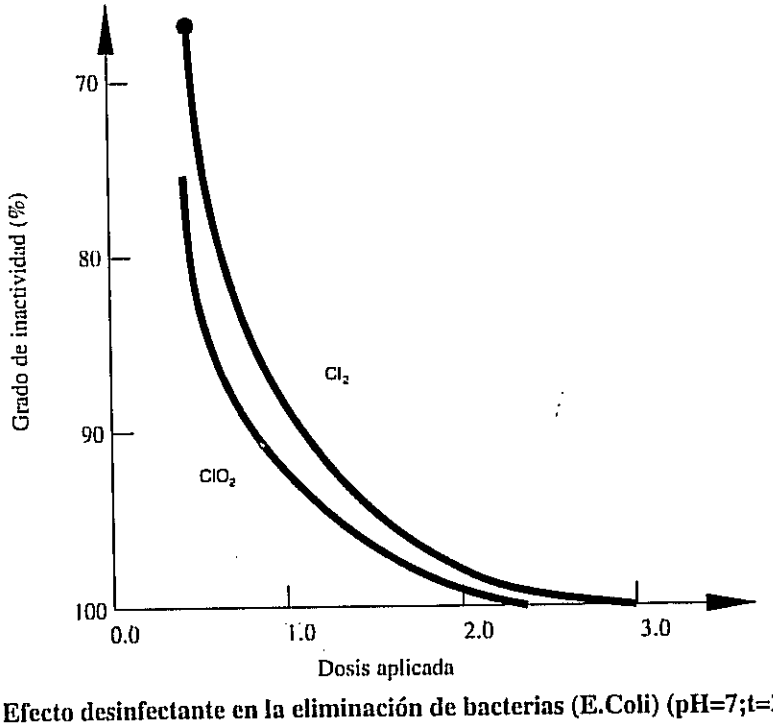


Figura 7.6. Efecto desinfectante en la eliminación de bacterias (E.Coli) (pH=7;t=20 min).

Aunque creemos que su empleo está todavía en fase experimental, los estudios realizados indican que en esas concentraciones las membranas podrían funcionar varios años sin mayores problemas.

Son bastante significativos a este respecto los trabajos realizados por H. Junli con ClO_2 para la eliminación de E. Coli, Pseudomonas y otros tipos de bacterias cuyos resultados demuestran la mayor eficiencia de éste frente al gas cloro. (Se precisa de un 20 a un 40 % menos).

En otros tipos de bacterias las diferencias en efectividad son todavía más favorables. Pero todavía más importante es su efectividad desinfectante en relación con el pH, pues sus efectos son completos para un pH variable entre 3 y 9, mientras que en el caso del cloro líquido sólo se consiguen dichos efectos en condiciones de neutralidad.

Asimismo los resultados son positivos respecto al tiempo de contacto. En las mismas condiciones los efectos bactericidas son totales después de 1-2 minutos, mientras que con el cloro líquido se requieren de 2,5 a 3,5 minutos.

Desde estos resultados su utilización en instalaciones de agua de mar o alcalinas, de pH elevado, es interesante pues no se necesita un control tan riguroso del pH como con los otros productos clorados, que en ocasiones incrementan notablemente los costes del ácido necesario para mejorar su efectividad.

En condiciones normales de presión y temperatura el ClO_2 es un gas oscuro verde amarillento, parecido al cloro incluso en color.

Al contrario de éste no se hidroliza en el agua permaneciendo en solución como gas disuelto. Se descompone fácilmente a la luz y puede mantenerse en la oscuridad, sin cambios, durante meses.

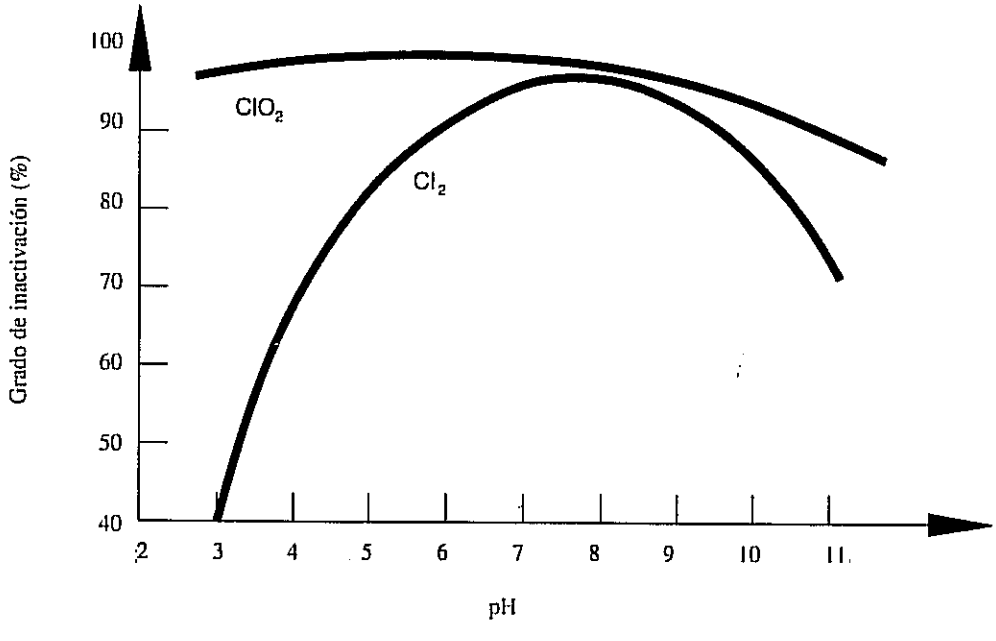


Figura 7.7. Efecto desinfectante del ClO_2 en relación con el pH.

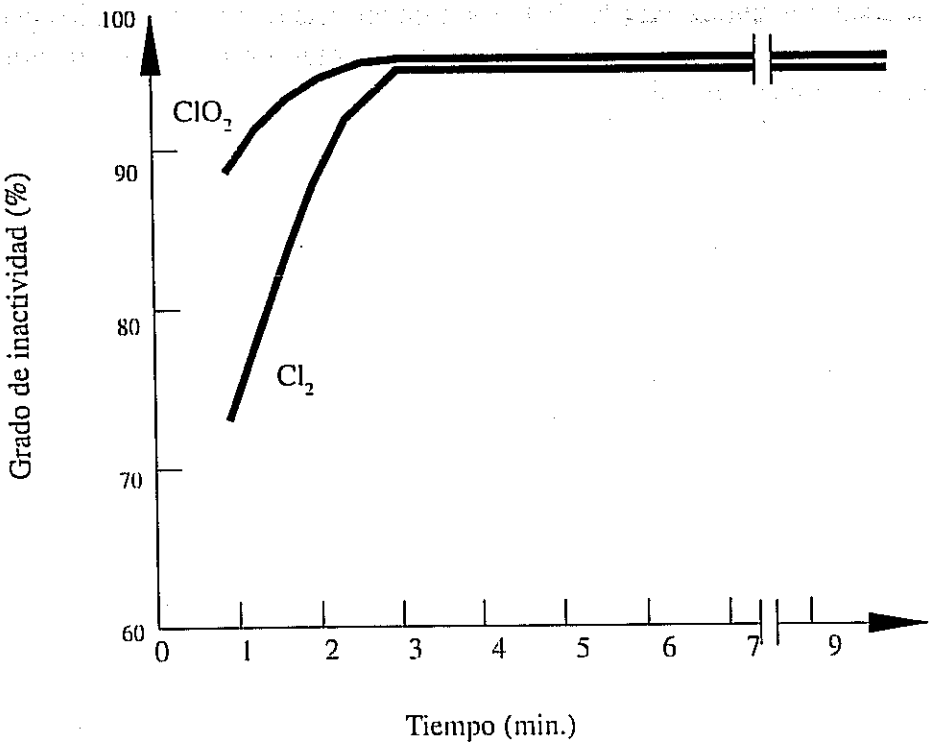


Figura 7.8. Efecto desinfectante del ClO_2 en relación al tiempo.

La capacidad oxidante del ClO_2 depende del pH, siendo mayor cuanto más ácida es la solución.

Su reacción de electrodo es:

$$ClO_2 + 4H+ + 5e = Cl^- + 2H_2O$$

Mientras que en el agua las reacciones son:

$$ClO_2 + e = ClO_2^-$$

y

$$ClO_2^- + H_2O + 4e = Cl^- + 4OH^-$$

La extensión de esta reacción depende de la naturaleza reductora del agua, por lo que los iones metálicos en forma reducida Fe^{2+} y Mn^{2+} pueden ser oxidados.

Por tanto cuando se emplea como desinfectante el ClO_2 debe evitarse la presencia de hierro y manganeso en el agua.

La influencia de la temperatura también tiene su importancia, aumentando a medida que ésta sube. Sus efectos sobre la inactivación de virus y plancton son parecidos a los del cloro. Por último, mantiene su efectividad para un pH de 3-7, mientras que a pH 9,1 pierde.

Cloración del agua de mar

La cloración del agua dulce y del agua residual se realiza desde hace muchos años y su química es suficientemente conocida, sin embargo la del agua de mar es bastante más reciente y no se conoce con la misma profundidad.

La composición del agua de mar es bastante compleja habiéndose detectado en los análisis la presencia de 75 elementos químicos en concentraciones muy variables.

Además se han identificado varios cientos de compuestos orgánicos que se supone son sólo una parte del contenido orgánico total.

El agua de mar tiene también un elevado contenido de sólidos disueltos, y elementos móviles que van desde partículas coloidales, y organismos unicelulares hasta mamíferos.

Por todo ello su comportamiento respecto a la cloración es algo diferente al del agua dulce.

El ión bromuro que se encuentra en una concentración de hasta 70 mg/l, es el ión que tiene mayor incidencia. Su presencia en cantidades tan elevadas interfiere la acción del cloro como biocida.

Cuando se clora el agua de mar, una parte del bromuro presente es oxidado para formar ácido hipobromoso y iones hipobromito, que se comportan de manera similar a sus equivalentes clorados:

$$Br^- + HOCl = HOBr + Cl^-$$

A su vez el acido hipobromoso se disocia según:

$$HOBr = OBr^- + H^+$$

interfiriendo estos iones en la medida del cloro residual puesto que son oxidantes residuales libres.

La reacción de formación del HOBr es rápida y la cantidad de OHBr sin disociar, a un pH dado, es mucho mayor que en el caso del HOCl.

Posteriormente la descomposición del hipobromito se realiza según:

$$3BrO^- = BrO_3^- + 2Br^-$$

siendo esta reacción más favorable a pH 7,3.

Por último el bromato reacciona muy lentamente con el ioduro liberando iodo elemental a pH 4:

$$BrO_3^- + 9I + 6H^+ = Br^- + 3I_3^- + 3H_2O$$

Cuando hay presencia de NH_3 se forman bromaminas:

$$HOBr + NH_3 = NH_2Br + H_2O$$

$$HOBr + NH_2Br = NHBr_2 + H_2O$$

$$HOBr + NHBr_2 = NBr_3 + H_2O$$

las proporciones de mono, bi y tribromaminas dependen sólo de la proporción inicial Br/NH_3 y del pH de la solución.

El amoníaco-nitrógeno presente en el agua de mar no plantea problemas a la cloración, puesto que la concentración excesiva de iones bromuro destruye rápidamente el amoníaco.

Aunque en la cloración del agua de mar se forman ácido hipobromoso, iones hipobromito y bromaminas, la estabilidad de estos compuestos en la solución es muy pequeña. Los derivados del amoníaco se descomponen completamente a nitrógeno elemental y agua en horas o días y la dibromamina es especialmente inestable.

El ácido hipobromoso no se descompone tan rápidamente como las bromaminas, pero se ha observado la formación de bromatos por descomposición a la luz del sol.

Por tanto lo que se conoce como demanda de cloro, aplicado al agua de mar describe una variedad de reacciones químicas, no todas ellas relacionadas necesariamente con la oxidación de la materia orgánica, pero todas ellas conducen a la desaparición del cloro libre o combinado.

Dado que la cloración puede provocar la formación de derivados clorados a partir de algunas sustancias orgánicas del agua como el ácido fúlvico y que estos hidrocarburos halogenados pueden ser perjudiciales para la salud, se ha tratado de reducir al máximo su producción.

El ozono y el ClO_2 también oxidan al bromo, presente en el agua de mar a hipobromito. Si están presentes los iones amonio se forman bromaminas.

En consecuencia, aunque los desinfectantes reales del agua de mar son el bromo y sus derivados, se emplea normalmente el término cloro residual para describir el oxidante halógeno residual presente.

Hay varios aspectos de la cloración del agua de mar que no están totalmente comprendidos. Entre ellos está la demanda lenta y continua de cloro, que se extiende por lo menos durante 1.500 horas, y la identidad de algunos agentes oxidantes presentes en el agua de mar clorada.

Estos agentes desconocidos están relacionados con la oxidación del bromo en el agua de mar e influyen en la precisión del método de titulación amperimétrica, dependiente del reactivo añadido y su dosificación.

Alternativas a la cloración

Aunque la utilización de cloro es el sistema más extendido y económico, supone un riesgo por su posibilidad de ataque a las membranas.

Por ello en ocasiones se han utilizado otros productos o técnicas como alternativas siendo los más frecuentes el sulfato de cobre, el permanganato potásico y el bisulfito.

Bisulfito

Tanto el bisulfito sódico como el metabisulfito sódico se emplean también como desinfectantes en sustitución del hipoclorito aunque su acción desinfectante no es tan intensa. Por ello se aplica en altas dosis como choque, generalmente en la toma de agua, cuando ésta se realiza a través de pozo o en una cántara.

Las reacciones químicas que se producen son:

$$Na_2S_2O_5 + H_2O \rightarrow 2\ NaHSO_3$$

$$2\ NaHSO_3 + O_2 \rightarrow Na_2SO_4 + H_2SO_4$$

Posteriormente se produce la reacción de estos últimos con los bicarbonatos del agua según:

$$NaHSO_3 + Ca(HCO_3)_2 \rightarrow Na_2SO_3 + CaSO + CO + 2H_2O$$

$$H_2SO_4 + Ca(HCO_3)_2 \rightarrow CaSO_4 + 2\ CO_2 + 2\ H_2O$$

En algunas plantas desaladoras de Oriente Medio donde el agua de mar alcanza en verano temperaturas elevadas, mediante un tratamiento intermitente (2 veces al día) con una dosis de 500 ppm de bisulfito sódico, se ha conseguido una reducción en los problemas de crecimiento biológico. La misma dosificación se aplica durante las paradas.

Según Van Dijk (DHV Cons Engin), como probablemente en muchos casos la desinfección está destinada solamente a prevenir el crecimiento biológico, no es necesario hacerla de una manera continua, sino con tratamientos periódicos de choque (500 ppm de bisulfito durante 30 minutos), añadiendo sosa caústica para controlar el descenso del pH.

Además en tomas abiertas existen otros riesgos añadidos como consecuencia de la existencia de formas de vida superiores, como pueden ser los percebes, mejillones, almejas, y según las circunstancias, peces de pequeño tamaño que pueden llegar hasta los filtros.

Sulfato de cobre y permanganato potásico

Se emplean sobre todo para el control de algas en depósitos abiertos en los que como consecuencia de la acción solar se produce su proliferación. Su efecto es por

tanto mayor como alguicida que como desinfectante, aunque con esta última acción se han empleado a veces en lugares de contaminación ligera.

El sulfato de cobre no se está seguro si es alguicida o alguistático. Resulta más efectivo como preventivo de la formación de algas o su crecimiento que para destrucción de las existentes. La alcalinidad del agua es importante para determinar la dosificación.

El permanganato es alguicida a concentraciones de 0,5-2 ppm, su empleo es menor por su mayor coste y dosificación.

Ozono

Tanto el ozono como la radiación ultravioleta tienen propiedades desinfectantes. El ozono es un agente oxidante muy poderoso, un 50 % más fuerte que el cloro y un 90 % que el bromo. Como desinfectante, el ozono es 3.000 veces más rápido que el cloro y 5.000 veces que el bromo.

En forma gaseosa el ozono es incoloro, más pesado que el aire y al ser un gas inestable tiene un período de vida muy corto, unas 12 horas, dependiendo de la temperatura, por lo que debe generarse «in situ».

En contacto con el aire se transforma de nuevo en oxígeno. En el agua, su vida media es de 20 a 25 minutos y es importante que esté en contacto con el agua de tal forma que se maximice su disolución rápida.

La mezcla del ozono en el agua se realiza normalmente con mezcladores estáticos, tipo venturi o inyectores. Con un diseño adecuado, del 95 al 98 % del ozono añadido puede mezclarse con el agua.

La desinfección mediante el ozono se produce por rotura o desintegración de la pared de la célula bacteriana en un proceso conocido como lisis celular. El olor es similar al del fósforo y SO_2, por lo que fácilmente se detecta por su olor a aire fresco, incluso en diminutas cantidades en el aire. La calidad de la desinfección con ozono no depende del pH y tampoco la utilización de ozono afecta al pH del agua.

Se puede emplear en los siguientes usos:

— Desinfección bacteriana.

— Destrucción de virus.

Pero además sus aplicaciones alcanzan más allá de la desinfección, por lo que puede ser utilizado en tratamientos de aguas potables y desaladas en:

— Mejora de las características de decantación.

— Reacciones de oxidación:

- Eliminación de colores.
- Eliminación de sabor.

- Eliminación de olores.
- Eliminación de algas.
- Eliminación de sulfuros.
- Eliminación de cianuros.
- Eliminación de precursores de trihalometanos.

— Oxidación orgánica:
- Detergentes.
- Pesticidas.
- Fenoles.
- Acidos húmico, fúlvico y tánico.

— Oxidación de hierro soluble, manganeso y otros metales pesados.

— Oxidación de compuestos orgánicos de moléculas grandes y poco degradables, transformándolas en moléculas menores y más fácilmente biodegradables.

Utilización de cloro y ozono

El ozono tiene dos subproductos. Cuando reacciona con un contaminante el subproducto es el dióxido de carbono y si no hay contaminantes se transforma de nuevo en oxígeno.

Por su parte el cloro se combina con impurezas y produce cloraminas, un trihalometano cancerígeno. Lo mejor es por tanto la mezcla de ambos, eliminando la producción de cloraminas. Para comprender cómo el ozono mejora los resultados del cloro, hay que comprender cómo desinfecta éste.

Cuando el cloro entra en contacto con un contaminante, lo rodea y bloquea. A su vez éste atrapa al cloro y lo transforma en cloramina, por lo que en todo momento se dispone en el agua de cloro libre y combinado.

Cuando se introduce el ozono en el agua en cantidades relativamente bajas, oxida los contaminantes con los que se pone en contacto, y aún más importante destruye los contaminantes que retienen el cloro y por tanto libera éste.

Respecto al mantenimiento de una instalación mixta, hay que tener en cuenta que el hipoclorito sódico o cálcico no es cloro al 100 %, sino que contiene otros componentes inertes que facilitan su uso y manejo, pero que pueden actuar claramente sobre el pH. Por tanto al usar un 50 ó 90 % menos cloro, se tiene la correspondiente reducción en la necesidades de productos químicos para ajustar la variación del pH.

A medida que aumenta la carga contaminante del agua se necesita añadir más cloro para mantener los niveles de residual adecuados. Por tanto, si se aumenta el nivel oxidativo del agua mediante una buena circulación y la adición de ozono, to-

do el cloro queda liberado y ejerce su acción a plena capacidad, por lo que el resultado es positivo.

Radiación Ultravioleta

Tiene poder bactericida y virucida y no contribuye a la formación de subproductos. El efecto desinfectante de la luz ultravioleta está asociado a la absorción por varios compuestos orgánicos de los organismos vivos que producen la rotura de las uniones químicas que producen cambios bioquímicos mortales.

La UV es más un tratamiento físico que químico de desinfección puesto que la luz penetra las paredes de las células de los microorganismos y es absorbida por el material celular, incluidos ADN y ARN.

La fuente más común de luz ultravioleta es una lámpara de vapor de mercurio de baja presión que emite en una longitud de onda de 253,7 nm, que es el valor óptimo para efectos germicidas.

El grado de desinfección depende del tiempo de exposición y la intensidad. La dosis de UV requerida para una desinfección efectiva depende de los microorganismos (bacterias, esporas, virus, protozoos, hongos, etc.). Las lámparas se colocan sumergidas en el líquido o en el exterior del mismo. Los equipos comerciales son de varios tipos. En unos las lámparas quedan selladas dentro de unos manguitos o recipientes de cuarzo y requieren sumergir la lámpara en agua.

En otros sistemas se requiere que el agua pase a través de tubos de PTFE fluorocarbono, con las lámparas colocadas en la parte externa de los tubos. El PTFE no solo permite a la luz UV pasar a su través hasta el agua, sino que además su superficie, que no se humedece, también previene la aparición de limos y residuos, minimizando el ensuciamiento del tubo.

La principal ventaja de la UV es que no se necesitan productos químicos. Por ello se ha usado ampliamente en aplicaciones industriales, especialmente en la industria electrónica. Como el agua producto de la OI tiene una turbidez muy baja la UV resulta muy efectiva como desinfectante.

El principal defecto es que carece de acción desinfectante residual, siendo el agua tratada susceptible de volverse a contaminar.

Su coste es por lo demás elevado, muy superior a los procedimientos químicos, por lo que no siempre se justifica su uso. En aguas de turbidez elevada no resulta tan efectiva, por lo que su aplicación es más factible en el post que en el pretratamiento.

7.1.2. Ajuste de pH

El agua que se va a desalar tiene generalmente un pH elevado, 8 en el agua de mar y valores superiores en el agua salobre. En estas condiciones el funcionamiento de la membrana no es el óptimo y la eficiencia de la instalación se reduce.

Además a esos pH, se pueden producir precipitados que afectarían al proceso.

La acidificación del agua de alimentación se emplea por ello con dos objetivos:

— Colocar el agua en un pH óptimo para la membrana.

— Prevenir la precipitación del carbonato cálcico, el cual se forma por descomposición del bicarbonato cálcico según la siguiente reacción:

$$Ca\,(HCO_3)_2 = CO_2 + CaCO_3 + H_2O$$

Se usa por lo común el ácido sulfúrico, que elimina la alcalinidad del bicarbonato y previene la precipitación del carbonato; pero además incrementa la concentración del ión sulfato y la tendencia a la formación de precipitados de sulfato cálcico según la ecuación general:

$$2HCO_3^- + H_2SO_4 = 2H_2O + 2CO_2 + SO_4^=$$

Según en el agua exista carbonato o bicarbonato cálcico las correspondientes reacciones serían:

$$(CO_3H)_2Ca + SO_4H_2 \rightarrow CaSO_4 + 2\,CO_2 + 2\,H_2O$$

$$CO_3Ca + SO_4H_2 \rightarrow CaSO_4 + CO_2 + H_2O$$

Para evitar éstos se agrega al agua algún antiincrustante o secuestrante que suelen ser derivados del fósforo como el hexametafosfato sódico o diversos tipos de polielectrolitos (poliacrilatos, polimaleatos, etc.).

En el caso del agua de mar en tomas superficiales y en aguas salobres contaminadas, la acidificación del medio tiene otro propósito cual es la mejora de la eficiencia del hipoclorito sódico, empleado como biocida.

En el caso de utilizar membranas de acetato de celulosa, que son fácilmente degradables, el acido sulfúrico previene su hidrólisis a celulosa y ácido acético, que se produce rápidamente cuando se salen del estrecho margen de pH (5-6) a que pueden trabajar.

El CO_2 que se produce en todos los casos se difunde a través de la membrana hacia el producto que tiene un pH bajo y es bastante corrosivo para las redes de distribución.

7.1.3. Decloración

Las membranas, especialmente las de poliamida, son muy sensibles a los oxidantes y especialmente al Cl_2, que puede encontrarse en el agua si ha sido sometida a un proceso de cloración.

Es preciso su completa eliminación antes de que el agua clorada entre en contacto con las membranas. Decloración es el proceso de eliminación o reducción del cloro total combinado residual.

Los compuestos de azufre son los reactivos más empleados en la decloración, y dentro de estos son el SO_2 o las soluciones acuosas de compuestos de sulfito (bisulfito, metabisulfito, etc.) los preferidos.

También el carbón activo es un método eficaz que se emplea en los tratamientos de aguas y especialmente en instalaciones no muy grandes. Tanto en polvo (PAC) como en gránulos (GAC) se usan en tratamiento de aguas desde hace años. En la forma de polvo se estima que sólo un 10 % del carbón activo reacciona con el cloro, por lo que se inyecta en línea en las proximidades del punto de cloración para aumentar su eficiencia.

En la forma granular se emplea como medio filtrante y es mucho más eficaz, por lo que resulta la forma normalmente en uso. Simultáneamente a la decloración, el carbón activo granular elimina los compuestos orgánicos.

Finalmente el agua oxigenada se ha empleado en ocasiones como agente declorante aunque es muy inestable y se deteriora fácilmente ante la presencia de diversos agentes contaminantes, por lo que su eficiencia disminuye.

Reacciona muy rápidamente con los iones hipoclorito, pero lentamente con el ácido hipocloroso. Además su reacción ácida hace descender el pH, aumentando la concentración relativa de este último.

La literatura describe otros métodos de decloración como la utilización del amoníaco; sin embargo la adición de amoníaco convierte el cloro libre en monocloramina que aunque es menos oxidante y por tanto no ataca a las membranas, no se puede decir que sea un sistema que realice una decloración completa. Su objetivo fundamental es evitar la formación de NCl_3, que por otra parte necesita para su formación la presencia de HOCl.

También se ha empleado en casos especiales como agente de decloración el NO_2^-, cuando el cloro combinado residual interfiere la medición del aparato analizador.

La aireación no es tampoco un sistema eficiente de decloración puesto que sólo permite la eliminación del ácido hipocloroso. Los iones hipoclorito sin embargo son muy solubles y no resultan afectados por ella. Diversos estudios estiman que a pH superior a 7 la aireación sólo elimina un 15 % del cloro combinado.

Dada la importancia de una completa eliminación del cloro, en los sistemas de OI la decloración se realiza por alguno de los sistemas citados en primer lugar y especialmente mediante sulfitos.

SO_2. El dióxido de azufre es un gas que necesita equipos especiales para su manipulación, pero que resulta muy barato.

Es un gas compresible que, al igual que el cloro, su presión varía con la temperatura, aunque su presión de vapor es bastante diferente. Su solubilidad en agua es de 120 g/l a 15,5 °C.

No es inflamable ni explosivo tanto en forma de gas como líquido y en estado seco no es corrosivo para los metales, aunque basta una pequeña presencia de humedad para que se torne muy corrosivo.

Su manejo en determinadas circunstancias es complicado por la posibilidad de desprendimiento de gases, que aunque no suelen presentar grandes riesgos para los operarios requieren al menos grandes espacios abiertos.

El SO_2 reacciona tanto con el ácido hipocloroso, como con las monocloraminas, según las siguientes reacciones:

$$SO_2 + H_2O \rightarrow H_2SO_3$$

$$ClOH + SO_3H_2 \rightarrow ClH + SO_4H_2$$

$$NH_2Cl + SO_3H_2 + H_2O \rightarrow NH_4Cl + SO_4H_2$$

$$NHCl_2 + 2SO_3H_2 + 2H_2O \rightarrow H_4Cl + ClH + 2SO_4H_2$$

$$NCl_3 + 3SO_3H_2 + 3H_2O \rightarrow NH_4Cl + 2HCl + 3SO_4H_2$$

En estas reacciones se produce una acidificación que afecta a la alcalinidad del agua y posiblemente al pH. Por cada parte de cloro eliminada se consumen 2,8 mg/l de alcalinidad expresada en CO_3Ca.

Estequiométricamente se necesitan 0,9 mg/l de SO_2 para eliminar 1 mg/l de ácido hipocloroso, sin embargo con esta dosificación no se asegura la completa eliminación del cloro residual, si existen otros agentes oxidantes en el agua clorada. Por ello en la práctica se traduce en 1,05 partes de SO_2 por cada parte de cloro.

Es eficaz en la eliminación tanto del cloro libre como del cloro residual, con tiempos de reacción de 20 a 30 segundos.

Pero además el SO_2 puede reaccionar con el oxígeno disuelto del agua según:

$$SO_2 + H_2O + O_2 \rightarrow SO_4H_2$$

por lo que un exceso de SO_2 consume una cantidad importante de oxígeno. Este efecto es positivo en el caso de la ósmosis inversa, dado que ayudaría a la eliminación de la actividad biológica en el caso de contaminación orgánica de la toma.

Sin embargo, la cantidad de SO_2 necesaria, 4 partes por cada parte de O_2 eliminada y la rapidez con que se produce la reacción, apenas deja tiempo para que se produzca dicho efecto.

Quizás el mayor inconveniente es la dificultad de realizar mediciones precisas del mismo, especialmente cuando se emplean sobredosis de SO_2, que frecuentemente son necesarias para asegurar una completa decloración.

Sulfitos. Se utilizan en solución y se aplican mediante dosificadores. Su manejo es por tanto más sencillo.

Existen cuatro productos de posible uso:

— Sulfito sódico.

— Bisulfito sódico.

— Metabisulfito sódico.

— Tiosulfato sódico.

de los cuales el sulfito sódico, que se presenta en forma de polvo o cristales, es muy higroscópico, y el tiosulfato, más caro que los restantes y cuya velocidad de reacción con el cloro es lenta, son menos aconsejables.

Bisulfito sódico (SO_3HNa). Es un material granular o pulverulento blanco con riqueza de hasta un 44 %.

Para su manejo pueden emplearse depósitos de PVC, fibra de vidrio o acero inoxidable.

Reacciona según:

$$SO_3HNa + Cl_2 + H_2O \rightarrow SO_4HNa + 2ClH$$

Se necesitan 1,48 partes de bisulfito por parte de cloro eliminada. La riqueza media del producto comercial suele ser del 38 % y su densidad 1,3. Por cada parte de cloro reducido la alcalinidad expresada en CO_3Ca disminuye en 1,38 partes.

Metabisulfito sódico ($S_2O_5Na_2$). Es un polvo de color crema, fácilmente soluble en agua y disponible en soluciones de distinta riqueza.

Su reacción con el cloro residual es según:

$$S_2O_5Na_2 + 2Cl_2 + 3H_2O \rightarrow 2SO_4HNa + 4CLH$$

Estequiométricamente se necesitan 1,34 partes de metabisulfito por cada parte de cloro eliminado, y la alcalinidad como CO_3Ca se reduce a su vez en 1,38 partes.

En ambos productos, para asegurar la completa decloración, es necesario una mezcla instantánea.

Dosificación. El cálculo de la dosificación es importante, pues si es insuficiente, una parte del oxígeno queda sin reducir y al reaccionar con el Fe o el Mn presente en el agua, puede atacar a la membrana. El Fe puede incluso actuar de catalizador.

Si por el contrario se dosifica en exceso puede el propio bisulfito afectar a la membrana, aunque esta hipótesis no está totalmente confirmada.

Se ha observado que lo mejor es acelerar la reacción del bisulfito con el oxígeno mediante un catalizador, para que el bisulfito esté sólo un tiempo muy corto en

contacto con la membrana. El óxido de cobalto resulta muy rápido y eficaz como catalizador.

También actúa de catalizador el $(SO_4)_3Fe_2$ y el SO_4 Cu, pero los residuos de estos al reaccionar con el O_2 aceleran el proceso de ataque a la membrana.

Debe analizarse el contenido de O_2 en la alimentación y en el rechazo. En éste será algo mas elevado puesto que el O_2 atraviesa la membrana y el volumen de rechazo es inferior al de alimentación.

Reacciones químicas secundarias de la cloración/decloración

La utilización de la cloración/decloración como pretratamiento del agua de mar, produce con frecuencia otras reacciones de complicada explicación y que pueden inutilizar el procedimiento, sospechándose están relacionadas con la existencia en los productos químicos de algunos elementos en cantidades mínimas.

En cuanto a la utilización del metabisulfito es interesante el trabajo de Neta y Huie sobre la «química de radicales libres del sulfito».

El dióxido de azufre SO_2 (anhídrido sulfuroso) es un contaminante importante del aire que se disuelve en agua formando bisulfito y sulfito, y a mayor concentración disulfito:

$$SO_2^+ \text{ (agua)} = H^+ + HSO_3$$

$$HSO_3 = H^+ + SO_3^=$$

$$HSO_3 + SO_2 \text{ (agua)} = HSO_2O_5$$

Existen dos posibles fuentes de radicales del sulfito. Un ambiente rico en oxígeno produce un medio favorable para la autooxidación del sulfito la cual puede iniciarse con trazas de iones metálicos. La S-sulfocisteína que puede existir en la materia orgánica.

Gran parte del interés de la química de los radicales del sulfito procede del hecho de que la reacción de éste con diversos compuestos orgánicos requiere la presencia de un agente oxidante, normalmente oxígeno molecular.

Pero también ciertos compuestos orgánicos inhiben esta oxidación.

La oxidación del sulfito catalizada por trazas de iones metálicos puede inhibirse por la complejación del ión metálico.

Los iones sulfito y bisulfito experimentan una oxidación de un electrón por varios radicales para producir SO_3. Los radicales hidroxilo reaccionan con el sulfito y bisulfito en proporciones muy elevadas.

La velocidad de oxidación por otros radicales desciende en un orden que refleja el potencial de oxidación esperado de estos radicales.

Mientras los radicales hidroxilo y sulfato reaccionan con el bisulfito dos veces más rápidamente que con el sulfito, para cualquier otro radical la reacción con el sulfito es siempre la más rápida. Para el Br_2 el ratio es de 4 y para el oxidante más débil I_2 es de alrededor de 200.

La oxidación de las soluciones de sulfito en presencia de trazas de iones metálicos ha sido ampliamente estudiada.

Para oxidantes fuertes como el Manganeso la reacción es rápida y aparentemente irreversible. Para oxidantes más débiles como el hierro la reacción es mucho más lenta y reversible.

Cuando se clora con hipoclorito sódico, se declora con metabisulfito sódico en proporción de 2 ppm de este último por cada 1 ppm del primero. El problema es que, además del cloro aportado, en el agua existe O_2 que también hay que neutralizar. También puede haber hierro y manganeso en proporciones pequeñas que provocan oxidaciones.

Estos también se neutralizan con metabisulfito, pero la reacción es demasiado lenta, por lo que en muchas ocasiones no se desarrolla totalmente y el Fe y el Mn no son neutralizados completamente, produciéndose un medio oxidante que afecta a la membrana.

Para evitarlo puede incrementarse la dosis de metabisulfito hasta 35-65 ppm, pero se encarece el pretratamiento.

Otra solución consiste en encontrar un catalizador que acelere el proceso. Esto se consigue con el Cobre y el Cobalto, que generalmente no se pueden utilizar en membranas aniónicas (poliamidas aromáticas), pues se depositan sobre ellas formando un precipitado que queda pegado fuertemente a causa de la diferencia de cargas y que resulta difícil de limpiar.

El metabisulfito actúa también sobre las membranas como conservante y antiséptico, por lo que se utiliza como elemento de preservación durante las paradas prolongadas de la instalación o en los envíos de membranas tras su fabricación.

7.1.4. Inhibición

Se realiza mediante la dosificación de productos químicos que se agregan al agua que se va a tratar en cantidades muy pequeñas, consiguiendo aumentar la solubilidad de los distintos iones en el agua, en ocasiones hasta niveles de varias veces su solubilidad normal.

Con ellos se puede por tanto aumentar la recuperación de la instalación y en consecuencia abaratar tanto la inversión en equipos como en gastos de funcionamiento.

Las dosificaciones óptimas son muy pequeñas en relación con las concentraciones de los cationes susceptibles de precipitación.

Su uso está ampliamente extendido en las instalaciones de desalación, aunque son más frecuentes en las instalaciones de agua salobre, puesto que en ellas se trata de operar a conversiones lo más altas posibles (mayor del 70 %) y por tanto la concentración de sales en la salmuera es muy elevada.

En las instalaciones de agua de mar no son tan necesarios dado que se opera a conversiones normalmente inferiores al 50 %.

Su actuación se centra principalmente en la inhibición de precipitados de sales derivadas de los sulfatos (SO_4, Ca, SO_4, Ba, SO_4Sr, etc.).

Además algunos de ellos son especialmente interesantes en el caso de algunos iones específicos como el flúor o la sílice, cuyos efectos por precipitación sobre las membranas son muy perjudiciales.

En su mayor parte se trata de derivados de polifosfatos, y más recientemente poliacrilatos y/o polimaleatos.

El primer inhibidor o secuestrante que se utilizó fué el hexametafosfato sódico (SHMP) y todavía los polifosfatos son los productos más utilizados.

Estos productos poliméricos se obtienen a partir de la deshidratación del ácido ortofosfórico o de su sal sódica, siendo el ya citado hexametafosfato sódico, de fórmula $(NaPO_3)_6$, el más activo del grupo.

El SHMP se hidroliza en poco tiempo para formar ortofosfato que es inactivo como inhibidor, por lo que debe prepararse con frecuencia. Su uso inadecuado puede provocar la formación de precipitados de fosfato cálcico. Tampoco es un buen dispersante.

Posteriormente se han desarrollado numerosos polímeros orgánicos de síntesis, con aplicaciones específicas, que han mejorado su efectividad.

Los primeros polímeros se producían a partir de ácidos poliacrílicos de bajo peso molecular, tenían un control limitado de carbonatos y eran poco eficaces como dispersantes de materia orgánica, aunque suponían una mejora sobre el SHMP.

Aunque aparecen con distintos nombres comerciales se trata de ácidos poliacrílicos, polímeros del metacrilato, ácidos policarboxílicos, poliacrilamidas, y ácidos aminoalcalifosfóricos.

El mecanismo de inhibición no está muy claro, pero una de sus características es el poder secuestrante de la capacidad de formar quelatos estables con cationes polivalentes. Por ello a los inhibidores se les conoce también como productos secuestrantes.

Las soluciones tratadas con secuestrantes se estabilizan de alguna manera, provocando una alteración en la morfología del cristal e inhibiendo su crecimiento.

La aplicación del tratamiento de inhibición tiene un coste químico bajo, su manejo es sencillo, y apenas ocasionan corrosión de los equipos. Su principal incon-

veniente es la inestabilidad con la temperatura de ciertas preparaciones y que no se eliminan completamente los riegos de precipitación.

Algunos productos a base de polimetacrilato sódico o ácido policarboxílico son efectivos incluso a elevadas temperaturas del agua.

Otros, de fuerte reacción ácida, reducen la aplicación de ácido para el control del pH, como es el caso del «Flocon» y el Permatrip.

Además de los carbonatos y sulfatos, el hierro, aluminio y manganeso, menos frecuentes en las aguas, también forman hidróxidos que precipitan.

Existen inhibidores que estabilizan el Fe, Al y Mn y pueden dispersar óxidos metálicos, limos y arcillas.

Asimismo, uno de los elementos más problemáticos para las instalaciones de agua salobre, la sílice, ha sido objeto de profunda investigación en este campo, y los productos más recientes que se anuncian realizan una inhibición bastante completa de su acción, pudiéndose al parecer superar varias veces su solubilidad.

La experiencia real que se tiene con ellos es sin embargo todavía limitada por lo que se aconseja ser prudente en su uso, puesto que no son la panacea para todos los precipitados. Determinados iones pueden catalizar la precipitación, reduciendo la eficacia de dichos productos.

Uno de los aspectos negativos que ofrecen algunos antiincrustantes orgánicos es que promueven la proliferación de organismos perifíticos inmediatamente después de la decloración.

7.2. Otros pretratamientos

Aunque los citados anteriormente constituyen la base del diseño de la mayoría de las instalaciones desaladoras, en ocasiones se presentan problemas específicos que requieren cuidados apropiados. Entre ellos podemos citar:

7.2.1. Aceites y grasas

Los aceites y las grasas no son frecuentes en las aguas subterráneas a menos que el pozo haya sido contaminado por una fuente externa, ni tampoco en las tomas de agua de mar cerradas. Sin embargo en los casos de tomas abiertas pueden estar presentes.

La eliminación de aceites y grasas, además de mediante filtros especiales, puede realizarse mediante determinados productos. El más empleado es el carbón activo que puede utilizarse tanto en forma granular como en polvo.

En el primer caso se utilizan los conocidos filtros de carbón activo, con una filosofía de filtración similar a la de los filtros de arena.

El empleo en polvo se puede hacer mediante la preparación de una solución espesa que se dosifica en continuo en los colectores de alimentación antes de los filtros de arena, los cuales retienen el carbón con los aceites adsorbidos sobre su superficie.

7.2.2. SH_2

Sin embargo las aguas subterráneas sí pueden contener algunos elementos que ocasionan ensuciamientos problemáticos en las membranas.

Entre ellos se encuentra el ácido sulfhídrico que al oxidarse se transforma en azufre elemental, produciendo un ensuciamiento sobre las membranas de azufre coloidal, que es muy difícil de eliminar mediante limpieza.

No existe ningún pretratamiento que evite el ensuciamiento de azufre coloidal, por lo que habrá que cuidar el diseño.

La oxidación del SH_2 puede evitarse tratando de que el aire no penetre en el sistema. Si la oxidación se produce antes de los últimos filtros de bujías, en estos se retiene una buena parte del azufre coloidal, reduciéndose el riesgo de daños a las membranas. Por tanto el diseño de la instalación debe cuidarse especialmente en la zona comprendida entre los últimos filtros y las membranas, para que no haya fugas que permitan la entrada de aire.

7.2.3. Agentes oxidantes

La oxidación por cualquier otro oxidante se conseguirá evitando su inyección en el sistema.

La desinfección de aguas con elevada actividad biológica, que se efectúa preferentemente con hipoclorito sódico, debería eliminarse por completo en instalaciones en que no se pueda prestar una atención y mantenimiento adecuados, dado que el cloro es un fuerte oxidante y lo mismo puede decirse de cualquier otro producto oxidante. En caso de ser imprescindible su uso, deberá hacerse su reducción como se ha indicado anteriormente, siempre antes de los filtros de bujías y con unas dosis de reductor suficientemente altas para que garanticen la inexistencia de oxígeno libre, cloro residual o cualquier otro oxidante secundario.

7.2.4. Hierro

El hierro puede encontrarse en el agua en forma soluble e insoluble, siendo en esta última forma en la que se ocasionan los problemas de ensuciamiento.

Es más frecuente en las aguas de pozo que en las de mar, a no ser que en estas últimas exista una contaminación específica, ajena por tanto a la propia composición del agua. Las aguas de pozo que contienen más de 0,1 g/l de hierro, casi siempre contienen bicarbonato ferroso soluble.

Aunque normalmente el contenido de Fe^{2+} es inferior a 5 mg/l, se han encontrado casos de 60-65 mg/l. La solubilidad de este Fe^{2+} está limitada por el carbonato CO_3Fe. Como regla las aguas altamente alcalinas tienen menores concentraciones de hierro que las aguas de baja alcalinidad.

El Fe^{2+} soluble es rechazado por las membranas como cualquier ión bivalente y no se produce el ensuciamiento. Sin embargo si en el agua existe SH_2 reacciona con el Fe^{2+} formando un precipitado negro insoluble de SFe. Las aguas de pozo con SH_2 sin embargo tienen generalmente un contenido en hierro Fe^{2+} muy bajo y no se forma el SFe, a menos que se añada hierro al agua, como puede ser el caso de la utilización de materiales inadecuados, que se corroen fácilmente. El fenómeno está además influenciado por la presencia de otros gases disueltos como el O_2, CO_2.

Si el Fe^{2+} se oxida a Fe^{3+} se forman compuestos de $Fe(OH)_3$, $Fe(OH)_3$ y Fe_3O_4 que son insolubles.

La solubilidad del F^{3+} en agua salobre o de mar está gobernada por la solubilidad del $Fe(OH)_3$.

Otra fuente de producción de hierro insoluble son las bacterias de hierro como Crenothrix y Leptothrix y Gallionellax que oxidan el Fe^{2+} a Fe^{3+}.

Las aguas de pozo con Fe^{2+} generalmente contienen poco oxígeno, por lo que si se evitan los oxidantes manteniendo en el sistema una condición de anaerobiosis, como en el caso del SH_2, no deben esperarse problemas.

En el caso de las bacterias la desinfección del pozo con HClO y Cl_2 sólo limita temporalmente el crecimiento de bacterias, por lo que se puede dosificar Cl_2 en continuo y con un coagulante catiónico polielectrolito se realiza una filtración multicapa (arena/antracita).

Los óxidos de hierro pueden existir en dispersiones coloidales, durante largos periodos de tiempo. A causa del pequeño tamaño de las partículas de los óxidos de hierro en suspensión, las técnicas analíticas normales para medir Fe^{2+} soluble deben incluir también las especies coloidales.

La tasa de oxidación del Fe^{2+} es muy dependiente del pH. Para un pH de 5,5 a 9 la máxima solubilidad del Fe^{2+} es de solo 0,001 mg/l.

Un aumento de éste de una unidad produce un incremento en la tasa de oxidación de 100. En presencia de oxidantes fuertes como el cloro, permanganato potásico y ozono, el Fe^{2+} se oxida fácilmente incluso en ambientes ácidos.

Por tanto también la oxidación del Fe^{2+} se previene bajando el pH por debajo de 5,5. De esta forma se pueden mantener contenidos de Fe^{2+} hasta de 4 ppm sin ensuciamiento.

Si el contenido de Fe^{2+} es superior a 4 hay que eliminarlo con Cl_2 o permanganato, que forman óxidos insolubles de hierro eliminables por filtración.

Los iones Cl^- y $SO_4^=$ en las concentraciones existentes en el agua de mar tienden a retrasar la oxidación del Fe^{2+}. Es unas 100 veces menor que en aguas salobres de baja salinidad.

Algunos fabricantes, como normas de precaución adicional para las membranas, citan los niveles máximos de hierro tolerables en el agua de alimentación.

Cuando el agua contiene valores superiores a los considerados máximos, con el fin de poder acogerse a las garantías de las membranas, habrá que eliminar el exceso de hierro con alguno de los procedimientos ya conocidos en el tratamiento de aguas.

7.2.5. Sílice

La *sílice* puede estar presente en cantidades importantes en el agua salobre de algunos pozos, aunque no en el agua de mar. Su existencia suele estar ligada a zonas de origen volcánico.

Como ya hemos dicho ocasiona problemas a las membranas cuando en el rechazo (salmuera) se sobrepasan sus límites de solubilidad. La precipitación de sílice sobre las membranas provoca un ensuciamiento irreversible de las mismas.

La forma mas eficaz de evitar el ensuciamiento por sílice es bajar la conversión del sistema hasta valores en que no se superen los límites de solubilidad en el concentrado.

Dado que la sílice actúa más como un polímero que como un ión cristalino, los inhibidores o secuestrantes usuales no son efectivos para estabilizar sus soluciones supersaturadas.

Sin embargo nuevos productos están apareciendo en el mercado, que como se ha citado anteriormente parecen prometedores en su efecto de inhibidor de precipitados.

La solubilidad de la sílice aumenta con la temperatura, por lo que dentro de ciertos límites se puede aumentar la conversión del sistema, elevando la temperatura del agua de alimentación.

El contenido de sílice del agua puede reducirse de forma importante por procedimientos físico-químicos de coagulación-floculación. Los productos empleados suelen ser el cloruro férrico y la cal, junto a cantidades mínimas de algún polielectrolito orgánico.

El proceso es sin embargo bastante complejo, tanto desde el punto de vista de los equipos a utilizar como desde el de las dosificaciones a utilizar. Resulta por consiguiente bastante caro y no se recurre generalmente a él.

Lo mismo puede decirse de la ultrafiltración que elimina más del 99 % del contenido de sílice, pero de la que ya se ha comentado su prohibitivo precio.

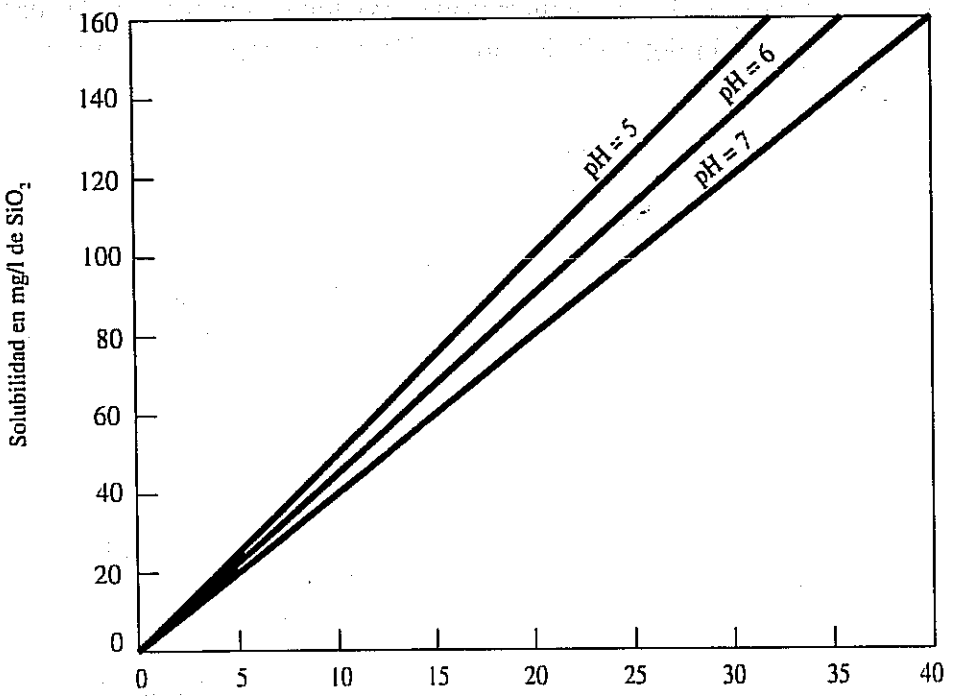


Fig. 7.9. Solubilidad de la SiO_2 con la temperatura y el pH.

Unicamente en casos de aguas con fuerte carga orgánica que precisen ser desaladas estaría justificada la reducción del contenido en sílice, pero no como un proceso específico, sino como parte de otro más amplio para eliminar el elevado contenido en sólidos en suspensión que lleva el agua, y que obstruiría rápidamente los filtros de cartuchos y membranas.

7.3. Post-tratamiento

Dos son los procesos principales a los que se somete un agua desalada:

7.3.1. Ajuste pH

El agua desalada mediante membranas tiene un pH bajo (aprox. 5,5) es pobre en calcio y de baja alcalinidad, debido al elevado rechazo de estos iones por las mismas. Es por tanto un agua desequilibrada.

Su baja alcalinidad y la presencia de CO_2 la hacen corrosiva pudiendo disolver los precipitados de las tuberías e incluso incumplir algunos aspectos de la normativa técnico-sanitaria.

El CO_2 se forma por la reacción del sulfúrico con los bicarbonatos y pasa fácilmente a través de la membrana por lo que se acumula en el permeado.

Para estabilizarla hay que llevar estos parámetros a su equilibrio de saturación de $CaCO_3$.

También en ocasiones contiene SH_2, especialmente cuando se tratan aguas subterráneas. Por tanto hay que estabilizarla con respecto al CO_3Ca llevando el pH a 6,5-8 y posteriormente debe desinfectarse si se va a dedicar al abasto.

La estabilización se consigue por tres procedimientos:

a) Descarbonatación o desgasificación.

Se realiza mediante una torre en la que el agua entra por la parte superior mediante unos difusores y percola a través de un material que puede tener distintas formas y tamaños; determinando en función de estos la superficie de la cámara de desgasificación.

Simultáneamente, se inyecta una corriente de gas distinto del que se pretende separar, a contracorriente que generalmente se trata de aire.

De esta forma el CO_2 se reduce a menos de 10 m/l y el pH queda en 6-6,5.

Si el contenido en CO_2 del permeado es bajo, no se precisa el desgasificador.

También se pueden emplear torres de enfriamiento, difusión de aire, desgasificación por spray o desaireadores de vacío.

b) Adición de productos químicos.

Generalmente se emplea la cal, CO_3Ca, NaOH (sosa caústica) o Na_2CO_3 (soda ash). Con los dos últimos productos, aunque el pH se estabiliza, la ausencia de Calcio no garantiza que el agua no sea corrosiva, por lo que debe agregarse un inhibidor de la corrosión que proteja los materiales.

El coste de los productos químicos (dosificación) se reduce usando también el desgasificador.

c) Mezcla con otras aguas.

En este caso el agua desalada debe suponer al menos el 10 % de la mezcla.

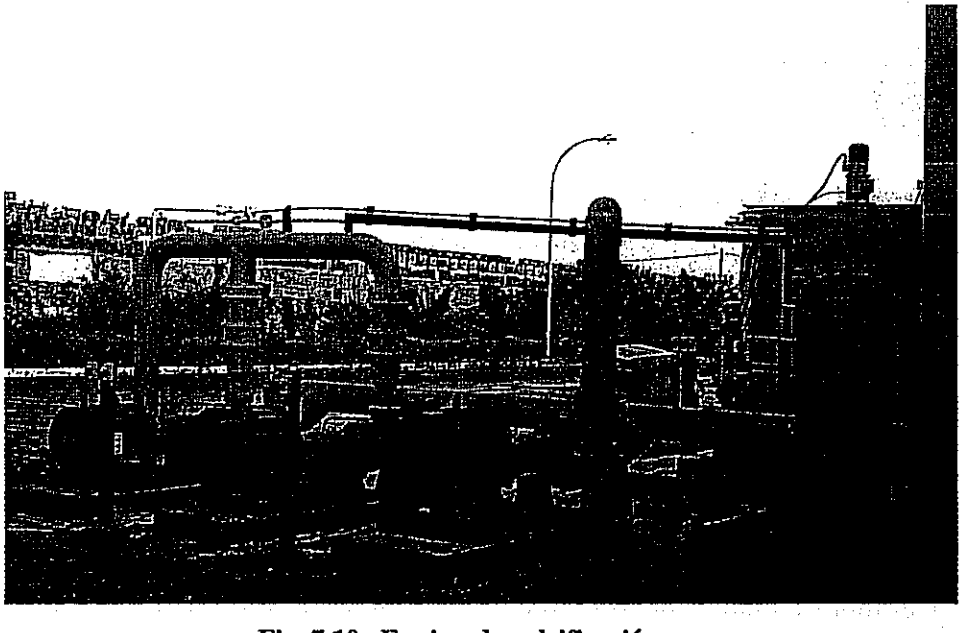


Fig. 7.10. Equipo de calcificación.

7.3.2. Post-cloración

Como el agua que se va a desalar ha sido desprovista de sus características oxidantes mediante la dosificación de bisulfito sódico, en el producto no existen rastros de cloro residual.

Como antes de su uso final suele almacenarse en algún depósito, existen riesgos de que vuelva a contaminarse de nuevo.

Por ello si el agua se va a dedicar a abastecimientos urbanos es necesario volverla a clorar para cumplir la normativa sanitaria en cuanto a presencia de cloro residual de la red.

Los tres procedimientos de cloración que se emplean en esta fase son:

— Gas cloro. Muy extendido en los abastecimientos, por su menor coste, cuando se tratan grandes caudales. Su manipulación es más peligrosa y se requiere aislar adecuadamente los equipos para evitar accidentes.

— Hipoclorito sódico. Como ya se ha indicado anteriormente es el procedimiento más barato tanto de implantación como de funcionamiento.

— Hipoclorito cálcico. Similar en su aplicación al anterior, tiene sobre él la ventaja de aportar calcio, que sirve para elevar el contenido de este elemento en el agua producto, que como ya se ha dicho está muy desequilibrada desde el punto de vista de su contenido iónico.

En ocasiones se puede intentar la carbonatación y cloración de una sola vez con la dosificación de cloruro cálcico.

Este procedimiento se usa cuando el depósito principal de almacenamiento de agua está alejado de la instalación desaladora y no dispone de personal, con lo que desde la propia planta se pueden realizar ambos post-tratamientos.

La dosificación es más cara y menos precisa, sobre todo teniendo en cuenta que el agua puede estar almacenada en el depósito final períodos de tiempo relativamente largos.

7.4. Aplicación de los tratamientos

Aunque la mayoría de los equipos de tratamiento químico deben formar parte de una instalación desaladora, no siempre son totalmente necesarios.

Sin embargo y especialmente en el caso de instalaciones de gran capacidad, la inversión que supone cualquiera de ellos respecto al total de la misma es tan reducida, que se emplean simplemente como elementos de seguridad.

Además su uso no es infrecuente a lo largo de la vida de la instalación, puesto que los grandes caudales de alimentación que se precisan pueden introducir variaciones en el tiempo en la calidad físico-química del agua.

La aplicación de los distintos tratamientos se realiza sin embargo en distintos puntos de la instalación, de acuerdo con la función que deben cumplir.

7.4.1. Desinfectante

La desinfección con cloro o hipoclorito debe poderse aplicar en los siguientes lugares:

— Toma de agua.

— En continuo antes de los filtros de arena.

— Después de la inyección de ácido sulfúrico.

— En el agua producto.

7.4.2. Coagulante

— Antes de los filtros de arena.

7.4.3. Acido sulfúrico

— Después de la inyección de hipoclorito.

— Antes de los filtros de arena.

7.4.4. Reductor

— Entre filtros de arena y de cartuchos.

— A la salida de los filtros de cartuchos.

— En la toma de agua.

7.4.5. Inhibidor

— Entre los filtros de arena y de cartuchos.

7.5. Diseño de los equipos de pretratamiento químico

El diseño del sistema de pretratamiento de una instalación de ósmosis es quizás el aspecto más importante, por su incidencia directa en el buen funcionamiento y rendimiento de las membranas.

Una membrana se diseña para dar un flujo y un rechazo de sales característico en las condiciones en que se prueba en fábrica, es decir, con un agua libre de coloides y de una composición química determinada. Las condiciones en que trabajan

las membranas en las instalaciones son bastante distintas de las ideales de diseño; por tanto cuanto más se aproximen a ellas tanto mejor será el funcionamiento y la vida de la membrana.

El pretratamiento tiene que tener por tanto en cuenta tanto el agua de alimentación como la membrana que se utiliza.

En las instalaciones de gran tamaño, en particular en el caso de agua de mar, la importancia que tiene el disponer de una toma de agua cerrada o en pozo da lugar a retrasos importantes en el alumbramiento de los caudales necesarios, que influyen en toda la obra, pues hasta muy avanzada la misma no es posible disponer de datos sobre las condiciones del agua a desalar. Es aconsejable por tanto dotar a la instalación de todos los equipos necesarios para la situación más negativa que pueda presentarse.

Aún en el caso de que luego no se utilizaran todos los pretratamientos, la repercusión de estos equipos en el total de la obra apenas representa un 1-2 %, que bien pueden invertirse como elemento de seguridad de la instalación. Además aún cuando las condiciones de la toma sean buenas, a lo largo de la vida útil de una planta pueden producirse esporádicamente situaciones complicadas que obliguen aunque sea por cortos períodos a la utilización de los equipos existentes.

Al diseñar los equipos debe pensarse no solo en la capacidad con que arranca la planta sino las posibles ampliaciones de la misma, con objeto de disponer desde el principio de unos equipos que no va a ser necesario ampliar en el futuro. Además conviene repartir el volumen a dosificar entre varias bombas y colocar una más de repuesto, con lo que se puede atender grandes variaciones en la dosificación, que pueden responder en función del número de bastidores de la instalación que estén en operación.

Para facilitar y automatizar esta adaptación, los variadores de frecuencia son muy aconsejables.

En instalaciones pequeñas sin embargo hay que ser más concretos en el diseño y sólo colocar aquellos equipos que realmente vayan a utilizarse, pues la repercusión del pretratamiento en el coste de la inversión puede ser importante.

7.6. Instalaciones sin pretratamiento químico

Aunque en las instalaciones grandes o industriales se trata de buscar la mayor eficiencia del sistema y ello requiere la aplicación de cuantos tratamientos sean necesarios, se dispone de los equipos y el personal de operación necesario para su aplicación.

Sin embargo en instalaciones de menor tamaño y en situaciones de aislamiento geográfico, en las que resulta difícil conseguir no solo los productos químicos, si-

no incluso el personal con la cualificación adecuada, se puede sacrificar la eficiencia de la instalación buscando una mayor seguridad en el funcionamiento y evitando al máximo los riesgos de la manipulación de los productos.

La eliminación de los pretratamientos químicos ayuda en este sentido; sin embargo, ello obliga a una serie de consideraciones para contrarrestar estas carencias, fiando todo el pretratamiento a la instalación de filtros de arena y cartuchos, que requieren una selección oportuna del material filtrante y a ser posible la automatización del proceso de lavado, que se hará solo con agua a contracorriente.

Aunque los aspectos del diseño a tener en cuenta son muy similares para instalaciones de agua salobre que para agua de mar, haremos unas ligeras matizaciones.

7.6.1. Agua salobre

Respecto a las características químicas del agua como se trata de agua de pH alcalina, la no utilización de ácido para regulación del pH y evitar la precipitación de carbonatos obliga de un lado a reducir la conversión, que en ningún caso superará el 60 % en condiciones normales y el 50 % cuando existan algunos iones limitantes, para evitar su supersaturación en el concentrado y por otro a operar la instalación a los pH naturales del agua.

Esto supone la imposibilidad de utilizar membranas de acetato de celulosa por su posibilidad de hidrólisis a dichos pHs y a seleccionar las membranas de poliamida para obtener el máximo rechazo de sales cerca de dichos valores. En ocasiones incluso será necesaria una segunda etapa de ósmosis si las exigencias en cuanto a calidad de agua fueran elevadas, puesto que al bajar la conversión la calidad del agua empeora.

También será conveniente realizar diseños de mayor caudal específico GFD, es decir, con mayor número de membranas para disminuir simultáneamente la presión de funcionamiento y los riesgos de ensuciamiento.

Finalmente, respecto a la captación, es de primordial importancia realizarla a través de un pozo para mejorar las características físicas del agua a tratar.

7.6.2. Agua de mar

Se trata de plantas, generalmente de pequeña capacidad, y que se instalan en numerosos barcos, o en zonas aisladas y con dificultades de operación y mantenimiento para su abastecimiento.

Este tipo de instalaciones, al prescindir del pretratamiento, permiten un ahorro de espacio y problemas de mantenimiento, sin embargo son más vulnerables, su duración en especial la de las membranas es menor, y por tanto los costes de producción del agua desalada son muy superiores.

Las principales características de estas plantas son:

— Toma de agua de mar: 1,50 m bajo la superficie del agua para evitar contaminaciones de aceites y grasas; colocando una rejilla para asegurar una filtración grosera.

— Filtros sencillos de arena.

— Filtros de cartuchos de 5 a 10 micras.

— Control automático del caudal de producción y adaptación de la presión de alimentación al valor óptimo en función de la temperatura del agua, para evitar la fatiga mecánica de las membranas.

— Factor de Conversión del 30 al 35 %.

— No utilizan sistemas de limpieza de membranas.

Los resultados obtenidos son bastante razonables aunque su variación es muy diferente según la instalación sea utilizada en las proximidades de la costa o en alta mar.

Como datos más significativos en el segundo caso pueden citarse:

— Variaciones del caudal en torno al 3 % por cada °C, en condiciones constantes de presión y conversión.

— La disminución del caudal suele ser importante en el primer año, de un 13 a un 15 %, pero posteriormente se produce una estabilización con descenso medio del 3% en el segundo.

— Paso de sales: variación media del 1,1 al 1,4 % para el primer año y de 1,1 a 2 % en los siguientes.

7.7. Pretratamientos especiales

Aunque han quedado reflejados en estos dos últimos capítulos la mayoría de los tratamientos regularmente utilizados en las instalaciones de ósmosis inversa, no debe olvidarse que se trata en definitiva de tratamientos de aguas y que permiten en consecuencia todas las opciones que son conocidas en este campo, aunque debe buscarse siempre el menor coste y complejidad de los procesos.

El agua de mar es como ya hemos comentado bastante homogénea, pero en el agua salobre las variaciones según lugares son enormes, por lo que en estas instalaciones se encuentran a veces sofisticaciones mayores, algunas de las cuales requieren algún comentario.

Entre la simple filtración que podría utilizarse en casos de pozos de agua salobre muy limpia y el pretratamiento recomendado más completo y que consistiría en la cloración electrolítica, coagulación en línea con sulfato ferroso, filtración con

filtro multicapa, afino con filtro de antracita y greensand, decloración con exceso de metabisulfito sódico que baja el pH a 7,5, pueden presentarse algunos casos singulares entre los que podríamos citar:

7.7.1. Filtración en reciclaje

Se realiza como en el caso de una piscina con un filtro de velocidad rápida 30-40 m/hora colocado en derivación con un decantador en el que previamente ha sido tratada el agua.

Después de un reciclaje de varias horas, a través de este depósito se transvasa a un segundo depósito que alimentará la ósmosis, mientras que el depósito primero vuelve a llenarse de agua e inicia el reciclaje.

Tiene aplicación en instalaciones de tamaño pequeño a medio, pues para las otras requiere la construcción de depósitos grandes que complica y encarece el proceso.

7.7.2. Sistema de decantación estática filtración lenta

El agua de mar se pasa primero por un tanque de decantación primaria con el fondo bastante inclinado para permitir la evacuación continua de arenas, residuos sólidos, etc.

A continuación pasa a un segundo decantador alimentado por gravedad, para evitar turbulencias y desde aquí se toma el agua para llevarla a los filtros de presión.

Los filtros deben trabajar a velocidad lenta 3-5 m/hora con tres materiales filtrantes de densidad y tamaño crecientes superpuestos. El lavado de los filtros se realiza a contracorriente con el agua filtrada.

CAPITULO 8

MATERIALES

8.1. Introducción

Las instalaciones de ósmosis inversa se construyen para funcionar durante períodos de tiempo no inferiores a 15 años.

Dado que los equipos mecánicos elegidos y mantenidos convenientemente pueden durar perfectamente estos períodos, y que las membranas se someten a renovaciones periódicas que no afectan al resto de la instalación, es preciso seleccionar adecuadamente los materiales que se van a emplear en las distintas partes de la instalación, para que respondan de acuerdo con los citados criterios y que no sean ellos los que provoquen un mal funcionamiento o deterioro de las mismas.

El principal obstáculo que se opone al funcionamiento en forma continua y regular es la corrosión, tanto en aguas salobres como sobre todo en agua de mar, que puede afectar a todos los elementos de la instalación desde equipos móviles, hasta válvulas, estructuras, instrumentos y hasta circuitos electrónicos de los equipos de control.

Para evitarla se puede recurrir a varios métodos, pero resulta más importante el análisis de los materiales a instalar.

Pero además del deterioro de los materiales como consecuencia de la corrosión, hay otro factor a tener en cuenta a la hora de seleccionar materiales, que es la presión que deben soportar.

Desde el punto de vista de las presiones, la instalación se compone de dos partes perfectamente diferenciadas, alta y baja presión, lo que determina ya dos tipos de materiales.

Aunque ya se ha indicado en otro lugar que la denominación de alta presión es a veces inapropiada en instalaciones de agua salobre dado que actualmente existen membranas que trabajan a presiones muy bajas y que por tanto pueden considerar-

se bombas normales, a medida que aumenta la salinidad del agua a tratar esa denominación se hace más adecuada especialmente en el tratamiento de agua de mar.

Por último, en los tratamientos químicos que deben aplicarse para acondicionar el agua a tratar, se agregan reactivos que también exigen materiales adecuados para su manipulación.

Los materiales a emplear serán pues función de dos aspectos principales:

— La presión que soportan.

— La corrosividad o agresividad de los líquidos que conducen.

En este último aspecto, en una instalación desaladora los líquidos a manipular son, por una parte, el agua que según los casos tendrá distintas salinidades y pH, y por otra los reactivos del pretratamiento.

Aunque en algunas circunstancias, por razones de presupuesto, no pueden seleccionarse los materiales más convenientes, deben conocerse al menos los problemas que pueden presentarse, para con un mantenimiento adecuado minimizarlos.

Los materiales que componen los distintos equipos de ósmosis inversa son muy variables en función de las características del agua y de la parte de la instalación de que se trate.

Pero antes de hablar de selección de los materiales debe hablarse de las causas que afectan a los mismos.

8.2. Corrosión

Con carácter general se conoce como corrosión el paso de un metal de su estado actual al estado de óxido, acercándose a lo que era su estado natural.

La corrosión tiene lugar en contacto de un líquido con un metal y da lugar a la formación de un óxido; es decir, lo que se conoce como oxidación.

La corrosión puede ser considerada como un fenómeno estrictamente químico, o como un fenómeno bastante más complejo de naturaleza electroquímica.

En el caso de las instalaciones desaladoras la corrosión se produce en tres circunstancias diferenciadas

— En unos casos, la propia ubicación de la instalación, cerca de la costa o en un área industrial, hace que las sales en suspensión del ambiente marino o los gases de azufre, amoníaco u otros desprendidos, provoquen un tipo de corrosión conocida como atmosférica.

— En otros, el agua en contacto con el material provoca una corrosión acuosa por medio de sus componentes.

— Finalmente, los productos químicos que se utilizan en un proceso al entrar en contacto con los materiales provocan la corrosión química.

Aunque la corrosión es mayor en las instalaciones desaladoras de agua de mar, las de agua salobre tampoco son ajenas a este problema.

Hay tres factores fundamentales que influyen en la corrosión:

— La naturaleza del fluido.

— Su temperatura.

— El nivel de O_2 y CO_2.

Las pruebas de corrosión que se realizan con muestras de metales en laboratorio han permitido la fabricación de distintos tipos de materiales resistentes a las más variadas condiciones.

Sin embargo, dichas pruebas se realizan normalmente con líquidos en reposo, es decir, con líquidos estancados. Como en las instalaciones de ósmosis esta situación no es la general y especialmente en el caso de las bombas, los citados resultados deben analizarse con mayor profundidad, y atendiendo al tipo de equipo o parte de la instalación de que se trate.

Por ejemplo, en determinadas partes de una bomba, las velocidades de un fluido son muy superiores a los límites que pueden considerarse aceptables para tuberías y en consecuencia la corrosión no es tan importante.

Pero también si la bomba ha de permanecer largo tiempo parada se darán condiciones de estancamiento del agua, que la hacen más agresiva, especialmente si contiene aditivos.

La elección de determinados materiales obligará a realizar desplazamientos del agua estancada de la bomba, cuando se va a dejar fuera de servicio.

La corrosión se puede presentar bajo distintas formas aunque todos los equipos no son igualmente sensibles a ellas. Los tipos más frecuentes en que se aparece son:

La *corrosión general* es una reacción electroquímica que conduce a la formación de un óxido del metal atacado, generalmente de menor resistencia que el material a partir del cual se forma. No se suele presentar en las instalaciones de cierta importancia en un equipo o un elemento, pues se soluciona fácilmente con la selección de los espesores adecuados.

Pero en cambio los equipos son más propensos a la *corrosión de carácter local o puntual.* A este nivel aparece bajo distintos aspectos, siendo los más frecuentes en desaladoras de ósmosis inversa:

8.2.1. Por erosión

Se produce cuando las velocidades de los fluidos exceden ciertos niveles, por errores de diseño o por la presencia de obstáculos u obstrucciones en el recorrido.

Tampoco es demasiado preocupante dado que distintas experiencias demostraron que la simple adición de un 3% de cromo al acero al carbono era suficiente para evitarla.

De hecho las aleaciones de acero que se emplean en las instalaciones de ósmosis contienen alrededor del 12 % de cromo.

8.2.2. Por picaduras (Pitting)

Depende de la capa delgada de cromo y otros óxidos que se forman rápidamente sobre la superficie del metal en presencia de aire.

Se origina cuando en esta capa se produce un ataque de naturaleza electroquímica que la atraviesa. La región afectada se corroe a menos que se vuelva a repasivar mediante la creación de otra capa de óxido del material que se corroe.

Es la más importante y puede ser ocasionada por:

— La presencia de niveles de oxígeno tan bajos como 40 ppb.

  Se evita con la utilización de aceros martensíticos y contenidos de cromo superiores al 5 %.

— El pH del agua. En general el agua en condiciones de acidez provoca este tipo de corrosión.

  Puede darse por tanto en los equipos que manipulan el permeado, o en condiciones de utilización defectuosa de la instalación, como cuando se dosifica un exceso de ácido en el agua de alimentación.

— Contenido elevado de cloruros como en el agua de mar.

La experiencia ha demostrado que el Cromo, Molibdeno y Nitrógeno incrementan la resistencia al ataque por cloro de los aceros.

Los profundos estudios que se realizaron sobre este tipo de corrosión condujeron a la creación de un índice denominado PREN (pitting resistance equivalent number) o número equivalente de resistencia a las picaduras.

Este índice está relacionado con la presencia de los distintos componentes del acero y viene dado por:

$$\text{PREN} = \%\ \text{Cr} + 3{,}3 \times \%\ \text{Mo} + 16 \times \%\ \text{N}$$

Para valores del índice PREN por encima de 25 ya se muestra una resistencia importante a las picaduras, creciendo ésta a medida que crece dicho número.

8.2.3. Por fisuras (Crevice)

Se produce cuando en la superficie del material existen zonas que están sometidas a acciones diferentes. En muchos casos es la simple exposición al aire de manera desigual.

Se dan condiciones para este tipo de corrosión cuando un líquido cubre uniones entre el metal principal y otras piezas, que pueden ser del mismo metal o de otro material diferente como goma, plástico, capas protectoras o incluso residuos, polvo o incrustaciones.

Las fisuras atrapan el líquido que queda estancado y favorece el avance de la corrosión.

8.2.4. Por contacto

Tiene lugar en los puntos de contacto entre dos materiales distintos. Son característicos los puntos de unión o soldadura de válvulas o accesorios con tuberías, entre los elementos soportes de tuberías y éstas, o las tuercas y tornillos.

8.2.5. Por paradas

El agua salina estancada, y todavía más si contiene aditivos químicos, es más agresiva y ataca las zonas en que queda retenida.

8.2.6. Galvánica

Es un proceso electroquímico que se produce cuando dos materiales metálicos distintos se utilizan en un medio acuoso.

Cada metal está caracterizado por un potencial eléctrico, cuyo valor medido en mV puede consultarse en numerosas tablas, conocidas como series galvánicas, siendo quizás la que más se adapta a las circunstancias de la ósmosis inversa las publicadas por F. L. LaQue para el uso de metales en agua de mar.

De estas tablas se deduce el potencial de corrosión de diferentes metales.

Si éstos se emplean conjuntamente en medio acuoso, la corrosión del menos resistente puede provocar la extensión de la misma al más resistente. Deben por tanto utilizarse metales que estén lo más próximos posible unos de otros en las series galvánicas. Se admite generalmente el límite de agresión de dos materiales próximos en 250 mV.

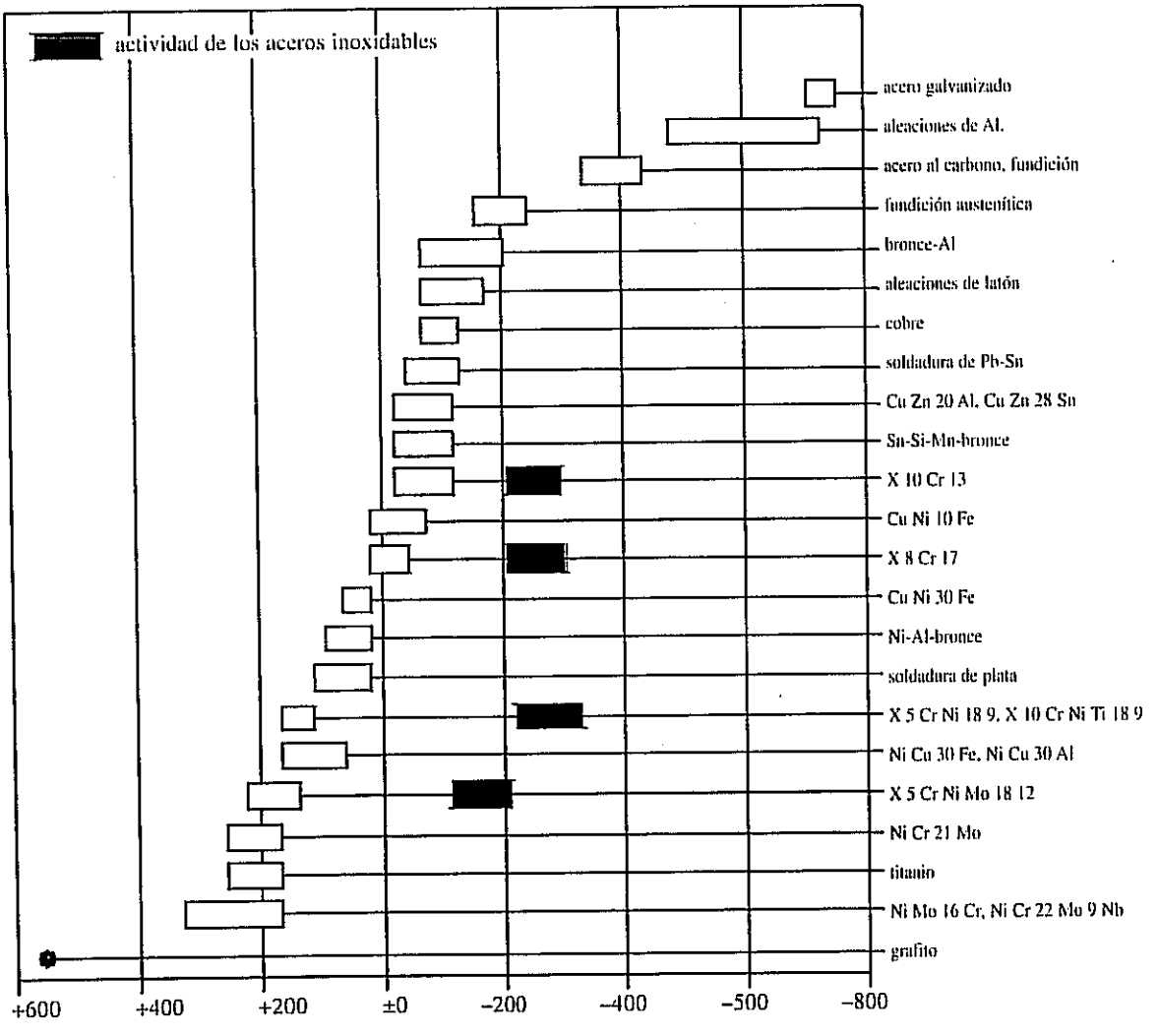
Cuando se supera este valor se deben minimizar las consecuencias eligiendo una concepción en la cual la superficie de los materiales de bajo potencial sea superior a la de los otros materiales.

La protección catódica se asegura a veces exponiendo un material de potencial inferior a todos los demás. Es el principio del ánodo de sacrificio.

En ocasiones una pintura de protección puede ser suficiente, cuando se aplica sobre el elemento más débil, tratando de evitar cualquier defecto aunque sea pequeño, que podría dar lugar a una corrosión extremadamente rápida.

CUADRO 15

Series galvánicas de materiales



Por otra parte si se analiza el proceso de corrosión, en unos casos los óxidos producidos durante el mismo protegen el material, como ocurre con los materiales nobles, cuyos óxidos forman una capa insoluble y estanca que aisla el producto sensible del medio agresor

En otros, los óxidos son solubles y dicha protección no existe, en cuyo caso deben protegerse por otros medios.

Diversos trabajos realizados en agua de mar y con temperaturas entre 20 y 30 °C, que son las más frecuentes en las instalaciones de desalación, han llevado a la conclusión de que la utilización de aceros con índices PREN de 40 ó superiores resuelven completamente los problemas de corrosión. Dicha resistencia se incrementa si además se añade Níquel.

Por último experiencias realizadas con aceros en que se elevaba el contenido en molibdeno al 6 % aumentaban la resistencia de tal forma, que hacían prácticamente insignificante el papel del níquel

Los materiales más resistentes son los más caros, por lo que en muchos casos debe buscarse un compromiso en función del riesgo de oxidación.

Como ello obliga a hacer coexistir varios materiales, se incrementan las dificultades.

Todo esto debe por tanto tenerse en consideración a la hora de realizar el proyecto y diseño de la instalación que se vaya a hacer, así como en su fase de construcción:

— Evitando zonas de velocidades excesivas o de aguas muertas.

— Seleccionando en la soldadura un método que garantice la resistencia a la corrosión de éstas, para lo cual el metal de aporte deberá ser más noble que el que se suelda.

  Deberá asegurarse una buena penetración y evitar los salientes, y el cordón de soldadura debe ser lo más regular posible, evitando discontinuidades, cavidades, etc.

— Protegiendo las conducciones de agua de mar contra la corrosión y la agresividad del terreno.

Por último, no debe olvidarse que el oxígeno disuelto en el agua es el principal estimulante de la corrosión, por lo que también en ocasiones puede estudiarse el construir sistemas de desaireación, que al reducir o eliminar el oxígeno reducen los riesgos de corrosión e incluso pueden permitir la utilización de materiales menos resistentes y por consiguiente más baratos.

En los circuitos de salmuera, por ejemplo, como el oxígeno y el CO_2 pasan a través de las membranas al permeado, el líquido suele estar desaireado por lo que sus exigencias respecto a los materiales son menores.

8.3. Control de la corrosión

Existen cuatro formas principales de luchar contra la corrosión.

1.ª La colocación de una película protectora en la superficie de la interfase sólido-agua.

2.ª La utilización de técnicas o procesos específicos paralelos.

3.ª La utilización de inhibidores de corrosión.

4.ª La elección de materiales resistentes a dicha corrosión.

Pasemos pues a su análisis:

1.° En el primer caso, la película protectora se puede formar de dos formas distintas:

— A partir de los propios productos que se producen en el proceso de corrosión.

Este es el objetivo que se persigue con el proceso de pasivación que se aplica en muchas instalaciones.

— Mediante la aplicación mecánica de un material protector.

Dado que en las instalaciones de ósmosis inversa existen numerosos equipos y elementos metálicos, dichos protectores se podrán elegir entre alguno de los siguientes:

a) Recubrimientos metálicos, como el zinc, estaño y cromo.

b) Recubrimientos no metálicos, como pinturas y materiales bituminosos.

c) Depósitos protectores. Provocando la precipitación de determinados elementos para crear una capa de pasivación.

d) Inhibidores de oxidación. Son sustancias que forman películas protectoras impidiendo la transferencia de electrones o la difusión de reactivos.

Estos procesos pueden ser utilizados en partes concretas de la instalación para abaratar la inversión como ocurre con los filtros, o introducidos en la misma desde el momento en que se empieza a percibir la necesidad de protecciones, utilizándolos en algunos casos como parte del mantenimiento.

2.° En muchos casos la corrosión afecta a elementos menores o no relacionados directamente con el proceso.

Las técnicas que pueden utilizarse en estos casos tratan de atajar fundamentalmente la causa de la corrosión y pueden citarse como más usuales:

a) Desaireación mediante aplicación de vacío o desgasificación.

b) Protección catódica.

c) Aislamiento. Consistente en la inserción de conectores entre metales diferentes para prevenir la generación de corrientes galvánicas.

3.° La industria química ha desarrollado productos que actúan como inhibidores de corrosión con gran éxito, sin embargo son productos muy específicos que no tienen el mismo efecto para todos los materiales metálicos.

Su utilización permitiría abaratar las instalaciones de desalación, sin embargo no han tenido la aceptación esperada, dado que obligan a una utilización periódica o casi continua, y a ejercer una cierta vigilancia sobre los materiales.

4.° Pero la más importante de todas, que debe ser tenida en cuenta desde el momento en que se inicia el diseño de la instalación, puesto que afecta a los principales equipos de la misma, es la cuarta de las citadas, a la que vamos a dedicar alguna atención.

8.4. Selección de materiales

Existen dos tipos de materiales que juegan un papel fundamental en las instalaciones de ósmosis inversa, plásticos y metálicos.

Con los aspectos analizados anteriormente se dispone de criterios suficientes para elegir los materiales más adecuados para cada equipo.

8.4.1. Plásticos

La tecnología de plásticos ha sido fundamental para el desarrollo de las instalaciones de desalación, ya que ha permitido disponer de materiales a precios razonables y muy resistentes tanto a la corrosión como a los productos químicos.

La gran variedad de plásticos existentes permite encontrar el material adecuado a cada caso.

Su menor resistencia a los esfuerzos, frente a los materiales metálicos, los hace imprescindibles en toda la parte de la instalación que trabaja a baja presión.

Los materiales plásticos más empleados en las instalaciones desaladoras son los ampliamente conocidos:

— PE,

— PVC, y

— PRFV.

O los más modernos:

— PPE. El polipropileno, descubierto en 1957, es un material versátil desarrollado por polimerización del gas propileno. Es un polímero de alto peso molecular y muy cristalino que en estado natural es duro y de color blanco-oscuro.

  Es el más ligero de los termoplásticos y flota. Tiene una excelente estabilidad dimensional y propiedades eléctricas, buena dureza superficial y resistencia química y fácil coloración. Es una alternativa más barata a los tubos de teflón.

— PVDF. Es un termoplástico fluorado que por sus propiedades mecánicas, como su resistencia a la abrasión, y su poca fluencia, su comportamiento térmico (–40 °C a +150 °C) y su resistencia a los agentes químicos, se puede utilizar en múltiples aplicaciones.

— Teflón. Descubierto en 1938 por Dupont es uno de los más versátiles materiales.

  Es muy resistente al calor, y también a las temperaturas muy bajas. Es prácticamente inerte a los productos químicos industriales y solventes. Tiene el coeficiente de fricción más bajo de todos los materiales.

— Gomas. Aunque existen numerosos tipos, una de las más utilizadas es el Viton. Descubierto por Dupont a finales de los 50. Es muy resistente a aceites y productos químicos. Mantiene estas propiedades y su buena resistencia mecánica a temperaturas extremadamente altas mejor que cualquier otro elastómero conocido.

  Su resistencia a los fluidos es muy superior a la de cualquier goma sintética. Ofrece excelente resistencia a hidrocarburos como benzeno, xileno, tolueno y tetracloruro de carbono.

Estos fluidos normalmente actúan como solventes sobre las gomas, desintegrando el material y produciendo su rotura.

Tiene una excepcional resistencia a los combustibles derivados del petróleo, lubricante y ácidos minerales a elevadas temperaturas. Es muy resistente también a su exposición a la intemperie y al ozono.

De acuerdo con la corrosividad de los líquidos a bombear y las temperaturas que puedan alcanzar los productos en su reacción se emplean distintos materiales que responden a dos tipos principales:

— Plásticos no fluorados
  - PVC: hasta 60 °C
  - PP hasta 100 °C
  - PE: hasta 60 °C
  - PRFV hasta 80°C

— Plásticos fluorados
  - Polivinilideno difluorado. PVDF hasta 140 °C
  - Halar (Fluorpolímero) hasta 160 °C
  - Politetrafluoretileno (PTFE) hasta 250 °C

8.4.2. Metálicos

En cuanto a los materiales metálicos hay que distinguir según se trate de instalaciones de agua salobre o de mar.

Los más usados son los aceros de distintos tipos, aunque existen bastantes instalaciones en las que para los equipos de bombeo se han utilizado aleaciones de cupro-níquel o níquel resistente.

El cupro-níquel se ha utilizado durante bastante tiempo por la experiencia que se disponía de su uso en ambientes marinos, especialmente en instalaciones de barcos. Ha sido durante mucho tiempo la base de las instalaciones de desalación de vapor.

En las de ósmosis, más modernas, no es tan frecuente pues su resistencia a la corrosión y otras características se han visto superadas por las de otros materiales.

En las bombas de agua de mar también se emplea bronce marino.

Aceros inoxidables

La microestructura de los aceros determina varios tipos de características distintas, conocidos como aceros ferríticos, martensíticos y austeníticos. Cuando aparecen dos microestructuras en el mismo acero se habla de aleaciones Duplex.

Los elementos que favorecen la resistencia a la corrosión, cuando se disuelven uniformemente en la microestructura, son:

— Cromo: del 12 al 30 %.

— Níquel: hasta el 35 %.

— Molibdeno: hasta el 8 %.

— Wolframio: hasta el 2 %.

— Cobre: hasta el 5 %.

— Manganeso: hasta el 2 %.

— Nitrógeno: hasta el 0,5 % (disuelto).

Sin embargo dificultan dicha resistencia y la soldadura los siguientes:

— Carbono: más del 0,3 %.

— Azufre: más del 0,03 %.

— Fósforo: más del 0,04 %.

La elección de aceros se hará por tanto basándose en su microestructura y en el contenido en estos elementos.

En instalaciones de agua salobre los aceros inoxidables:

UNS 30400/30403	304/304-L	PREN 21,8
UNS 31600/31603	316/316-L	PREN 36,6

son suficientes en la práctica totalidad de los casos.

Para agua de mar, aunque dichos aceros se han utilizado con éxito cuando se les aplica algún tipo de protección, como el contacto con otra aleación más anódica o mediante protección catódica. Si ésta falta, la presencia de oxígeno y altos contenidos de cloruros obliga a utilizar aceros de mayor gradación.

Los más empleados son los siguientes:

N-08904	904-L	PREN 38,3
S-32550	Ferralium 255	PREN 39,6
N-08221	Alloy 825 hMo	PREN 40
S-32760	Zeron 100	PREN 40,6
S-32750	SAF 2507	PREN 42,7
N-08925	Inco-Alloy 25-6 Mo	PREN 43,8
S-31254	Avesta 254-SMO	PREN 43,8
N-08026	20 Mo-6	PREN 44
N-08926	Cronifer 1925	PREN 44,6
N-08932	Uranus SB8	PREN 45,5
N-08367	Al-6XN	PREN 45,9
N-08031	Alloy 31	PREN 51,6
S-32654	Avesta 654 SMO	PREN 56,1

Sus componentes principales son:

CUADRO 16

Componentes de los principales aceros empleados en OI

UNS	*Común*	*PREN*	*% Cr*	*% Ni*	*% Mo*	*% N*	*% Cu*	*% C*
S-31600	316	36,6	16,9	10,8	2,7	0,05	-	
N-08904	904-L	38,3	21	25,5	5	0,05	1,2	0,02
S-32550	Ferralium	39,6						
S-31254	254-SMO	43,8	20	17,8	6,1	0,22		
S-32654	654-SMO	56,1	24,1	22	7,3	0,48		
N-06625	Alloy 625	51,3	21,9	60,1	8,8	0,02		
BS-5500	Zeron 100	40,6	25	8	3,5	0,25	0,7	0,02

8.5. Partes de la instalación

8.5.1. Colectores y tuberías

Las conducciones generales de la parte de la instalación de baja presión, es decir, en principio las que van desde la aspiración e impulsión de las bombas de captación hasta la aspiración de las bombas de alta presión, y las que conducen el permeado producido por las membranas hasta el depósito de almacenamiento o regulación de la instalación suelen ser de materiales plásticos, por ser tanto los más resistentes a la corrosión como por soportar presiones medias.

Se trata de una parte de la instalación que no tiene que soportar, salvo situaciones muy especiales, presiones superiores a 10 kg/cm^2 y por tanto al alcance de diversos materiales.

Los más empleados son el PVC o el polipropileno en diámetros pequeños de hasta 4" y PRFV para diámetros superiores.

Se trata de materiales rígidos, aunque dotados de una cierta flexibilidad, que por tanto, mediante los correspondientes accesorios, se adaptan perfectamente a cualquier recorrido y permiten construir una instalación hidráulica compacta.

En instalaciones pequeñas suele ser de PVC toda la baja presión y según las circunstancias puede serlo también la denominada «alta presión» en instalaciones de nanofiltración o para salinidades bajas.

En las instalaciones de mayor tamaño se prefiere el PRFV por sus mayores prestaciones compatibles con el precio.

La unión de los distintos tramos de PVC puede hacerse mediante pegamento y accesorios o mediante cordón de soldadura. Este procedimiento es más lento y difícil de ejecución pero garantiza una estanqueidad que no proporciona el otro.

Este aspecto es digno de consideración en aquellas partes de la instalación en que existen numerosos accesorios como en los bastidores de ósmosis inversa o en los circuitos de los distintos equipos de dosificación de reactivos.

En estas partes de la instalación también se acostumbra a usar alternativamente el polipropileno cuyas uniones también se realizan por cordón de soldadura y que ofrecen una mayor resistencia.

La única excepción a estas conducciones son las tuberías de ácido sulfúrico que deben ser de acero al carbono.

En el caso de que la inyección de sulfúrico, en instalaciones de gran capacidad, no se haga directamente a los colectores generales, sino a través de conductos paralelos, el aumento de temperatura al contacto con el agua se produce en estos tramos, que si son de PVC pueden deformarse y llegar incluso con el tiempo a romperse. Se aconseja en estos casos recubrir la tubería de PVC con fibra de vidrio o utilizar tuberías de polipropileno.

Incluso en el punto de mezcla se utiliza un material mucho más resistente y caro como el Teflón.

También el inoxidable 316 puede utilizarse para estos reactivos, aunque su precio es más elevado.

Las conducciones de alta presión, es decir, los tramos de tubería entre la impulsión de las bombas de alta presión y las membranas y las que recogen la salmuera y la retornan a las turbinas o la evacúan del sistema, son de materiales metálicos dado que tienen que soportar presiones superiores a 25 kg/cm^2 y en el caso del agua de mar pueden alcanzar hasta los 70 o más kg/cm^2.

El hierro es un elemento muy negativo para las membranas, por tanto los materiales metálicos utilizados deben ser resistentes a la oxidación, para evitar el desprendimiento de residuos férricos que puedan llegar a las mismas.

Para aguas salobres el material utilizado es el acero inoxidable 316 ó 316 L según sea la salinidad.

Para aguas de mar se requieren, para garantizar una completa resistencia a la oxidación, aceros especiales de mayor contenido en molibdeno y se recurre como ya se ha indicado anteriormente al 904-L, 254 SMO, Duplex, etc., todos ellos con contenidos de Mo superiores al 4-4,5 %.

En conducciones pequeñas y cuando existe la posibilidad de lavado con agua producto, en momento de paradas, se ha utilizado en algunas ocasiones el 317 LN.

Como este tipo de acero es mucho más caro que el 316-L, en ocasiones se recurre a este último, existiendo bastantes instalaciones con este material que han funcionado durante años con resultados bastante irregulares. Los puntos normales de corrosión suelen ser las soldaduras o puntos de estancamiento como las tuercas de unión de accesorios y aquí hay ejemplos tanto de crevice como de pitting en numerosas instalaciones que acaban con goteos importantes, aunque también hay otras en que no se han producido dichas oxidaciones.

En el pasado se han realizado instalaciones de agua de mar utilizando tuberías de alta presión de fundición, engomadas o revestidas de ebonita interiormente. Hoy día ya no son tan frecuentes, pues si su precio puede ser algo inferior, las dificultades para unión de piezas especiales o rectificaciones de trazados son grandes. Además la dificultad de realizar los recubrimientos interiores con suficientes garantías de estanqueidad obliga a tramos cortos con numerosas uniones, que deben hacerse mediante bridas y tornillos. Cualquier deterioro del recubrimiento produce una oxidación acelerada de los materiales que son arrastrados hasta las membranas.

En cualquier caso y sean cualesquiera los materiales utilizados es importante realizar un tratamiento de pasivación, previo a la puesta en marcha. La pasivación o pasivado es una operación en la que se produce una oxidación muy ligera y se crea una capa protectora de la superficie interior de la tubería que aumenta su resistencia a la corrosión.

Se realiza preparando una solución de ácido fluorhídrico al 0,8 % junto con ácido nítrico al 10 % que se recircula durante unos 10-20 minutos por los colectores de acero de alta presión, neutralizándose a pH 7 mediante la adición de sosa.

El agua producida en la instalación suele tener un pH bajo, generalmente inferior a 6, por lo que resulta corrosiva y en consecuencia las tuberías que la conducen hasta los depósitos generales de uso deben resistir estas condiciones.

Se emplean preferentemente el polietileno y el poliéster reforzado con fibra de vidrio, y con mayores precauciones la fundición centrifugada con recubrimiento interior de mortero. No obstante siempre que sea posible y especialmente si las tu-

berías utilizadas son de este último material, es conveniente neutralizar el agua producto.

8.5.2. Depósitos

En las instalaciones de desalación hay dos tipos de depósitos, los de almacenamiento de agua y los de almacenamiento de reactivos.

Si los citados en primer lugar se construyen de hormigón armado, en el caso de aguas salobres bastaría que se respetasen los recubrimientos de las armaduras exigidas a las obras acuáticas.

En el caso de agua de mar la mayor corrosividad de ésta exige no sólo unos recubrimientos de armaduras de al menos 5 cm, sino una impermeabilización interior de las paredes, en las que se utilizan distintos productos como láminas de PVC, PRFV, lamina de polietileno o productos absorbentes y cristalizables que se integran dentro de la estructura de hormigón.

Cuando el recubrimiento se hace con láminas debe ponerse especial cuidado en los puntos de soldadura que constituyen caminos importantes de fugas que con posterioridad llegan a las armaduras, provocando su correspondiente oxidación.

Si los depósitos son metálicos deben estar recubiertos interiormente de una pintura epoxi que garantice estanqueidad, para lo cual se le debe dar un recubrimiento de al menos 1,5 mm.

Para los depósitos del agua permeada en el sistema, teniendo en cuenta el bajo pH que ésta tiene en la mayoría de los casos, rigen los mismos condicionantes citados para los depósitos de agua de mar.

En cuanto a los depósitos de reactivos podemos encontrarnos en una instalación los siguientes:

— Depósito de hipoclorito sódico.

— Depósito de coagulante.

— Depósitos de bisulfito sódico.

— Depósitos de antiincrustante.

— Depósitos de hidróxido cálcico.

— Depósitos de cloruro cálcico.

— Depósitos de hipoclorito cálcico.

Todos estos depósitos están construidos normalmente en poliéster reforzado con fibra de vidrio y sólo los depósitos más pequeños suelen ser de polietileno.

— Depósito de sulfúrico.

El acero al carbono es imprescindible para garantizar su inatacabilidad, pero además debe dotársele de un deshumectador o secador de silicagel, para evitar reacciones del ácido.

El gran tamaño de estos depósitos, que generalmente almacenan las necesidades de la instalación durante períodos largos de tiempo, impide recurrir a materiales plásticos, que obligarían a paredes muy gruesas y por tanto los encarecerían sobremanera.

Para volúmenes menores, de hasta 1 m^3, se pueden emplear materiales plásticos, generalmente PRFV con resinas adecuadas.

8.5.3. Agitadores

Las varillas que se emplean en los depósitos de reactivos para facilitar la mezcla son generalmente de acero inoxidable, pero según el tipo de producto a manipular van recubiertas de una película protectora.

Las más empleadas se sitúan en:

— Depósitos de bisulfito sódico.

— Depósitos de antiincrustante.

— Depósitos de hidróxido cálcico.

— Depósitos de cloruro cálcico.

— Depósitos de hipoclorito cálcico.

Para las lechadas de cal suele ser suficiente el acero al carbono.

8.5.4. Equipos de bombeo

Los principales problemas de corrosión que se producen en las bombas son por estancamiento de las aguas a tratar, a las que además se les ha añadido algún reactivo químico, durante las paradas de la instalación.

Por ello, aunque en aguas salobres de baja salinidad se podría recurrir a bombas de fabricación de serie en fundición, a lo largo del funcionamiento se podrían producir oxidaciones que acabarían depositando el hierro sobre las membranas.

Para evitar este riesgo, en las instalaciones de agua salobre tanto para las bombas de la captación, como para la alta presión o la impulsión producto, se emplean bombas de acero inoxidable, siendo el tipo 316/316-L suficiente. En algunas bombas intermedias pueden utilizarse materiales plásticos aunque debe tenerse en cuenta que en general estas bombas tienen un rendimiento ligeramente inferior a las metálicas.

En las instalaciones de agua de mar hay que distinguir entre las bombas de funcionamiento continuo, que están en contacto directo con líquidos corrosivos

como el agua de mar tales como las de captación de agua de mar, transferencia (booster) o alta presión, y las restantes.

El material elegido para poder soportar la agresividad del fluido debe tener buenas características de fundición y soldabilidad, mientras que no son tan necesarias altas características mecánicas como ocurre en otros procesos industriales.

En un principio se utilizó como material, por su larga historia de servicios en agua de mar y ser conocidos por los talleres de bombas, los materiales conocidos como Ni-Resist, especialmente los bronces de níquel-aluminio que son aleaciones de cobre y aluminio con adiciones de Fe, Mn y níquel. Estos materiales presentaban buena resistencia a la corrosión por picaduras (pitting) y agrietamiento (crevice) en medios en movimiento o en los que se producen estancamientos de agua de mar, pero tienen poca resistencia mecánica y su ductibilidad es baja.

Además la resistencia a la abrasión del Ni-Al bronce es baja y no soporta por lo tanto fluidos con altas velocidades y partículas en suspensión. Por ello se utilizaron para el cuerpo de la bomba y partes estacionarias o sujetas a altas presiones, pero presentaron serios problemas de erosión en su utilización para los impulsores, por lo que para prolongar su resistencia se utilizaban procedimientos de recubrimiento.

Como además no son reparables por soldadura y se requieren técnicas de fundición precisas se buscaron otros materiales. Posteriormente se utilizaron para ejes e impulsores, compatibles con las citadas carcasas, aleaciones dobles.

De estos materiales se pasó al AISI 316-L que tiene mejor resistencia a las picaduras y se puede soldar fácilmente, por lo que las reparaciones «in situ» son sencillas sin tener que recurrir a post-tratamientos de calor. Los repuestos en estos materiales se consiguen fácilmente a precios razonables.

Este material sustituyó en las bombas de agua salobre al AISI 316, que aunque tenía una resistencia mecánica relativamente buena, tanto a temperaturas altas como bajas, resistencia a la corrosividad de los fluidos y excelente ductibilidad y resistencia al impacto, a medida que el contenido en sales aumentaba presentaba muchos problemas de corrosión.

Las mejoras que se han producido en los materiales en cuanto a su resistencia a los ambientes agresivos y trabajo en condiciones de alta presión ha conducido finalmente a la utilización en las grandes plantas de materiales más sofisticados como una modificación del 316-L con alto contenido en Mo (>3,5 %) o aceros duplex, austeníticos/ferríticos desarrollados para agua de mar que se emplean para cuerpos y impulsores.

Para las bombas de impulsión del agua producida, debido a su bajo pH, se emplean el acero inoxidable 316-L o materiales plásticos, según tamaño y rendimientos. En bombas de agua de mar también se ha utilizado a veces el bronce marino, libre de zinc.

Cuando éstas son sumergidas se emplean los mismos materiales que para las bombas de alta presión, si bien la columna vertical de las bombas puede ser de 316-L, Ni-Resist, Ni-Al bronce o cuproníquel.

En caso de aguas salobres de río o pozo dicha columna podría ser de acero al carbono recubierto de neopreno o epoxi que es una solución mas barata.

En bombas de funcionamiento discontinuo como bombas de desplazamiento o de lavado de membranas se prefieren las de materiales plásticos, más baratas que las de aceros especiales, aunque de menor eficiencia. En los cierres se emplean Teflón, cerámica, grafito, etc.

También se pueden emplear este tipo de materiales plásticos en las bombas de transferencia de agua de mar, cuando son necesarias en las instalaciones, por ser más baratas que las de aceros especiales.

Cuando el agua que se va a tratar contiene arenas, la erosión de los rodetes puede ser importante, reduciendo las prestaciones del equipo en poco tiempo. Los aceros Duplex de gran dureza resuelven positivamente este problema, aunque puntualmente haya que realizar reparaciones del recubrimiento.

8.5.5. Filtros

En los de pequeñas dimensiones, el depósito o carcasa es de PRFV en el caso de los filtros de arena, y de acero inoxidable en los de cartuchos.

Al aumentar el tamaño se requieren materiales más resistentes utilizándose láminas de fundición que se someten posteriormente a un tratamiento interno a base de ebonita, goma o incluso pinturas epoxi.

El alma o eje central de los cartuchos que forman los filtros debe ser resistente por lo que según su tamaño puede ser de 316-L o incluso materiales más nobles en el caso del agua de mar.

A veces están formados por dos ejes concéntricos, uno de inoxidable que se mantiene fijo en el filtro y otro de plástico, PVC, PE, sobre el que se enrolla el hilo que forma el cartucho y que se coloca sobre el anterior, facilitando su instalación y desmontaje.

El hilo del cartucho o los materiales de los filtros plegables suele ser polipropileno o nylon.

8.5.6. Válvulas

Para las de baja presión se prefieren materiales plásticos, pero al aumentar el diámetro no están disponibles este tipo de válvulas, por lo que se utilizan válvulas metálicas con recubrimientos adecuados para las partes en contacto con el agua. Estos recubrimientos son generalmente de halar, teflón, PVDF, goma, etc.

En alta presión siempre se usan aceros inoxidables, 316 ó 316-L en aguas salobres y 316-L o preferentemente aceros inoxidables hMo (high Molibden) en agua de mar.

8.5.7. Instrumentos de control

Se emplea generalmente en el cuerpo el acero inoxidable 304 ó 316, pero las partes más sensibles en contacto con el agua requieren materiales especiales más resistentes, como el inoxidable 316-L en agua salobre y el Monel 400 o Hasteloy C en agua de mar.

8.5.8. Motores

Protecciones para ambientes marinos agresivos, normalmente IP-54 para grandes equipos e IP para bombas dosificadoras.

8.5.9. Otros

El ambiente de humedad existente en las instalaciones desaladoras de uno u otro tipo exige que incluso en elementos accesorios se trate de evitar las oxidaciones, que no sólo deterioran instalaciones, normalmente de elevado coste, sino que afectan a la imagen de éstas, que debería ser de limpieza.

Esto requiere la aplicación de pinturas especiales, tipo epoxi en aquellos elementos que pueden estar en contacto en algún momento, aunque sea a causa de fugas, con el agua, o si se aplican otro tipo de pinturas es necesario el recubrimiento con espesores adecuados, tras un tratamiento previo profundo de los elementos sobre los que se va aplicar.

En estos casos se requiere un mantenimiento periódico de pintura en los elementos metálicos, para la buena conservación de la instalación. Es decir, estructuras constructivas, soportes, bastidores, etc.

CAPITULO 9

DISEÑO DE INSTALACIONES

Introducción

El diseño de una instalación se hace a partir del conocimiento de dos aspectos fundamentales:

— El análisis del agua que se va a tratar.

— La calidad del agua que se quiere obtener.

La ósmosis inversa tiene unas amplias posibilidades de utilización, agua salobre, agua de mar, aguas duras, etc., y en base a ello existen diferentes tipos de membranas.

No es lo mismo desalar agua salobre que de mar, ni tampoco utilizar unas aguas filtradas naturalmente o tomar éstas directamente de un río, de un lago o del mar.

Tampoco son iguales las exigencias iónicas de un agua que se va a utilizar en un abastecimiento urbano, que las de un agua con destino final agrícola o el más específico industrial.

Todo ello debe tenerse en consideración cuando se va a construir una planta desaladora por ósmosis inversa, máxime si se tiene presente que como se ha referido en un capítulo anterior, pueden existir en algunos casos alternativas tecnológicas a la ósmosis inversa.

La base del sistema de tratamiento de ósmosis lo constituye la membrana, por tanto el diseño llevará en última instancia a la selección de la membrana idónea para cada caso, es decir la que generará los menores costes y dificultades en la producción del permeado final.

Pero la membrana es un elemento muy sensible a los distintos componentes físicos y químicos del agua a tratar, y por ello el diseño de la instalación debe contemplar también el de los equipos que constituyen el tratamiento físico-químico, que va a dejar el agua en las mejores condiciones para ser procesada por la membrana.

Por último, los elementos mecánicos o de control de la instalación deben ser también los adecuados para el objetivo final, es decir que funcione con la mayor eficiencia y las menores interrupciones posibles.

9.1. Datos preliminares

Las características físicas y químicas del agua que se va a tratar constituyen la base de partida para el diseño de la instalación.

El análisis iónico es por tanto imprescindible, pues no sólo nos sitúa en cuanto a salinidad dentro del rango de membranas que van a poder utilizarse, sino que además nos va a mostrar las limitaciones que en cualquier caso se van a presentar respecto al recobro.

Como la parte del caudal que alimenta la membrana y que no pasa a través de la misma, que constituye el concentrado o rechazo, arrastra las sales separadas, el distinto índice de solubilidad de éstas exige que en el concentrado no se superen dichos niveles, para evitar que se produzcan precipitados sobre las membranas. Ello implica limitar la conversión por debajo de un cierto valor.

El análisis iónico debe ser lo más completo posible con especial referencia a los iones que presentan más dificultades para su separación, como los monovalentes, pero también contemplando la presencia de algunos microelementos como hierro, aluminio, manganeso o estroncio y no debe faltar el contenido en flúor y sílice, pues especialmente estos dos elementos pueden plantear serios problemas a la membrana, por la pequeña solubilidad de las sales del primero, y los precipitados que disminuyen la eficiencia de la membrana de forma irreversible en el segundo.

En el cuadro siguiente se relacionan los elementos que deben aparecer en el análisis químico del agua de alimentación.

CUADRO 17

Análisis iónico necesario para desalación

Aniones	*Cationes*	*Otros*
Cl^-	Na^+	SiO_2
$SO_4^=$	K^+	
$CO_3^=$	Ca^{++}	PH
CO_3H^-	Mg^{++}	TDS
NO_3^-	Ba^{++}	CE
F^-	Sr^{++}	T°C
	Fe^{+++}	
	Al^{+++}	

El contenido puede venir expresado, como ya se ha indicado con anterioridad, en mg/l, moles/litro o mg/l de CO_3Ca.

Las equivalencias o formas de paso de unas unidades a otras ya han sido revisadas en un capítulo anterior.

Pero además es conveniente realizar otras determinaciones que nos pueden ayudar a decidir el tipo de pretratamiento, en particular el índice de turbidez y el índice de colmatación ó SDI.

En zonas abiertas o potencialmente contaminadas con presencia de microalgas, es también importante la determinación del TOC, pues alerta sobre posibles problemas que pueden presentarse en el funcionamiento de la instalación y que es conveniente resolver o minimizar desde el momento del diseño.

9.2. Capacidad de la instalación

La decisión sobre el tamaño de la instalación es importante, por cuanto los equipos mecánicos y eléctricos han de adaptarse a la misma.

En este sentido es conveniente recordar que el mejor funcionamiento de las instalaciones de ósmosis inversa se obtiene cuando están en producción de forma continua.

Las paradas no sólo reducen la eficiencia de la instalación, gravando el coste del agua producto con la correspondiente parte de la inversión, sino que además:

— Reducen la vida de los equipos, y en especial de las membranas, como consecuencia de los constantes golpes de ariete que se producen en los arranques.

— Pueden deteriorar las membranas, al producirse precipitaciones o favorecer la proliferación de bacterias.

— Empeoran la calidad del producto, ya que la instalación necesita un cierto tiempo de funcionamiento para estabilizar sus parámetros de producción.

— Producen una mayor compactación y ensuciamiento de las membranas.

Pero además, si la parada se prolonga durante varias horas, es necesario realizar labores de desplazamiento del agua almacenada en el circuito hidráulico, incluidas membranas, e incluso preservar éstas en soluciones químicas adecuadas.

Por estas razones y dado que las instalaciones de ósmosis inversa permiten fácilmente una construcción modular, debe tenerse especial cuidado en la elección del tamaño de módulo adecuado en función de las condiciones de operación de la instalación que sean previsibles.

Las instalaciones que van a funcionar de forma continua deberán elegir módulos del mayor tamaño posible, por la economía de escala que se consigue, y siem-

pre que sea compatible con la disponibilidad de equipos de dimensiones adecuadas y cuya fiabilidad esté suficientemente probada.

Si las instalaciones van a funcionar de una manera discontinua, como suele ocurrir en los abastecimientos turísticos, cuya demanda es muy variable de unos meses a otros del año, o en los agrícolas, también con variaciones estacionales e incluso en cortos períodos en función de las necesidades de los cultivos o de la puesta en explotación de las fincas, conviene dividir la instalación en varios módulos. De esta forma se consigue que siempre haya alguno funcionando y que la disminución de la demanda de agua vaya determinando la parada sucesiva de uno o más módulos.

Lógicamentc los distintos módulos en que se compartimenta la instalación deberán ser de las mismas dimensiones con objeto de poder compartir equipos de repuesto y reducir gastos de mantenimiento.

Respecto a los tamaños máximos de los módulos o bastidores, en la actualidad son muy frecuentes, en el caso del agua de mar, los módulos de 5.000 m^3/día, y en instalaciones mayores se ha llegado a 6.000 y 7.000 m^3/día.

El utilizar bombas de alta presión de la mayor capacidad disponible permite incrementar la eficiencia o rendimiento de éstas en varios puntos porcentuales, lo que resulta interesante desde el punto de vista energético.

Pero el aumento de la producción unitaria por bastidor presenta otras limitaciones, como el coste de la estructura soporte y sobre todo la altura de ésta, que exige edificios más altos y precisa de estructuras móviles para el mantenimiento y operación de la instalación, lo que encarece ésta.

También hay que tener en cuenta que cualquier avería o pérdida detectada en un tubo de presión o membrana exige la parada de todo un bastidor, aunque sólo sea durante un breve período, para aislar dicho tubo o el conjunto de tubos que estén interconectados.

Como en todas las instalaciones de ósmosis inversa hay un porcentaje de agua, el rechazo o salmuera, que no se aprovecha, el caudal de agua a tratar dependerá de la conversión, la cual tiene mucho que ver con el contenido iónico del agua.

Sin embargo también la reducción o elevación de la conversión puede estar relacionada con otras circunstancias distintas de la composición química del agua. Así, una vez conocida ésta y fijado el índice de conversión máximo recomendable, la suciedad del agua o la carga orgánica pueden hacer aconsejable trabajar con un valor menor con objeto de reducir el ensuciamiento de las membranas y por tanto los gastos ocasionados por la parada de la instalación para proceder a la limpieza de las mismas.

En estos casos se sacrifica el rendimiento energético en beneficio de una reducción de los problemas de operación, que en caso de localizaciones aisladas o personal poco cualificado puede ser importante.

Por último es conveniente hacer estimaciones sobre las necesidades futuras de agua desalada y las posibles ampliaciones de la instalación.

Diseñar desde el primer momento los colectores principales y la obra civil pensando en la capacidad final de la obra supone un incremento muy pequeño de la inversión inicial, pero abarata considerablemente las ampliaciones futuras y, lo que es más importante, facilita el que se pueda acometer dicha obra sin afectar apenas el normal funcionamiento de la instalación.

9.3. Selección de la membrana

Del conocimiento de las características del agua se decide el tipo de membrana a utilizar, tanto desde el punto de vista de la configuración, como desde el de los materiales que la componen o sus características de rechazo de sales.

Respecto al tipo de *configuración*, fibra hueca o arrollamiento en espiral, no hay razones categóricas que determinen el que sea una u otra la membrana elegida, no obstante pueden hacerse los siguientes comentarios:

9.3.1. Agua de mar

Cuando la captación se realiza a través de un pozo playero y por tanto sin contaminación orgánica o actividad biológica, no debe existir preferencia por ningún tipo, aunque con carácter muy amplio puede decirse que en igualdad de condiciones el permeado producido por las membranas de fibra hueca es de calidad superior, menor salinidad, que el correspondiente de arrollamiento en espiral, pero a su vez el consumo energético de las instalaciones con dichas membranas, también en igualdad de circunstancias, es ligeramente superior.

Esto se debe fundamentalmente a dos causas:

— Las membranas de fibra hueca, aunque con menor rechazo de sales (99,3 %) que las de arrollamiento en espiral (99,5 %), tienen mayor recuperación unitaria, mayor superficie filtrante para una misma instalación y además su especial disposición en el módulo 1:1 con igual recuperación en cada membrana, determina que la diferencia de calidad del agua producida por una u otra membrana, no sea tan grande como la correspondiente entre la membrana 1.ª y la 4.ª ó 5.ª de un tubo de presión de 6 ó 7 membranas de arrollamiento en espiral o entre la 2.ª membrana de un tubo de primera etapa y la 3.ª ó 4.ª de un tubo de segunda etapa, si éste fuera el tipo de diseño.

— La tremenda compactación que tienen las fibras huecas dentro de las membranas y la menor permeabilidad de éstas obliga a aplicar presiones diferenciales superiores.

Si la captación de agua de mar se realiza de forma abierta o en lugares con contaminación orgánica, los resultados parecen ser mejores con las membranas de arrollamiento en espiral.

Precisamente esa mayor compactación interna de las membranas de fibra hueca deja un espacio más estrecho entre fibras y favorece la existencia de puntos muertos, lo que facilita el ensuciamiento, especialmente biológico, y dificulta la limpieza.

Sin embargo, esta ligera ventaja de las membranas espirales no es absoluta y en los últimos desarrollos de membranas de fibra hueca se está tanto acortando la longitud de las fibras como realizando otro tipo de empaquetado, con objeto de reducir los citados puntos muertos y ampliar los canales entre fibras.

Existen también experiencias positivas de funcionamiento correcto de membranas de fibra hueca en situaciones difíciles, adoptando un pretratamiento adecuado.

Incluso en el caso de membranas de fibra hueca para agua de mar, construidas en CTA, la dosificación de cloro que no afecta tanto a la estructura de la membrana como en el caso de las poliamidas ha dado resultados positivos.

9.3.2. Agua salobre

En la mayor parte de los casos se trata de instalaciones que utilizan el agua subterránea a través de pozos, con lo que parte de los problemas de pretratamiento se facilitan, puesto que el agua viene filtrada a través de los estratos del terreno y en general la actividad biológica es menor. Sin embargo, si la captación fuera de agua superficial, o si las aguas subterráneas están contaminadas por los retornos de riego, los problemas pueden ser muy parecidos a los del agua de mar.

La mayor variedad de membranas y el mayor número de fabricantes de arrollamiento en espiral, hace de este tipo el preferido en la mayor parte de las circunstancias, puesto que especialmente los últimos desarrollos en cuanto a rechazo de sales y consumos energéticos permiten ofrecer una mayor gama de membranas y por tanto mejor adaptación a las especificidades de los diferentes tipos de agua.

En cuanto a *materiales,* la elección entre acetato de celulosa o distintos tipos de poliamidas parece decantarse cada vez más por estas últimas. Los mayores rechazos de sales, superiores producciones y menores consumos energéticos las hacen más eficientes.

Sin embargo, las membranas de acetato de celulosa siguen todavía manteniendo, en el sector de aguas salobres, una cuota de mercado de un 10 %, debido fundamentalmente a su mejor respuesta en aguas altamente contaminadas y a su mayor facilidad de fabricación que las hace más baratas.

Además, su mayor resistencia a la cloración les da ciertas ventajas, puesto que admiten la dosificación de cantidades reducidas de cloro de una forma continua, permitiendo su esterilización y la de los circuitos hidráulicos.

Por esto, en instalaciones desaladoras con tomas abiertas y contaminadas se están utilizando también este tipo de membranas.

Según el *rechazo de sales,* existen membranas de agua de mar o alta presión, con rechazos de sales superiores al 99,2 %, que pueden utilizarse también para aguas salobres con salinidades superiores a 10.000 mg/l, y membranas de media o baja presión con rechazos entre el 85 y el 99 %.

Como membranas especiales, pueden elegirse también las de nanofiltración con elevados rechazos (90 %) de iones bivalentes y reducidos (40-60 %) de monovalentes, que funcionan a presiones muy bajas y tienen también un campo de aplicación muy concreto, en especial el ablandamiento de aguas, aunque pueden utilizarse asimismo para la eliminación de THM, o bacterias, si ese fuera el objeto de la instalación.

La mayor duda en la elección de membranas se presenta para aguas de salinidades intermedias, entre 2,5 y 5 g/l, pues en este rango existen distintos tipos de membranas que se adaptan perfectamente.

Principalmente la selección debe hacerse entre membranas de media presión que tienen elevados rechazos y caudales, y membranas de baja o ultrabaja presión, de caudales y rechazos ligeramente inferiores.

Se trata en definitiva de obtener los costes más bajos, teniendo en cuenta tanto la inversión como el funcionamiento, pero respetando las exigencias del agua producto.

Se comprende que a este respecto, además de la salinidad del agua a tratar, el destino final del agua desalada es decisiva para elegir una u otra membrana.

9.4. Superficie de membrana

La membrana tiene una capacidad de producción o permeabilidad limitada que es función del material constituyente y del proceso de fabricación.

Al ser en ciertos aspectos un filtro, la capacidad de producción está también relacionada con la superficie filtrante.

Si se quiere superar dicha producción es necesario elevar la presión de funcionamiento de la instalación y en consecuencia forzar a la membrana a permear un caudal superior al que le corresponde. Las consecuencias de este tipo de acción son de dos tipos:

— Disminución de la vida útil de la membrana por compactación.

— Ensuciamiento más frecuente, puesto que los elementos extraños que en todos los casos arrastra el agua, por muy sofisticado que sea el pretratamiento, se depositan sobre una superficie más reducida de membrana.

Debe pues conocerse cuál es la superficie de cada membrana para colocar en cada instalación el número de membranas adecuado para la capacidad de la instalación y las condiciones del agua.

La configuración de arrollamiento en espiral o fibra hueca que adoptan las membranas no tiene otro objeto que concentrar en el menor volumen posible la mayor superficie de membrana, para reducir el tamaño de las instalaciones.

Una membrana viene definida en sus condiciones de funcionamiento por un flujo por unidad de superficie de membrana, que ha sido contrastado en fábrica.

Este flujo depende de las características de permeabilidad de la membrana y del tipo de membrana y es aquél que permite un funcionamiento regular de la misma sin ensuciamientos anormales.

Se define mediante la unidad GFD (gallon foot day) o su equivalente decimal l/m^2 y día.

Respecto a la superficie de membrana adecuada para una instalación se pueden dar cifras indicativas, aunque finalmente debe ser el diseñador el que escoja los valores más convenientes en relación con el agua que espera encontrarse.

Para el caso de membranas de arrollamiento en espiral, con pequeñas variaciones, los distintos fabricantes aconsejan los siguientes factores de diseño:

CUADRO 18

Caudales específicos de diseño

	GF	$l/m^2 \cdot h$
Aguas residuales	8-10	13-17
Agua de mar superficial	10-16	17- 27
Agua de mar pozo	16-20	27- 34
Agua salobre pozo profundo	18-22	31-37
Agua RO/UF	22-30	37-51

Al superar estos límites aumentan los problemas de funcionamiento de la planta y por tanto su mantenimiento, disminuyendo la vida media de las membranas.

Esto se debe a dos causas principales:

- Los límites hidráulicos internos de construcción de la membrana, que vienen determinados por la caída de presión en los componentes mecánicos que forman los conductos de producto.
- El aumento del ensuciamiento, al adherirse las partículas con más fuerza a la superficie de la membrana.

Estas condiciones, que pueden provocarse por un diseño poco conservador, un aumento de la presión o un aumento de la temperatura del agua de alimentación, requieren una limpieza de las membranas más frecuente y puede producir un importante deterioro de las mismas.

En las membranas de fibra hueca se trabaja siempre con valores de GFD muy inferiores, puesto que la superficie unitaria del permeato es muy superior.

En este tipo de membranas no existen por tanto unos valores de GFD de referencia, aunque generalmente se trabaja entre 0,3 y 1 GFD (0,5-2 $l/m^2/h$).

9.5. Conversión

La elección de la conversión o recuperación del sistema no es un parámetro que pueda decidir libremente el técnico, sino que está condicionada, como ya se ha dicho, por la composición iónica del agua que se va a tratar.

Las sales rechazadas por la membrana se concentran en el rechazo donde pueden superar su límite de solubilidad y precipitar sobre ella.

Las principales sales que crean estos problemas son el bicarbonato cálcico, el sulfato cálcico, el fluoruro cálcico y la sílice. En el caso del agua de mar también los sulfatos de bario, estroncio y magnesio.

El control de los precipitados de carbonato cálcico se realiza mediante la determinación del índice de saturación de Langelier en el caso de los bicarbonatos y de la constante de su producto de solubilidad para los sulfatos.

Como es conocido, el índice de Langelier viene definido por la fórmula:

$$LSI = pH - pH_s$$

Siendo pH = el valor determinado en el análisis de agua.

pH_s = el pH de saturación calculado.

La determinación de este último se hace a partir de:

$$pH_s = pCa - pAlk - C$$

$$C = \text{incrustación} = pK'_2 - pK'_s$$

En el caso del agua de mar, dado que su fuerza iónica es mayor, se emplea en lugar del índice de Langelier el de Stiff & Davis, dado por:

$$SDSI = pH - pCa - pAlk - K$$

siendo K una constante que tiene en cuenta la temperatura y la fuerza iónica del agua. Un índice de Langelier positivo indica una tendencia a la precipitación de sales. Un índice negativo representa una tendencia agresiva del agua.

La determinación de estos índices se hace mediante la utilización de los ábacos de Langelier suficientemente conocidos y/o una serie de ábacos o tablas que facilitan los cálculos.

Para ello se necesita calcular previamente los citados valores de referencia siendo:

pCa = el logaritmo negativo de la concentración del ión calcio expresado en moles por litro.

pAlk = el logaritmo negativo de la alcalinidad total expresada en equivalentes por litro.

$pK'_2 - pK'_s$ = se obtiene a partir de la tabla de Larson y Buswell, que tiene en cuenta la temperatura del agua y su fuerza iónica, I.

$I = \frac{1}{2} \cdot \Sigma C_i Z_i^2$.

C_i = concentración de cada ión en moles por 1.000 g de agua.

Z_i = valencia de cada ión.

CUADRO 19

Determinación de ($pK'_2 - pK_s$) según Larson y Buswell

Fuerza iónica	*TDS ppm*	*pK'_2 - pK'_s*						
		0 °C	*10 °C*	*20 °C*	*25 °C*	*30 °C*	*40 °C*	*50 °C*
0,017	680	2,91	2,69	2,48	2,40	2,32	2,14	1,98
0,019	760	2,92	2,70	2,49	2,41	2,33	2,15	1,99
0,021	840	2,94	2,72	2,51	2,43	2,35	2,17	2,01
0,023	920	2,95	2,73	2,52	2,44	2,36	2,18	2,02
0,025	1000	2,98	2,76	2,55	2,47	2,39	2,20	2,05
0,027	1080	3,01	2,79	2,58	2,50	2,42	2,23	2,08
0,029	1160	3,03	2,81	2,60	2,52	2,44	2,25	2,10
0,031	1240	3,04	2,82	2,61	2,53	2,45	2,26	2,11
0,033	1320	3,06	2,84	2,63	2,55	2,47	2,28	2,13
0,035	1400	3,07	2,85	2,64	2,56	2,48	2,30	2,14
0,037	1480	3,09	2,87	2,66	2,58	2,50	2,32	2,16
0,039	1560	3,11	2,89	2,68	2,60	2,52	2,34	2,18
0,040	1600	3,12	2,90	2,69	2,61	2,53	2,35	2,19
0,041	1640	3,13	2,91	2,70	2,62	2,54	2,37	2,20
0,042	1680	3,13	2,91	2,70	2,62	2,54	2,37	2,20
0,043	1720	3,15	2,93	2,72	2,64	2,56	2,38	2,22
0,044	1760	3,16	2,94	2,73	2,65	2,57	2,39	2,23
0,045	1800	3,18	2,96	2,75	2,67	2,59	2,41	2,25
0,046	1840	3,20	2,98	2,77	2,69	2,61	2,43	2,27
0,047	1880	3,21	2,99	2,78	2,70	2,62	2,44	2,28
0,048	1920	3,22	3,00	2,79	2,71	2,63	2,45	2,29
0,049	1960	3,23	3,01	2,80	2,72	2,64	2,46	2,30
0,050	2000	3,24	3,02	2,81	2,73	2,65	2,47	2,31
0,051	2040	3,25	3,03	2,82	2,74	2,66	2,48	2,32
0,052	2080	3,25	3,03	2,82	2,74	2,66	2,48	2,32
0,053	2120	3,26	3,04	2,83	2,75	2,67	2,49	2,33
0,054	2160	3,27	3,05	2,83	2,76	2,68	2,50	2,34
0,055	2200	3,29	3,07	2,85	2,78	2,70	2,52	2,36

También puede determinarse a partir de la concentración total de los iones componentes del agua mediante la tabla de L.V. Wilcox.

CUADRO 20

Determinación del pH, según Wilcox

Suma de concentraciones(meq/l)	$pK'_2 - pK'_s$	*p (Ca+Mg)*	*p (Alk)*
0,05	2,0	4,6	4,3
0,10	2,0	4,3	4,0
0,15	2,0	4,1	3,8
0,20	2,0	4,0	3,7
0,25	2,0	3,9	3,6
0,30	2,0	3,8	3,5
0,40	2,0	3,7	3,4
0,50	2,1	3,6	3,3
0,75	2,1	3,4	3,1
1,00	2,1	3,3	3,0
1,25	2,1	3,2	2,9
1,50	2,1	3,1	2,8
2,00	2,2	3,0	2,7
2,50	2,2	2,9	2,6
3,00	2,2	2,8	2,5
4,00	2,2	2,7	2,4
5,00	2,2	2,6	2,3
6,00	2,2	2,5	2,2
8,00	2,3	2,4	2,1
10,00	2,3	2,3	2,0
12,50	2,3	2,2	1,9
15,00	2,3	2,1	1,8
20,00	2,4	2,0	1,7
30,00	2,4	1,8	1,5
50,00	2,5	1,6	1,3
80,00	2,5	1,4	1,1

Si no existen condiciones limitantes en cuanto a los citados índices, se diseñará con la conversión más alta posible, compatible con un buen funcionamiento de la instalación, pues de esta forma se logran los mejores rendimientos de la instalación en cuanto a inversión y gastos de funcionamiento.

En las instalaciones de agua salobre se llega en muchos casos a conversiones o recuperaciones del 85 al 90 %, aunque los casos más frecuentes son del 70 al 80 %. Asimismo existen circunstancias en que la conversión se reduce al 55-60 %, como ocurre cuando las aguas tienen contenidos elevados de sílice (40-65 ppm).

Para agua de mar recuperaciones del 45 % se consideran satisfactorias, reduciéndose en bastantes casos al 40-43 %.

En los países del Golfo Pérsico, en los que el agua de mar tiene una salinidad elevada (superior a 40.000 ppm), se trabaja con conversiones inferiores 35-40 %.

Sin embargo, en determinadas condiciones se adoptarán otras decisiones, por ejemplo, si la instalación va a estar en una zona aislada y no es previsible una buena atención a la misma, es preferible diseñar con una conversión menor, que repercutirá en un menor ensuciamiento de las membranas y una menor interrupción del funcionamiento.

Por ejemplo, en agua de mar, en instalaciones para barcos o plataformas petrolíferas y en otras de pequeño tamaño se desciende hasta un 30-35 %, para evitar gastos de operación.

En el extremo opuesto, en una instalación perfectamente atendida y dotada de los elementos de control adecuados, podría elevarse la conversión, rebasando incluso los citados índices, con la utilización de productos inhibidores suficientemente contrastados y la aplicación de desplazamientos del agua a tratar de los circuitos principales, incluidas bombas y membranas, en cada parada o interrupción del funcionamiento.

Es el caso de las aguas con elevados contenidos de sílice citadas anteriormente, en que la utilización de antiincrustantes de última generación permite, con las debidas precauciones, alcanzar conversiones del 70-75 %.

9.6. Número de membranas

Partiendo del caudal que es necesario producir, y de esos datos de superficie por membrana y flujo elegido, se tiene una primera cifra de membranas necesarias, que permite iniciar una serie de tanteos hasta dar con el número apropiado.

Con carácter general puede decirse que las cifras de producción nominal que aparecen en los catálogos de membranas responden a pruebas realizadas en unas condiciones estándar de salinidad, presión, temperatura y conversión, que normalmente no van a coincidir con las de la situación particular de la instalación que queremos diseñar.

Pero además hay otra serie de circunstancias que nos obligan a realizar sucesivos ajustes en el número de membranas:

— Si utilizamos membranas espirales, por ejemplo, los tubos de presión en que se alojan las membranas son normalmente de capacidad para 6 ó 7 membranas, por lo que si queremos salirnos de esos números es necesario solicitar del fabricante pedidos especiales que tienen otro costo superior, y además, en el caso de que el número de membranas queramos reducirlo, se incrementaría el número de elementos de control, encareciéndose y complicándose la instalación.

— Los fabricantes suelen recomendar unos límites máximos de recuperación por membrana que no conviene sobrepasar, por tanto el número de membranas hay que ajustarlo dentro de esos valores.

— La producción de una membrana es función de la presión que se le aplica y de la salinidad del agua que se va a desalar.

Cuanto más salina es el agua, mayor es su presión osmótica y más elevada por tanto la presión que debe aplicarse a la membrana para obtener el caudal nominal de permeado.

Como el caudal de rechazo de una membrana se utiliza como caudal de alimentación de la siguiente, el agua se va concentrando al pasar de una membrana a otra mientras que la presión de alimentación se va reduciendo como consecuencia de la pérdida de carga. Por tanto el caudal que produce cada membrana es siempre superior al de la membrana que le sigue.

Si representamos gráficamente la situación de cada membrana, en el interior de un tubo de presión, respecto al caudal, se obtiene una línea descendente como la de la figura y el caudal medio por membrana, representado por la línea de puntos, es también inferior al nominal.

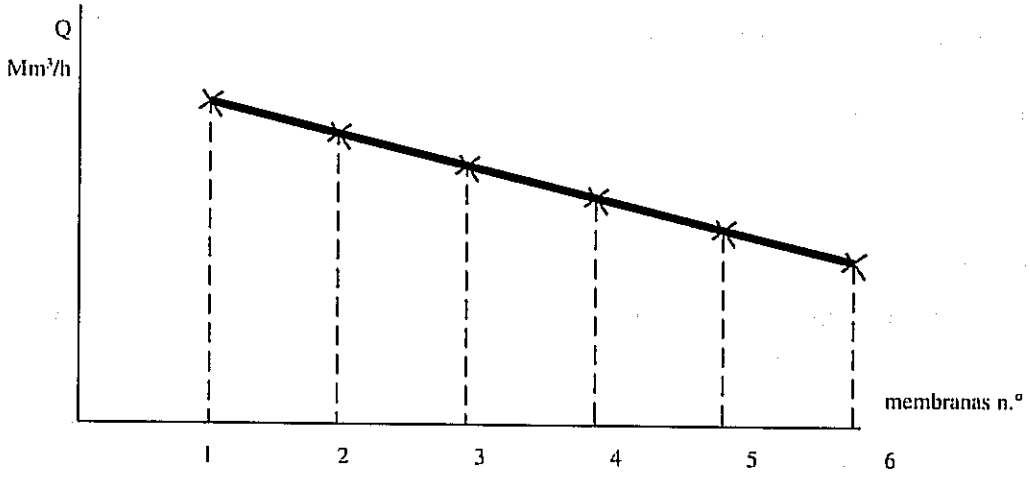


Figura 9.1. Variación del caudal de las membranas de un tubo.

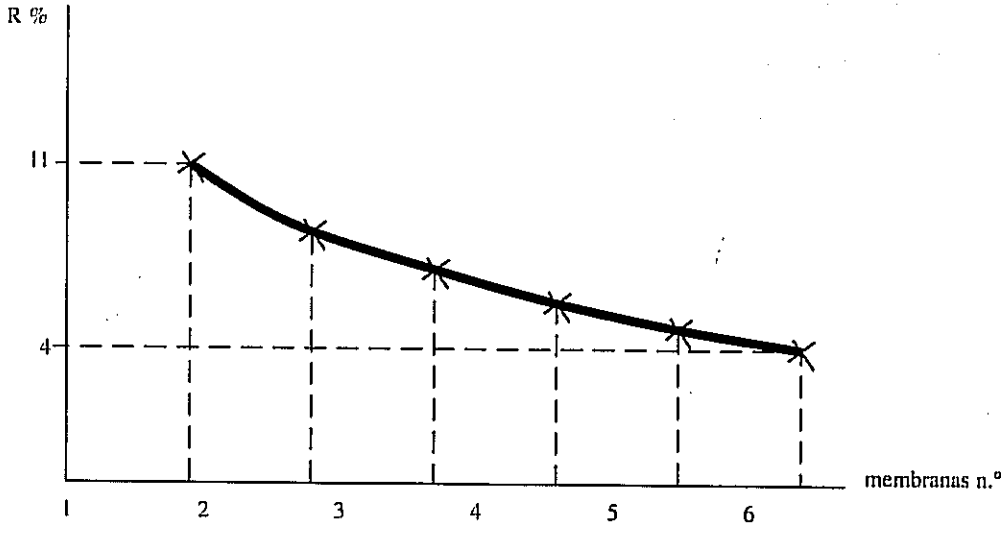


Figura 9.2. Recuperación por membranas de un tubo de presión.

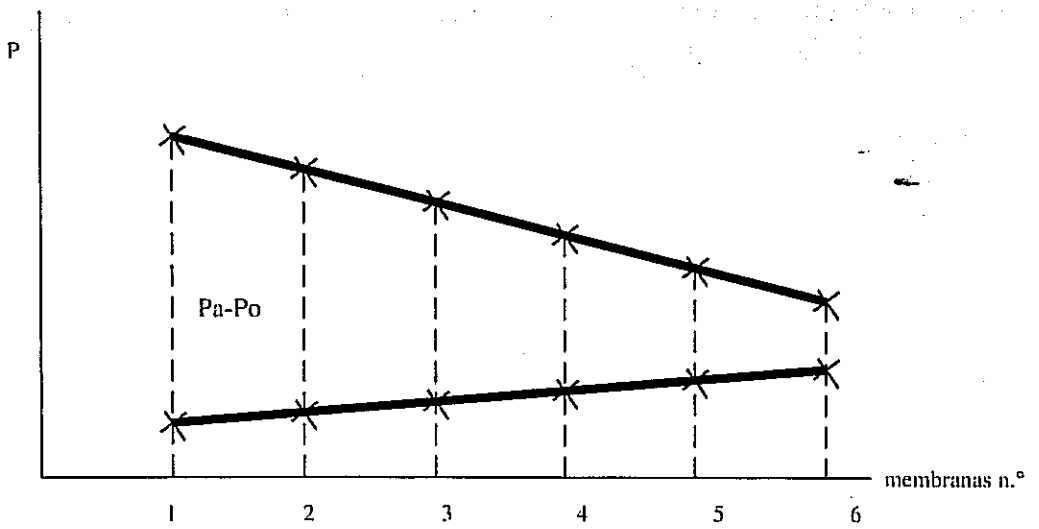


Figura 9.3. Curvas de variación de presiones de alimentación y osmóticas.

Si se determina la recuperación de cada elemento, se comprueba que ésta es descendente, de forma que el caudal medio suele estar alrededor del 60-70 % del nominal y es el que se emplea en el diseño.

La causa es el continuo descenso de la presión neta, dado que la presión aplicada disminuye por el rozamiento con las membranas y la presión osmótica aumenta al hacerlo la salinidad del rechazo.

Estas diferencias se traducen en la práctica en la mayor recuperación que se consigue en los tubos de presión de primera etapa.

Por ejemplo, si queremos diseñar una instalación de 20.000 m^3/día de capacidad, utilizando membranas de producción nominal de 28 m^3/día, según datos del fabricante, tendríamos:

Caudal real de cálculo de la membrana: $28 \times 0{,}70 = 19{,}6$ m^3/día.

N.° de membranas: 20.000 : 21 = 1020,4.

Si las alojamos en un tubo de seis membranas sería:

1020,4 : 6 = 170,06 tubos ⟶ tomaríamos 170 tubos de presión.

Este sería el punto de partida del diseño, puesto que a partir de aquí habría que comprobar otros parámetros del sistema, antes de decidir finalmente cuál es el número final.

Pero además el diseño se hace, no pensando en el arranque de la planta, sino en su situación al cabo de 3 ó 5 años.

La membrana, desde el mismo momento de su puesta en funcionamiento, empieza a perder caudal y rechazo a un ritmo generalmente muy lento, como consecuencia de dos factores:

— La presión a que se ve sometida y que le produce una compactación.

— El aporte de partículas que superan todos los elementos del pretratamiento.

Por tanto sus datos iniciales de funcionamiento deben ser corregidos, para establecer predicciones a esos 3 ó 5 años ya citados.

Esta corrección se contempla mediante lo que se conoce como «Fouling Factor» (FF) o su equivalente castellano «Coeficiente de ensuciamiento».

La compactación depende de la temperatura del agua y de la presión aplicada y se recoge en una curva tal como la de la figura 9.4.

Esta curva varía según el fabricante de la membrana, que es el que la determina. Generalmente no está a disposición del proyectista.

El segundo aspecto se contempla como un coeficiente reductor comprendido entre el 5 y el 10 % según sea el tipo de agua a tratar. Así pues el FF es un coeficiente reductor que contempla el conjunto de ambos aspectos.

Queda un último punto a considerar que es el flujo específico, es decir, el caudal que se recupera por superficie unitaria de membrana (GFD).

Calcularíamos el factor de diseño GFD en cada caso que sería para nuestro ejemplo anterior y suponiendo una superficie por membrana de 300 pies cuadrados:

$$20.000 \times 1000 : 170 \times 6 \times 300 \times 3{,}785 = 17{,}27 \text{ GFD}$$

Por tanto este número de tubos y membranas sería válido, de acuerdo con lo expuesto en un apartado anterior, para el caso de agua de mar con una toma en pozo o para agua salobre con toma de pozo poco profundo. Si las condiciones de la toma fueran otras más complicadas habría que cambiar el diseño incrementando el número de membranas y tubos.

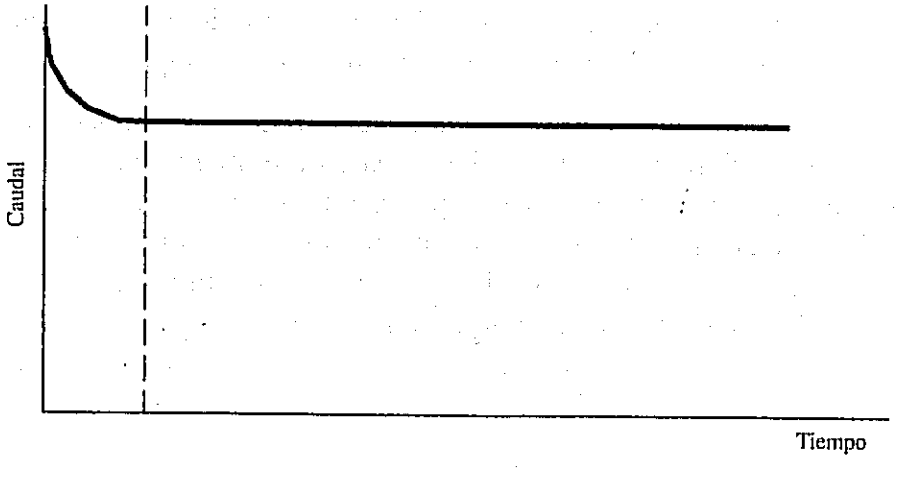


Figura 9.4. Curva de compactación de la membrana.

En el caso de las membranas de fibra hueca ocurre lo mismo, si bien al colocarse únicamente dos membranas en serie, las diferencias entre una y otra no son tan grandes como en el otro caso y las recuperaciones tampoco.

El caudal de diseño de partida es pues el nominal de la membrana cuando ésta se utiliza aisladamente y un 80-85 % cuando se utiliza por parejas.

9.7. Agrupación de membranas, número de etapas

Las membranas se colocan como hemos dicho en tubos de presión en el caso de las de arrollamiento en espiral y por parejas en el caso de fibra hueca.

La capacidad de recuperación de las membranas es limitada, siendo los valores máximos según datos de los fabricantes los siguientes:

— Membranas espirales agua salobre: 15 %.

— Membranas espirales agua de mar: 10 %.

— Membranas fibra hueca: 40 %.

Asimismo cuando se colocan las membranas en tubos de presión, los valores máximos de recuperación por tubo de 6 membranas son:

— Agua salobre: 55 %.

— Agua de mar: 42 %.

— Agua de mar en tubo 7 membranas: 45 %.

De aquí se deduce que cuando se trata de aguas salobres cuya capacidad de recuperación es superior al 50 %, se necesitarán por tanto varias etapas:

— Un sistema de dos etapas puede operar a un 60-75 % de conversión.

  En este caso la recuperación por membrana es del 7 al 12 %.

— Si se recupera más del 75 % los elementos individuales superan su límite de conversión, por lo que es necesaria una tercera etapa.

— Si se opera a menos del 60 % de recuperación, correspondería según lo expuesto anteriormente colocar dos etapas, sin embargo en la práctica se observa que el caudal en ambas etapas es muy desigual de forma que el de la primera etapa resulta excesivamente grande, por lo que se producen pérdidas de carga excesivas y pueden dañarse las membranas. En estos casos es preferible una sola etapa, aunque se fuerce un poco la capacidad productiva de los permeatos, con una vigilancia especial sobre los parámetros de ensuciamiento y caudales.

En las membranas de fibra hueca cuando se utilizan altas recuperaciones se consideran los siguientes porcentajes:

— Dos etapas hasta un 60 % de conversión.

— Tres etapas hasta el 90 %.

En cuanto al agua de mar, su elevada salinidad no aconseja recuperaciones superiores al 45 %, por la elevada concentración que adquiere la salmuera.

Con tubos de 6 metros se puede conseguir ese 45 % en dos etapas, mientras que en tubos de 7 m y en una sola etapa la recuperación aconsejable es del 43 %, pudiendo elevarse hasta el 45 % citado cuando la operación de la instalación es más cuidadosa. En este segundo caso la disminución de producción se compensa con una mejora de la calidad del producto.

Respecto a la decisión de colocar una o dos etapas deben analizarse las circunstancias que concurren en la instalación.

Si la toma de agua de mar es en pozo playero, es decir que el agua de alimentación no está contaminada, y el índice SDI es muy bajo, cualquiera de las dos soluciones es correcta pero la de dos etapas permite una recuperación ligeramente superior, aunque una calidad media algo inferior. La recuperación en la 1.ª etapa suele ser de un 65 % del total y el restante 35 % en la segunda etapa.

La calidad que se obtiene en la primera etapa es muy superior a la de la segunda y el ensuciamiento a lo largo del tiempo es inferior. Como además la pérdida de carga en cada etapa es independiente y permite mantener más tiempo en funcionamiento la instalación sin tener que recurrir a su limpieza.

Cuando la toma de agua de mar es abierta, se obtienen mejores resultados con una sola etapa.

Aunque las instalaciones de ósmosis inversa deben funcionar de forma ininterrumpida, no siempre ocurre así. En caso de que haya que someter la instalación a sucesivas paradas y arranques es preferible usar tubos de 6 membranas en lugar de 7.

Si bien no con carácter general se han producido fallos en las instalaciones de 7 membranas, quizás debidas a un alargamiento del tubo como consecuencia de los golpes de ariete que se producen en el arranque. Se originan fugas de agua de mar que producen un aumento de la salinidad del agua producto.

En las instalaciones de membranas de fibra hueca, al colocarse éstas por pares, son siempre disposiciones de dos etapas que cubren ampliamente las recuperaciones normales en agua de mar.

Precisamente con este tipo de membranas se están haciendo intentos de aumentar la recuperación hasta el 55 %, sin embargo la experiencia existente no es grande y conviene ser prudentes con estas elevadas conversiones.

En teoría, la mayor superficie unitaria de la membrana de fibra hueca permitiría recuperaciones incluso superiores a esta cifra, sin embargo se superarían los límites de solubilidad de algunas sales del concentrado y se precisarían antiincrustantes fiables y seguros.

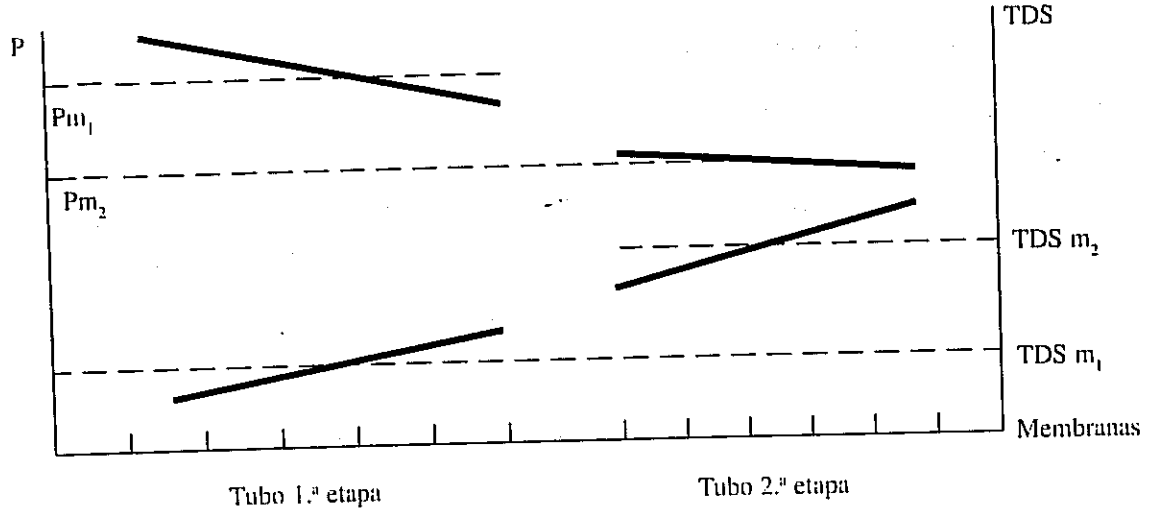


Figura 9.5. Curvas de presiones y salinidades medias por tubo en instalaciones de 2 etapas.

De otra parte el empaquetado de las fibras de la membrana no favorece demasiado este aumento de la recuperación.

Dada la importancia de este factor para el abaratamiento de la instalación, se sigue trabajando ampliamente en ello, pero como se ha dicho no existen todavía instalaciones importantes con esta recuperación.

En cualquier caso habría que incrementar las precauciones en el pretratamiento físico-químico, para evitar núcleos de precipitación que pudieran favorecer dicho proceso.

9.8. Presiones

Los caudales de partida del diseño quedan establecidos para unas condiciones de presión y salinidad dadas, según pruebas de laboratorio realizadas por el fabricante de las membranas, con aguas de gran calidad desde el punto de su contenido en elementos físicos o productos contaminantes.

Ya se ha referido que en la práctica esta situación no se da y que el agua de cada instalación desaladora presenta diferencias, aunque sean ligeras, respecto a cualquier otra. La instalación va a funcionar por tanto en otras condiciones, en particular en lo que se refiere a las presiones.

Al producirse el arranque de la planta se realiza un ajuste de la presión con objeto de que la producción y la salinidad sean los previstos. Dicha presión va a ser lógicamente lo más baja posible puesto que en esos instantes las membranas están completamente nuevas.

A partir de ese momento se empieza a producir un paulatino ensuciamiento y compactación de las mismas, por lo que el caudal empieza a descender.

Este proceso continúa a lo largo de todo el tiempo de funcionamiento de la instalación, y si se quiere mantener el caudal nominal de la misma hay que aumentar la presión del agua que alimenta a las membranas.

El diseño debe por tanto tener en cuenta este aspecto fundamental y en consecuencia los equipos de presión estarán previstos para poder dar esa presión que se requerirá al cabo de tres o cinco años.

El límite superior de dicha presión es el que establece el fabricante para cada tipo de membrana y que en esencia es el siguiente:

— Membranas de ultrabaja presión: 15,5 kg/cm^2 (225 psi).

— Membranas de baja presión: 20,7 kg/cm^2 (300 psi).

— Membranas de media presión: 27,7 kg/cm^2 (400 psi).

— Membranas de acetato celulosa: 41,4 kg/cm^2 (600 psi).

— Membranas de agua de mar: 69-82 kg/cm^2 (1.000-1.200 psi) según el tipo.

En la práctica no se deben alcanzar estas presiones pues ello significaría que se está forzando demasiado la membrana, permitiendo un ensuciamiento excesivo de la misma, y produciéndose al mismo tiempo un aumento del consumo energético. Antes de llegar a esas presiones las membranas han debido someterse a un proceso de limpieza adecuado.

Según lo dicho existe una relación directa o lineal entre la presión y el caudal de la membrana, es decir que a mayor presión aumenta la producción.

Pero esta relación sólo se mantiene mientras la membrana es nueva; con el tiempo la membrana se va obstruyendo y al aumentar la presión lo único que se consigue es que la suciedad quede adherida con más fuerza a la membrana y que por tanto por mucho que aumentemos la presión no consigamos sino que el caudal vaya disminuyendo. Este es el momento en que hay que proceder al cambio de las membranas.

La curva de la figura refleja ese fenómeno. A partir del punto B el caudal máximo se mantiene durante algún tiempo y empieza a descender. La limpieza de las membranas ya no resulta efectiva, por lo que si bajamos de nuevo la presión, la curva cambia y los caudales que se obtienen son inferiores a los iniciales, tramo CD de la curva discontinua.

Se llegue o no a esos valores máximos, el paso del agua a través de las membranas produce un ensuciamiento y genera unas pérdidas de carga que también hay que prever, especialmente para el diseño de la turbina de recuperación.

En las instalaciones con membranas en espiral, esas pérdidas de carga pueden alcanzar hasta un máximo de 4 kg/cm^2 por etapa.

Sin embargo por motivos de seguridad y dado que las membranas tienen unas condiciones de garantía que no deben superarse, es conveniente consultar con el

fabricante las pérdidas de carga previstas en cada instalación para obtener su aprobación.

Unas pérdidas de carga demasiado elevadas pueden deteriorar la membrana de forma irreversible mediante el fenómeno conocido como «telescoping» que consiste en un desplazamiento de las distintas láminas enrolladas en la membrana, produciendo un efecto físico similar al que produce un telescopio plegable. Este desplazamiento provoca fugas y roturas, y por tanto una elevada salinidad del permeado.

Si las instalaciones son de fibra hueca, como sólo existe una membrana por etapa no se suelen superar los 2,5 kg/cm^2.

Pero estas cifras máximas sólo se alcanzan en situaciones muy difíciles de operación y cuando los condicionantes externos son muy rígidos.

Este sería el caso de una instalación desaladora de agua de mar con una toma abierta, en aguas con una cierta contaminación y en la que la escasez de agua obliga a forzar la producción interrumpida de agua.

Lógicamente no es éste el caso más frecuente, por lo que la experiencia del proyectista le indicará las pérdidas de carga con las que hay que contar para atender a estas contingencias.

Esta presión diferencial o «delta pi», que es como se la conoce en términos usuales por todo lo explicado, puede variar entre 3 y 8 kg/cm^2.

Dicha pérdida de carga, sumada a la presión de alimentación, nos servirá para elegir la bomba de alta presión.

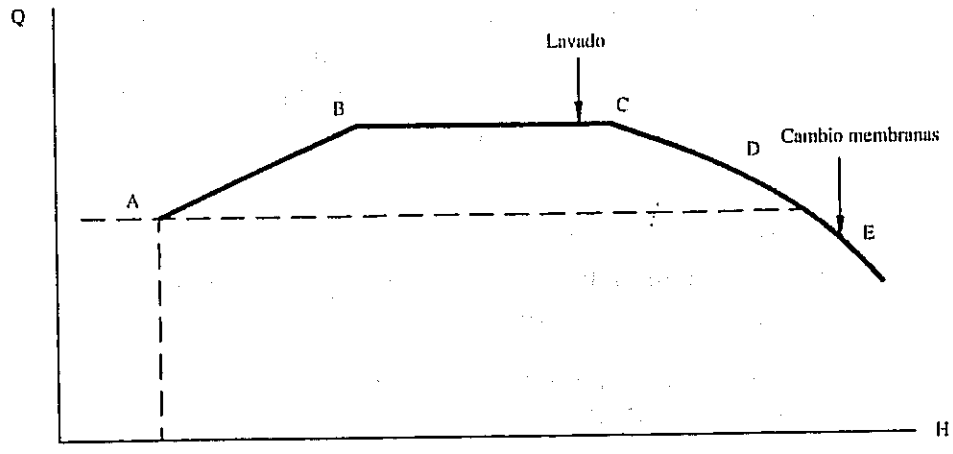


Figura 9.6. Curva de producción-presión.

9.9. Colocación de tubos (arreglo)

La unidad de producción en las instalaciones con membranas de arrollamiento en espiral es el tubo de presión, generalmente con 6 ó 7 membranas, mientras que en las de fibra hueca es la membrana, simple o doble.

Para conseguir una producción determinada será por tanto necesario colocar en paralelo las unidades de producción adecuadas, pero teniendo en cuenta las limitaciones de recuperación, por tubo o membrana, indicadas anteriormente.

Esto nos lleva a establecer un determinado escalonamiento en la colocación de las unidades, que se conoce como arreglo (*array* en la denominación inglesa).

A medida que va aumentando el número de pasos o etapas, se va reduciendo el número de membranas de cada escalón.

Esto es lógico si se tiene en cuenta que el caudal que se procesa en los distintos escalones es sólo una parte del que alimenta a las membranas del primer escalón, producto o rechazo.

Para mantener las mismas velocidades de circulación y arrastre deberán colocarse menos membranas. De no actuarse de esta manera podrían producirse desequilibrios en el funcionamiento de las membranas y en consecuencia se podrían producir problemas antes de lo esperado.

El caudal específico (GFD ó $l/m^2 \cdot h$) de cada escalón debe mantenerse sensiblemente igual.

Hay sin embargo situaciones especiales en que se producen algunas variaciones, cuando en cada paso o escalón se utilizan membranas distintas de las del anterior. En este caso las características específicas de cada membrana son las que fijan los valores correspondientes.

En el caso de las membranas espirales, habida cuenta de los límites de recuperación de los que se ha hablado anteriormente, cada escalón suele tener aproximadamente la mitad del número de membranas y tubos que tiene el anterior.

Un arreglo normal con estas membranas sería el 8 : 4 : 2, es decir, ocho tubos de presión en la primera etapa, 4 en la segunda y dos en la tercera.

Sin embargo, esto no significa que deban existir tres bastidores, pues lo normal es colocar un bastidor por línea de producción, de forma que los tubos de las tres etapas se colocan sobre el mismo bastidor, y luego se hacen las interconexiones correspondientes para formar los tres grupos independientes.

La excepcionalidad suele estar en las membranas de fibra hueca de las que ya se ha citado su colocación por parejas, siendo por tanto los arreglos normales del tipo 30:30 o similares.

9.10. Velocidades y flujos

Pero además debe tenerse en cuenta que las membranas están sometidas a las leyes hidráulicas y que en consecuencia debe existir un caudal suficiente para el barrido del concentrado de sales y una red hidráulica en su interior que facilite tanto el paso del agua a través de la membrana como la no deposición sobre la misma de partículas o precipitados.

También deben mantenerse unas relaciones entre los caudales de salmuera y permeado por membrana.

Esto nos lleva a acotar entre ciertos límites los caudales que deben llegar a las membranas.

Según datos facilitados por los fabricantes de membranas dichos valores serían:

— Membranas de arrollamiento en espiral.

Caudales Max por tubo 6 membranas.

- 4" de 10-40 lpm.
- 8" de 40-200 lpm.

Caudal salmuera por tubo > 10 lpm (4") y > 40 lpm (8").

Relación concentrado/permeado por elemento 5:1.

— Membranas de fibra hueca.

Caudal salmuera: 5-150 en normales y 50-150 m^3/día en Twin.

9.11. Factor Beta

Mide la relación entre la velocidad del agua de alimentación paralela a la superficie de la membrana y la velocidad del permeado perpendicular a la membrana.

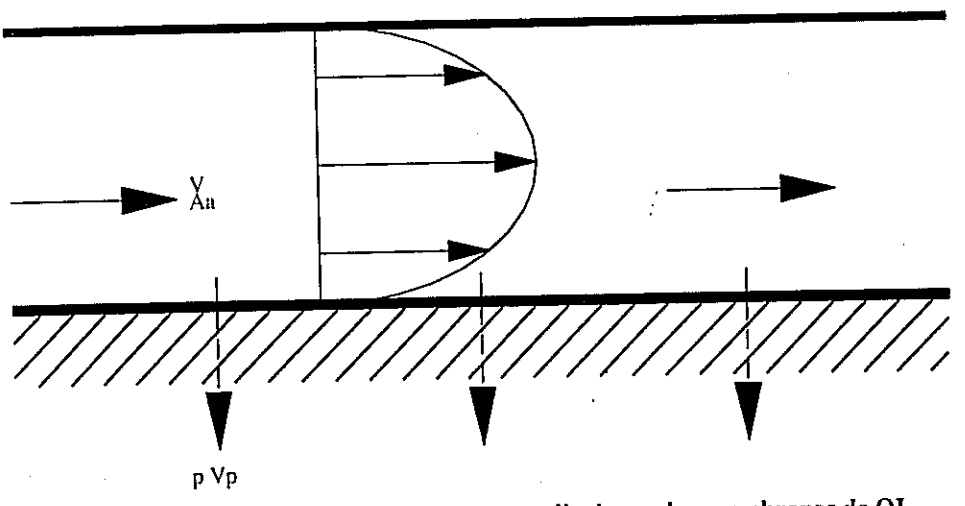


Figura 9.7. Velocidades tangencial y perpendicular en las membranas de OI.

Este valor está relacionado con la recuperación de la membrana, pues al aumentar ésta, también lo hace el caudal de permeado en detrimento del de salmuera.

A los efectos de diseño se considera en la mayoría de los casos que este valor debe ser menor de 1,2. A medida que aumenta el número de membranas en serie (por tubo), disminuye el factor Beta.

9.12. Factor de envejecimiento

Como ya se ha repetido anteriormente, la membrana va perdiendo con el tiempo características, que aunque se intentan compensar con el aumento de presión, no se consiguen totalmente.

También esto debe ser tenido en cuenta para el diseño, y suele englobarse dentro del concepto de envejecimiento que incluye dos aspectos:

9.12.1. El factor de incremento del paso de sales

Se emplea un factor de 2 para las membranas de acetato de celulosa, que indica que se dobla en tres años, mientras que para las de poliamida se emplea un factor de 1,3, es decir, un 30 % de incremento.

Esto implica la suposición de un incremento anual en el paso de sales entre el 5 y el 15 % anual, para las membranas de poliamida y entre el 15 y el 30 % anual para las de acetato de celulosa

9.12.2. El coeficiente de descenso del flujo

Trata de evaluar lo ya explicado anteriormente, mediante la introducción de un número o factor de reducción. Según el programa que se utilice es un número entero positivo o un número negativo, decimal y menor de 1.

Por ejemplo un valor de -0,025 indica un descenso del 20 % en tres años. Para aguas con problemas de ensuciamiento un factor de -0,035 es más realista.

Normalmente en los programas de proyección se consideran pérdidas de caudal variables según el tipo de agua que se utilice entre un 4,5 % y un 8,5 % anual.

9.13. Programas de diseño

Toda esta complejidad de cálculos que se precisan para hacer un diseño correcto de la instalación, se simplifican bastante mediante la utilización de programas de ordenador que facilitan los diferentes fabricantes.

En función de las características del agua y de las membranas que se van a utilizar se pueden hacer distintos supuestos que permiten obtener por iteraciones sucesivas las proyecciones del funcionamiento de la instalación.

Estos programas permiten utilizar varios de los parámetros como variables, lo que facilita, en función de las circunstancias que concurren en cada caso, elegir las condiciones de funcionamiento idóneas.

En el cuadro de la página siguiente se recoge un programa de diseño en el que como puede verse se contienen numerosos datos que permiten decidir las membranas a utilizar y otros parámetros del funcionamiento de la instalación que se proyecta.

9.14. Equipos mecánicos

En esta fase del proyecto se deben tomar decisiones sobre los equipos de impulsión y especialmente sobre el bombeo de alta presión que es el que implica el mayor consumo energético de la instalación.

Dado que en la actualidad las mejoras en la calidad de las membranas han permitido reducir bastante las presiones de funcionamiento, muy particularmente en el caso de las membranas de agua salobre, y que por tanto en muchos casos los equipos de impulsión son de presiones medias y bajas, no parece muy apropiada esta denominación. Sin embargo se sigue manteniendo este término de bombas de alta presión, porque en los orígenes del proceso todas las bombas eran de ese tipo, y además este bombeo es siempre el de presión más elevada de todos los que se van a utilizar en la instalación.

9.14.1 Bombas de alta presión

Aunque en cuanto a las características de los tipos posibles de bomba a utilizar, en otro capítulo se aborda con mayor profundidad, sí es el momento de fijar la capacidad de la bomba de alta presión y si se va a utilizar o no algún equipo de recuperación de energía.

En cuanto a lo primero se debe definir el caudal y la presión que debe suministrar la bomba.

La presión tendrá en cuenta los aspectos que han sido comentados en este mismo capítulo y estará próxima a la máxima que soporta la membrana, con objeto de poder aprovechar al máximo la capacidad de ésta.

Hay que tener en cuenta que las bombas que se utilizan lo que hacen es elevar la presión entre su aspiración y su impulsión, por tanto la elevación de la presión que realiza la bomba vendrá definida por la diferencia entre ambas.

Para fijar el caudal hay que tener en cuenta los siguientes aspectos:

RO program licensed to:
Calculation created by: José A. Medina
Project name: Libro desalación

HP Pump flow:	193,9 m3/hr		Permeate flow:	2000,0 m3/d
Recommended pump press.:	62,7 bar		Raw water flow:	4651,2 m3/d
Feed pressure:	60,2 bar		Permeate recovery ratio:	43,0 %
Feedwater Temperature:	20,0 C(68F)			
Raw water pH:	8,00		Element age:	0,0 years
Acid dosage, ppm (98%):	0,0 H2SO4		Flux decline % per year:	7,0
Acidified feed CO2:	1,8		Salt passage increase, %/yr:	10,0
Average flux rate:	14,8 l/m2-hr		Feed type: Seawater - open intake	

Stage	Perm. Flow m3/hr	Flow per Vessel Feed m3/hr	Conc m3/hr	Flux l/m2-hr	Beta	Conc. Press. bar	Element Type	Elem. No.	Array
1-1	83,4	6,1	3,5	14,8	1,05	59,5	8040-HSY-SWC1	192	32x6

Ion	Raw water mg/l	Raw water meq/l	Feed water mg/l	Feed water meq/l	Permeate mg/l	Permeate meq/l	Concentrate mg/l	Concentrate meq/l
Ca	442,0	22,0	442,0	22,0	0,8	0,0	774,8	38,6
Mg	1583,0	130,3	1583,0	130,3	2,8	0,2	2775,0	228,4
Na	10948,0	476,0	10948,0	476,0	94,3	4,1	19135,9	832,0
K	481,5	12,3	481,5	12,3	5,2	0,1	840,8	21,6
NH4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Ba	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Sr	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
CO3	0,7	0,0	0,7	0,0	0,0	0,0	0,7	0,0
HCO3	98,0	1,6	98,0	1,6	1,3	0,0	170,9	2,8
SO4	2900,0	60,4	2900,0	60,4	5,5	0,1	5083,6	105,9
Cl	20566,0	580,1	20566,0	580,1	154,8	4,4	35963,9	1014,5
F	1,5	0,1	1,5	0,1	0,0	0,0	2,6	0,1
NO3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
SiO2	0,1		0,1		0,0		0,2	
TDS	37020,8		37020,8		264,7		64748,5	
pH	8,0		8,0		6,2		8,5	

	Raw water	Feed water	Concentrate
CaSO4 / Ksp * 100:	23%	23%	46%
SrSO4 / Ksp * 100:	0%	0%	0%
BaSO4 / Ksp * 100:	0%	0%	0%
SiO2 saturation:	0%	0%	0%
Langelier Saturation Index	0,81	0,81	1,77
Stiff & Davis Saturation Index	-0,13	-0,13	0,77
Ionic strength	0,78	0,78	1,40
Osmotic pressure	27,7 bar	27,7 bar	49,8 bar

— Características químicas del agua a tratar, que van a delimitarnos la conversión máxima a que se va a trabajar.

— Condiciones de funcionamiento de la instalación, dado que la forma de operar la planta y la disponibilidad o no de determinados equipos de control nos puede llevar a actuar de formas bastante diferentes, que como más frecuentes podemos citar:

La selección de la bomba se hará teniendo en cuenta tanto la curva de funcionamiento de la bomba como la de rendimiento.

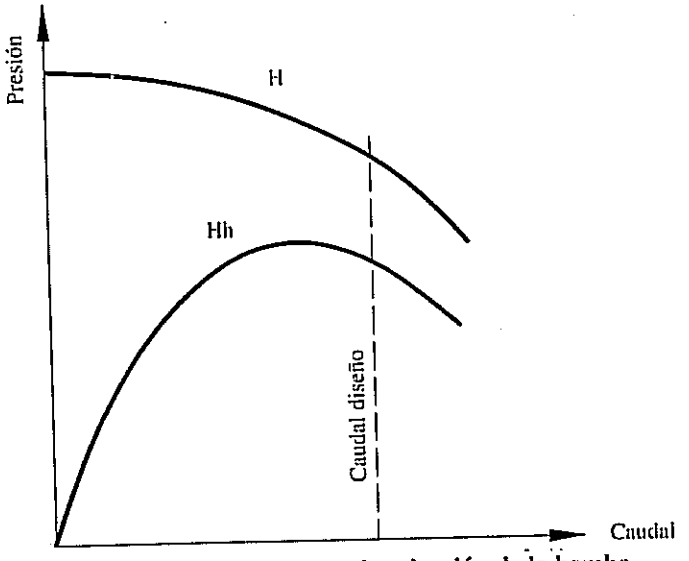


Figura 9.8. Curvas para la selección de la bomba.

Para ello, el caudal con el que se selecciona ésta debe quedar a la derecha del punto de máxima eficiencia de su curva.

La razón de ello estriba en que el caudal de diseño es el máximo que va a impulsar la bomba, pero no el normal de operación de la misma, que será algo menor y por tanto más próximo al punto de máxima eficiencia (BEP).

Respecto a la forma de operar la instalación y por tanto las bombas de alta presión, se presentan dos casos.

— Funcionamiento en continuo manteniendo el caudal de producción constante.

En esta situación y aunque se disponga de equipos de control bastante fiables, las oscilaciones en la producción y las pérdidas de carga en las membranas, están sujetas a múltiples e imprevistas circunstancias que es difícil controlar, por lo que frecuentemente hay que operar a un porcentaje del 2 ó 3 % por debajo o por encima de la conversión prevista.

Esto *obliga a* actuar sobre la presión de alimentación a membranas, que deberá incrementarse de forma continua.

La regulación del sistema se consigue mediante un caudalímetro, situado en el permeado, que envía una señal a la válvula de control produciendo su apertura o

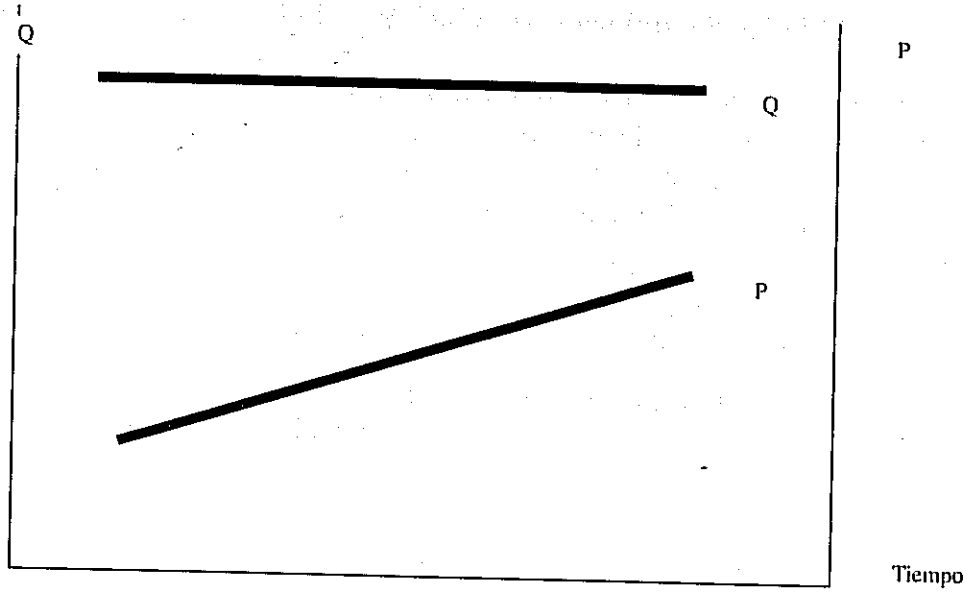


Figura 9.9. Funcionamiento a caudal constante.

cierre, para provocar el aumento o reducción de la presión de alimentación al bastidor que equilibrará las variaciones de caudal detectadas.

— Funcionamiento a presión constante.

En este caso las membranas se alimentan desde el inicio a la presión más alta posible, con lo que el caudal es más alto al principio y va disminuyendo con el tiempo a medida que se produce el ensuciamiento.

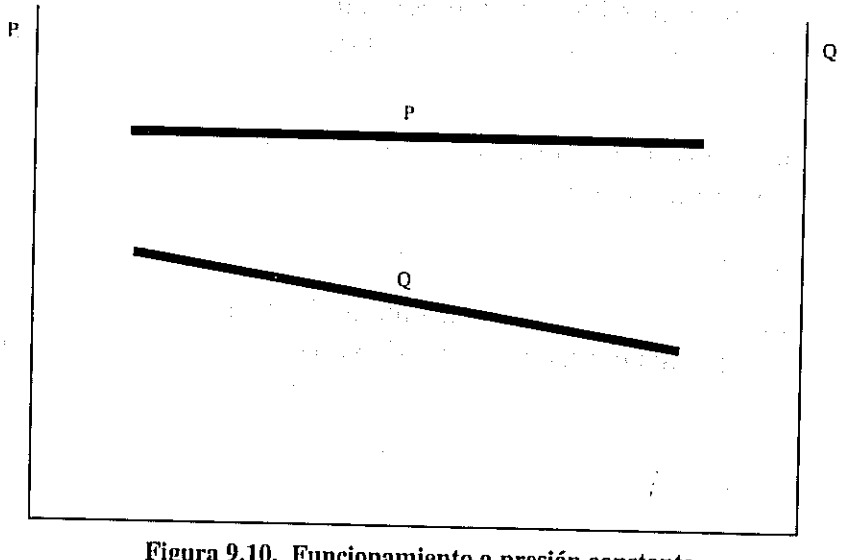


Figura 9.10. Funcionamiento a presión constante.

Si se decide operar a una presión inferior a la máxima, un transmisor de presión es el que determina la apertura o cierre de la citada válvula de control para mantener la presión de consigna.

En caso de que el sistema tenga recuperación de energía en uno u otro tipo de operación se puede también actuar sobre el by-pass de la turbina, si éste existiera.

9.14.2. Posibilidades de mejora o ampliación de la instalación

Las constantes mejoras en la producción de membranas están consiguiendo con frecuencia un aumento de la producción unitaria por membrana, en consecuencia, para poder acceder a este tipo de mejoras y además poder incrementar la producción general de la instalación, cuando la demanda de agua aumenta a un mayor ritmo del previsto, es preciso dejar una reserva de potencia en la instalación. Por todo ello los equipos de alta presión deben diseñarse para suministrar un caudal de un *5 a un 10 %* superior a las necesidades iniciales de la instalación.

Esto implica que el equipo de recuperación de energía, si fuera a utilizarse, también deberá tener en cuenta este exceso. La elección de la bomba y la turbina debe estar regida por criterios de eficiencia. Las dos opciones que se plantean en la elección de la bomba entre bomba centrífuga o de desplazamiento positivo, en las instalaciones de agua de mar o salobres de elevada salinidad, no son siempre absolutas.

Las bombas de desplazamiento positivo tienen rendimientos muy elevados, próximos al 90 % y parece que eso debería decidirnos por ellas en la mayoría de los casos. Sin embargo este tipo de bombas tiene otras limitaciones. Su capacidad es limitada, por lo que no pueden elegirse para grandes capacidades. Están sometidas a vibraciones y en consecuencia las averías son más frecuentes.

No pueden funcionar tampoco a válvula cerrada, lo que obliga a la colocación de válvulas de seguridad que eviten roturas por sobrepresiones.

Tampoco son muy flexibles en su funcionamiento y en consecuencia se ajustan mal a las variaciones que se producen, con el tiempo, en el funcionamiento normal de una instalación.

Las bombas centrífugas multietápicas son de rendimientos algo menores, pero más seguras en su funcionamiento.

También aquí puede optarse por bomba de cámara partida o de segmentos.

En general, en igualdad de circunstancias la bomba de segmentos tiene una eficiencia de 2 a 3 puntos porcentuales por debajo de la de cámara partida, excepto en diseños muy especiales, especialmente a caudales más elevados, pero es más barata.

Sin embargo el mantenimiento o las reparaciones resultan más sencillas en las de cámara partida, por lo que teniendo en cuenta el funcionamiento continuo exigible a las instalaciones desaladoras, y por tanto su susceptibilidad a desgastes y averías, son las más usadas.

Los rendimientos de estas bombas, aunque inferiores a las de pistones, aumentan con el tamaño pudiendo variar entre el 77 y 84 %. Para conseguir eficiencias mayores, de hasta el 86 %, se necesitan bombas de barril de mayores capacidades, pero también los motores resultan demasiado grandes y asimismo los bastidores, que no resultan prácticos.

Una tercera opción de uso menos frecuente es la de las bombas centrífugas verticales, que son lógicamente más difíciles de mantener y reparar, pues al no tener ninguno de sus elementos básicos fácilmente accesibles, obligan a extraer la bomba en su totalidad del pozo en que está instalada.

Además para instalaciones de agua de mar el número de etapas necesario es elevado y en consecuencia la bomba muy alta, 3-4 m, por lo que se requiere hacer un pozo o depósito profundo para introducirla en él y que no sobresalga demasiado del nivel del terreno.

Su instalación es por tanto menos ventajosa y realmente apenas existen plantas desaladoras de agua de mar con este tipo de bombas.

Al margen de los inconvenientes citados, para grandes capacidades sus eficiencias son elevadas.

Otras bombas centrífugas más compactas, de las que hemos hablado en el capítulo anterior, para alcanzar las elevadas presiones del agua de mar funcionan a velocidades muy elevadas, siendo por tanto más susceptibles a paradas imprevistas. Tienen por otra parte eficiencias menores que compensan con un precio sensiblemente menor.

Su mayor inconveniente en estos momentos es la escasez de referencias de equipos en funcionamiento y su poca antigüedad, lo que obliga a ser prudente en su selección, muy especialmente en los grandes tamaños, que no están suficientemente contrastados. Respecto a las instalaciones de aguas salobres hay una mayor gama de bombas.

Las bombas de pistones son muy usadas para instalaciones pequeñas, de hasta 300 m^3/día de capacidad, pues como hemos indicado tienen una alta eficiencia. Sin embargo su mantenimiento es mayor y cuando por el tamaño de la planta o su aislamiento no se dispone de personal cualificado es preferible recurrir a otras bombas, aunque menos eficientes, más seguras como las tipo booster o las centrífugas de una etapa. Estas bombas son además menos ruidosas, por lo que según donde se ubique la instalación puede ser imprescindible recurrir a ellas.

Asimismo para presiones medias e instalaciones grandes, las de cámara partida o mejor aún las de segmentos tienen unas amplias posibilidades de utilización.

La bomba vertical en estas instalaciones es también más frecuente pues su tamaño, al ser menores las presiones y el número de etapas, se reduce bastante respecto al agua de mar.

9.14.3. Recuperación de energía

La incorporación de equipos de recuperación de energía es práctica habitual en las instalaciones de agua de mar, en las que al alcanzarse recuperaciones inferiores al 50 %, existe un potencial de energía muy importante para recuperar en el rechazo.

Teniendo en cuenta las eficiencias de los equipos de recuperación, ahorros del 30 al 35 % de la potencia son factibles. Esto supone además reducir la potencia de los motores y por tanto menores gastos de inversión.

Cuando la turbina es una bomba invertida hay que tener en cuenta que su curva de presión y eficiencia también lo es, pero su pendiente es mayor que la de la correspondiente bomba.

Esto significa que pequeñas variaciones en el caudal tienen más repercusión en la eficiencia de la turbina que en la de la bomba, por lo cual es más interesante la adecuada selección de su punto de funcionamiento y por tanto de la citada turbina.

En las instalaciones de agua salobre la rentabilidad de las turbinas es sin embargo más dudosa y debe analizarse profundamente antes de tomar la decisión.

Con las recuperaciones de producto habituales en estos casos, del 70 % y superiores, sólo de un 10 a un 25 % del caudal de alimentación pueden ser aprovechados en las turbinas. Teniendo en cuenta que las turbinas de menores capacidades tienen también rendimientos menores, finalmente no se consigue alcanzar en muchos casos sino recuperaciones energéticas del 5 al 7 %.

No parecen pues aconsejables estos equipos en instalaciones pequeñas, en los que introducen además complicaciones de manejo y funcionamiento, para los que muchas veces no se dispone de los medios humanos necesarios.

En las instalaciones mayores y compuestas de varios bastidores es más frecuente la instalación de equipos de recuperación de energía, aunque no individuales.

Lo que se hace generalmente es recoger el rechazo de todos los bastidores existentes y concentrarlos en uno o dos colectores comunes que los llevarían a una o dos turbinas. Por tanto sólo uno o dos de los trenes de producción estarían dotados de turbobombas y recuperarían la energía (ver figura 9.11).

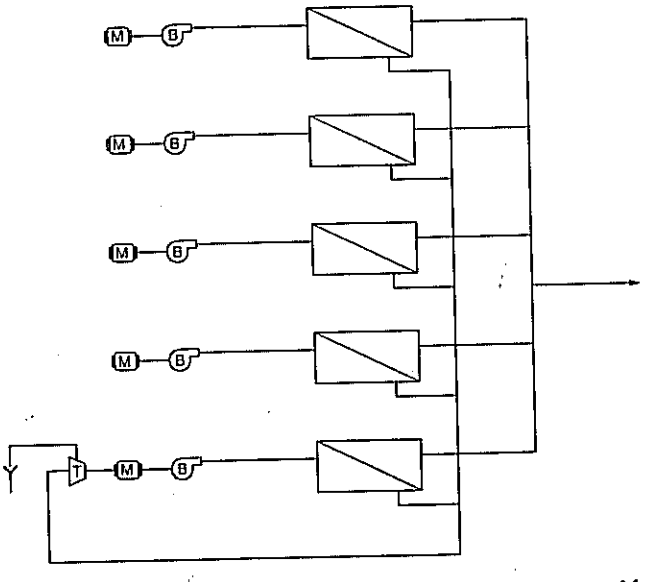


Figura 9.11. Turbina en instalaciones de alta recuperación.

En la instalación habría en consecuencia dos tipos de trenes de producción, el normal sin turbina y los que llevan turbina incorporada, que además estarán dotados de motores de menor potencia. Se introduce una mayor diversificación de equipos con sus consiguientes repuestos cuya conveniencia también debe analizarse.

En muchos casos la instalación de variadores de velocidad puede incluso ser más ventajoso que la colocación de dicha turbina.

En la elección de la turbina también existen dos opciones según se trate de una turbina tipo Pelton o una bomba multietápica invertida.

Las turbinas Pelton tienen rendimientos superiores, especialmente para caudales pequeños, pero a medida que aumenta su capacidad estos se van igualando llegándose a diferencias más pequeñas.

Sin embargo dentro del conjunto bomba-turbina para instalaciones de agua de mar, la primera impulsa el caudal total, mientras la segunda sólo recibe el 55-60 % del mismo. Es decir, que la diferencia de utilizar uno u otro tipo de turbina puede suponer ahorros energéticos entre el 5 y el 9 %.

Con los equipos utilizados normalmente en las instalaciones de agua de mar más usuales y recuperaciones medias del 40 %, podríamos hacer el siguiente cuadro:

CUADRO 21

Eficiencia de los grupos turbobomba de alta presión

Producción por bastidor	*Capacidad Bomba*	*EFICIENCIA*		
		Bomba	*Bomba invertida*	*Turbina Pelton*
(m^3/día)	*(m^3/hora)*	*(%)*	*(%)*	*(%)*
1.500	65	77	70	83-84
2.500	110	80	76-77	84-85
5.000	210	82	79	86
7.000	290	84	81	88

La utilización del equipo conocido como supercharger puede aparentemente abaratar la instalación y el consumo, pero creemos que para su utilización eficiente en desalación de agua de mar, al igual que con las bombas anteriores, se requiere una mayor experiencia.

Como ejemplo de las ventajas que supone la introdución de equipos de recuperación de energía podemos imaginar la turbobomba de un bastidor necesaria para producir 5.000 m^3/día suponiendo que se utilizan membranas de arrollamiento en espiral que soportan una presión máxima de 70,5 kg/cm^2.

Conversión de diseño 45 %.

Caudal de la turbobomba = (5.000/24):0,45 = 463 m^3/h.

Presión al inicio del funcionamiento: 62 kg/cm^2.

Presión máxima antes de lavado de membranas: 69,5 kg/cm^2.

Eligiendo bombas de alta presión con una presión mínima de aspiración de 1,5 kg/cm^2 y tomando un 5 % más de capacidad de impulsión tendríamos:

Tamaño de bomba: Caudal = 463 × 1,05 = 486 m^3/h.

Incremento de elevación: 69,5-1,5 = 68 Kg/cm^2.

Si la eficiencia de la bomba es del 82 % y la del motor del 92 %, la potencia necesaria de éste sería:

$$(1{,}02 \cdot 680 \cdot 486/3{,}6)/(75 \cdot 0{,}82 \cdot 0{,}92) = 1.654 \text{ CV} = 1217 \text{ kW}$$

Suponiendo una pérdida de carga máxima en el bastidor de 4 kg/cm^2 tendríamos para la turbina de recuperación:

Con bomba invertida de eficiencia 76 %.

Potencia recuperada:

$$(640 \cdot 0{,}55 \cdot 486/3{,}6) \cdot 1{,}02 \cdot (0{,}76 \,.\, 0{,}92)/75 = 449 \text{ CV} = 330 \text{ kW}$$

Con turbina Pelton de eficiencia 84 %.

Potencia recuperada:

$$(640 \cdot 0{,}55 \cdot 486/3{,}6) \cdot 1{,}02 \cdot (0{,}84 \cdot 0{,}92)/75 = 499 \text{ CV} = 367 \text{ kW}$$

Lo que nos indica que en lugar de unas necesidades de potencia de 1217 kW se precisarían según el tipo de turbina elegida 887 ú 850 kW. Esta reducción sería aplicable a cada bastidor de 5.000 m^3/día de capacidad de que constara la instalación.

Supongamos ahora que se trata de una instalación de agua salobre con una recuperación del 75 % y con bastidores también de 5.000 m^3/día de capacidad.

Presión al inicio del funcionamiento = 22 kg/cm^2.

Presión máxima antes de lavado = 26 kg/cm^2.

Como en el caso anterior, con bombas de un 5 % más de capacidad de impulsión y una presión de aspiración de 1,5 kg/cm^2, tendríamos:

Caudal necesario = (5.000 : 24)/0,75 = 278 m^3/h.

Tamaño de bomba. Caudal = 278 × 1,05 = 292 m^3/h.

Incremento de elevación: 26-1,5 = 24,5 kg/cm^2.

Para una bomba de un 77 % de eficiencia y un motor del 92 % tendríamos:

Potencia necesaria del motor:

$$(245 \cdot 292/3{,}6) / (75 \cdot 0{,}77 \cdot 0{,}92) = 374 \text{ CV} = 275 \text{ kW}$$

Para una pérdida de carga en el bastidor de 4 kg/cm^2 tendríamos:

Caudal de salmuera = 292 . 0,25 = 73 m^3/h.

Potencia recuperada:

Con bomba invertida de eficiencia del 70 %

$$(205 \cdot 73/3{,}6) \cdot (0{,}7 \cdot 0{,}92)/ 75 = 36 \text{ CV} = 26 \text{ kW}$$

Con turbina Pelton de eficiencia 82 %

$$(205 \,.\, 73/3{,}6) \,.\, (0{,}82 \,.\, 0{,}92)/ 75 = 42 \text{ CV} = 31 \text{ kW}$$

Las recuperaciones son pequeñas en ambos casos y pueden no ser rentables económicamente.

En cambio si la instalación fuera de 5 bastidores de 5.000 m^3/día cada uno, podríamos recoger el rechazo de cuatro de ellos y mediante un colector común conducirlo a una sola turbina que se acoplaría a la bomba del quinto.

Potencia recuperada:

Con bomba invertida de eficiencia 76 %

$$(205 \cdot 73 \cdot 4/3{,}6) \cdot (0{,}74 \cdot 0{,}92)/ 75 = 151 \text{ CV} = 111 \text{ kW}$$

Con turbina Pelton de eficiencia 83 %

$$(205 \cdot 73 \cdot 4/3{,}6) \cdot (0{,}83 \cdot 0{,}92)/ 75 = 169 \text{ CV} = 125 \text{ kW}$$

Es decir, que el quinto motor sería de 164 ó 150 kW.

9.14.4. Equipos para el lavado de membranas

Por muy buena que sea la toma de agua o por exhaustivos que sean los tratamientos, las membranas acaban ensuciándose y hay que proceder a su limpieza.

Es necesario, por tanto, proceder al diseño del equipo que permita recuperar los parámetros básicos del funcionamiento de la membranas y, dentro de estos, los dos aspectos principales son la capacidad del depósito para disolución de los productos y el cálculo de la capacidad de la bomba.

Cuando el bastidor es de una sola etapa, se lava lógicamente todo él de una vez, pero si tuviera dos etapas se puede optar por realizar el mismo etapa a etapa o todo él de una vez y estas circunstancias nos marcan la capacidad de la bomba.

El lavar cada etapa independientemente permite reducir la capacidad de la bomba y del depósito, pero el tiempo de lavado es el doble puesto que hasta que no se han lavado ambas, no se puede volver a poner en marcha el bastidor.

Si la toma de agua es en pozo y no hay contaminación se puede hacer el lavado de todas las etapas de una vez, mientras que si la toma es abierta o en zona contaminada es aconsejable realizar el lavado en tantas etapas como tenga el bastidor y el conjunto de lavado se calculará para la capacidad de la mayor de dichas etapas.

Respecto al depósito, debe tener suficiente capacidad para almacenar al menos el volumen de agua necesario para llenar todos los tubos de presión con sus correspondientes membranas y los circuitos hidráulicos que conducen el agua desde el depósito a las membranas y el retorno de éstas al anterior, y además el suficiente volumen de agua producto para poder disolver los productos que se emplean en el lavado.

Para el cálculo de dicho volumen se necesita conocer:

- El número de tubos de presión del bastidor, sean con membranas de arrollamiento en espiral o de fibra hueca.
- La longitud y el diámetro de las conducciones que forman el circuito que va a permitir la recirculación de los productos de lavado.
- La solubilidad y dosis de los productos a emplear.

El volumen aproximado en litros de los tubos que hay que llenar es:

CUADRO 22

Volumen de los tubos de presión

Nºmembranas/tubo	*8" diámetro*	*4" diámetro*
1	46	6
2	61	12
3	76	17
4	91	23
5	106	29
6	122	34
7	138	39

En el caso de las membranas de fibra hueca, como sus dimensiones son muy variables tanto en diámetro como en longitud, se calcula el volumen que tendría cada tubo vacío y se le resta un 30 % por el espacio que ocupan las membranas.

Respecto a los colectores se calculan por sus diámetros interiores y la longitud en función de su trazado.

Las dosis de productos a aplicar se toman de las recomendaciones de los fabricantes en cuanto a cantidades y porcentajes de concentración.

Para dimensionar los colectores se parte de los caudales que se deben aplicar para conseguir el efecto de barrido que se persigue y que de acuerdo con los distintos fabricantes de membranas está comprendido entre 5 y 9 m^3/h, por cada tubo de 8", y entre 0,5 y 2 m^3/h para tubos de 4". Algunos fabricantes recomiendan incluso que cuando el lavado se hace en dos etapas, se lave la primera que normalmente se ensucia menos con un caudal aproximadamente la mitad de los citados, reservando dichos caudales sólo para los tubos de la segunda etapa.

Las presiones normales que se utilizan en el lavado son de 3 a 4 kg/cm^2, debiéndose mantener velocidades entre 1,5 y 2 m/seg en las tuberías.

Las bombas tendrán en cuenta que el agua de lavado es normalmente el agua desalada, con un pH generalmente ácido y que además se deben hacer tanto lavados ácidos como básicos. Generalmente son de materiales plásticos o de acero inoxidable 316 y sus eficiencias en torno al 50-57 %. Al no ser bombas de funcionamiento continuo no tiene tanta trascendencia su eficiencia sino su seguridad y resistencia.

El equipo necesita un filtro para atrapar los productos de limpieza que no se hayan disuelto completamente en el depósito, que será también de 5 micras de poder separador, procurando siempre que se pueda que sea del mismo tamaño que los filtros de cartuchos de proceso para poder hacerlos intercambiables entre sí.

9.15. Otros aspectos del diseño

Por último se tendrán que tomar decisiones sobre los equipos para el tipo de pretratamientos y/o post-tratamientos que deben aplicarse y sobre los elementos de control a utilizar.

En cuanto al pretratamiento físico, las características del agua en función del tipo de toma prevista nos obligarán a prever una o más etapas de filtración multicapa, además de la obligatoria filtración de cartuchos, la necesidad de colocar un depósito de almacenamiento del agua a tratar que nos permita garantizar un suministro continuo y actúe como decantador, la colocación de un decantador diferenciado o cualquier otro sistema especial de filtración adecuado a la situación que se presenta.

Esto supone tener en cuenta unas pérdidas de carga adicionales que añadir a la impulsión de las bombas de toma de agua, que también como en el caso de las de alta presión se sobredimensionarán respecto al caudal.

Las bombas de la toma de agua son las segundas en importancia dado que tienen que impulsar los volúmenes mayores, que corresponden como en el caso de las bombas de alta presión al total de agua bruta.

La elección de la bomba de la captación se decantará siempre que sea posible por las bombas de desarrollo horizontal, más eficientes y fáciles de mantener.

En casos de tomas con varios pozos de pequeño diámetro se elegirán bombas sumergidas de velocidades medias, 1.500 rpm, más seguras en su funcionamiento y de mayor eficiencia que las bombas sumergidas normales de 3.000 rpm, pero también más caras.

Este sobrecoste queda sin embargo justificado suficientemente en las instalaciones medianas a grandes, a partir de 10.000 m^3/día y especialmente en el caso de plantas de agua de mar en que cualquier reducción del consumo energético es importante.

Si los filtros a utilizar son abiertos, como se requiere un bombeo intermedio del agua filtrada, las bombas de la toma serán de una altura de impulsión pequeña, en general muy próxima al desnivel existente entre la solera en que se colocan dichas bombas y la cota superior que marca la entrada a dichos filtros.

Las pérdidas de carga que se producen en estos filtros no deben ser tenidas en cuenta para el dimensionado de las citadas bombas.

Cuando por el contrario los filtros son cerrados, las bombas de la toma de agua deben proporcionar el caudal necesario y a la presión necesaria para que en las peores condiciones de funcionamiento exista una presión mínima entre 0,8 y 1,2 kg/cm^2 en la aspiración de las bombas de alta presión.

En consecuencia la presión de impulsión de las bombas de la toma debe ser la suficiente para superar no sólo las pérdidas de carga en las tuberías y válvulas, sino las más importantes que se producen en las diferentes etapas de filtración, tanto de arenas como de cartuchos.

Considerando conveniente el lavado de filtros de arena para unas pérdidas de carga máximas de 0,7-0,8 kg/cm^2 y el de filtros de cartuchos de 1 kg/cm^2, son normales presiones de impulsión en las bombas de la toma de 5 kg/cm^2, y hasta 7 kg/cm^2 cuando se instala una doble etapa de filtros de arena, de cartuchos o de precapa.

Otro aspecto a considerar es el lavado de los correspondientes filtros de arena, que requerirá determinados caudales que deberán suministrarse sin tener que parar toda la instalación.

Teniendo en cuenta las ventajas que supone uniformizar los equipos utilizando el mayor número posible de bombas iguales, no sólo para reducir el número de repuestos, sino también para ser utilizadas como reserva de otras, hay que considerar si la capacidad de las bombas de la toma es suficiente para atender al citado lavado periódicamente o si se requieren equipos específicos para ello.

En este segundo caso puede ser conveniente modificar el tamaño de los filtros para poder utilizar las mismas bombas en lavado de filtros y en impulsión del agua de alimentación.

En las instalaciones importantes siempre es necesario disponer de una bomba de reserva en cada uno de los servicios importantes y tanto la toma de agua como el lavado de los filtros lo son. Por tanto, si las bombas para uno y otro servicio son de distintas características, se necesitará una bomba de reserva para cada uno de ellos, mientras que si son iguales, es necesario una sola bomba de reserva común a ambos.

Cuando los filtros son abiertos, las bombas de transferencia son las que hacen las funciones de las de la toma y deben alcanzar las presiones ya citadas, por lo que se pueden hacer las mismas consideraciones respecto a las bombas de reserva.

En este caso las bombas son siempre centrífugas horizontales de una sola etapa y con eficiencias no tan elevadas como las citadas anteriormente. Para estas bombas, en el caso de instalaciones de agua de mar puede estar justificada la utilización de bombas de materiales plásticos.

Dichos equipos, al trabajar con materiales que se dilatan en determinadas condiciones, deben tener unas holguras importantes entre los impulsores y el cuerpo, lo que determina unos rendimientos menores.

Sin embargo estos materiales son muy resistentes a la corrosión, tanto por agua de mar como por los distintos reactivos que se emplean en el proceso, y teniendo en cuenta que en el depósito de agua filtrada se realizan a veces fuertes desinfecciones, muy superiores a las que se dan en condiciones normales, las citadas bombas resultan muy convenientes.

Por último las bombas auxiliares que se utilizan en el proceso son menos importantes puesto que su funcionamiento no suele ser continuo. Tiene por tanto menor importancia la eficiencia y lo que se trata es de buscar equipos compactos, seguros, de precio no muy alto y resistentes a los líquidos o productos que han de manejar. En la mayoría de los casos se emplean bombas centrífugas aspirantes, siendo frecuente su construcción en materiales plásticos.

9.15.1. Variadores de velocidad

Son equipos que actúan sobre la frecuencia eléctrica, produciendo variaciones en la velocidad de rotación de las bombas y motores. Como resultado de dicho cambio, las bombas suministran una menor presión y el consumo eléctrico del correspondiente motor es menor.

Como el equipo que tiene mayores fluctuaciones en la presión es el de alta presión, ya que en el caso de instalaciones de agua de mar pueden existir variaciones de 6-9 kg/cm^2 según que las membranas sean nuevas y estén o no limpias, y 3-5 kg/cm^2 con aguas salobres, es aquí donde se consigue el mayor ahorro energético.

Para lograr este propósito el variador, en el caso de instalaciones pequeñas, se puede incorporar a la bomba de alta presión. Sin embargo, en instalaciones de mayor capacidad y bombas de alta presión para agua de mar, como los motores de estas son de muy elevada potencia, resultan muy caros.

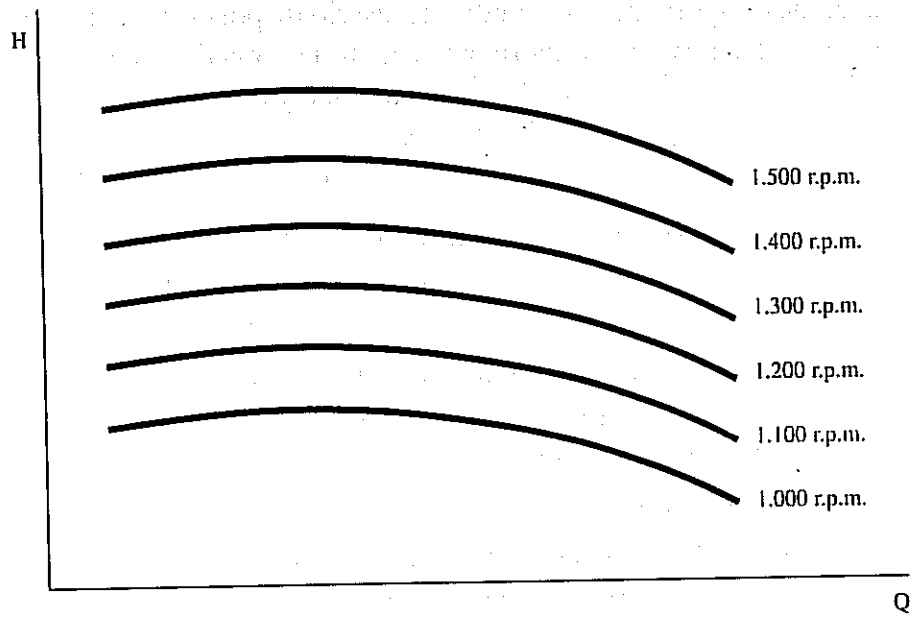


Figura 9.12. Influencia del variador de velocidad en la presión de impulsión de la bomba.

Por ello es más frecuente utilizar los variadores para las bombas que suministran la presión a la aspiración de las turbobombas, es decir, para las de la toma o para las de transferencia.

Con esta disposición lo que se hace es aumentar la presión en la aspiración de las turbobombas a medida que el bastidor va necesitando presiones de alimentación superiores. Pero asimismo se consigue absorber con el variador las pérdidas de carga de los filtros.

Es importante tener en cuenta que cuando en la instalación existen equipos de recuperación de energía del tipo bomba invertida o Francis, la optimización del

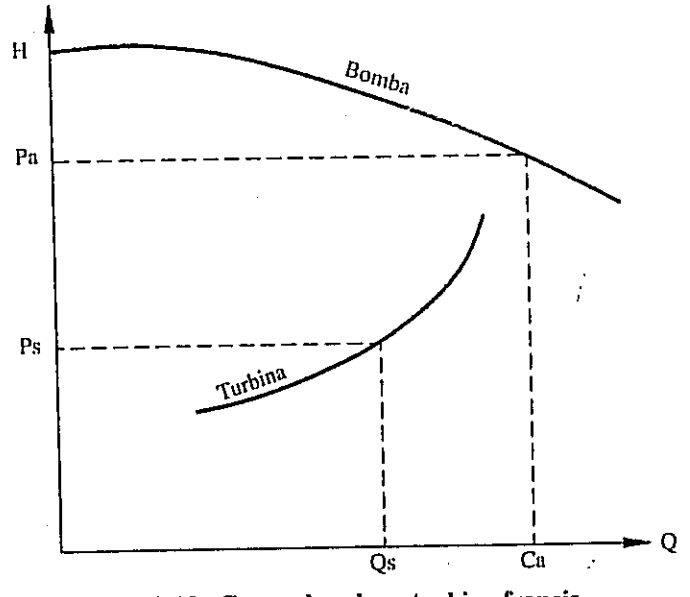


Figura 9.13. Curvas bomba y turbina francis.

funcionamiento del conjunto bomba-turbina se consigue sobre todo por regulación del caudal y presión de alimentación a la turbina.

Para la selección de dichos equipos es muy importante analizar las curvas de la bomba y la turbina sobre un mismo sistema de ejes para poder determinar, en función de las pérdidas de carga que se producen en los tubos de presión, los puntos óptimos de funcionamiento de ambas.

En consecuencia, el variador de velocidad se utiliza no tanto para fijar las condiciones de alimentación a la bomba cuanto las de alimentación a la turbina, una vez que se han producido las pérdidas de carga en las membranas.

9.15.2. Utilización de membranas distintas

Las constantes mejoras que se están produciendo en el campo de las membranas ha llevado al desarrollo de una gran variedad de ellas que se adaptan a condiciones muy variables, y que por tanto tienen también aplicaciones muy concretas.

Tratando de mejorar u optimizar el rendimiento de las instalaciones se están utilizando cada vez más frecuentemente membranas distintas, colocadas en pasos o etapas sucesivas.

Aunque las que entran más frecuentemente en este tipo de combinaciones son las de nanofiltración y las de agua de mar de altísimo rechazo, caben otras posibles opciones.

La combinación más frecuente hace unos años era aquélla en que tras una etapa con membranas de agua de mar, se utilizaba una segunda etapa en la que se volvía a procesar el producto mediante membranas de agua salobre (etapas de producto). Correspondía a unos años en que las membranas de agua de mar no eran suficientemente selectivas, con rechazos de sales del 99 al 99,2 % y que por tanto difícilmente conseguían salinidades inferiores a 500 ppm en un solo paso.

La mejora de la calidad de dichas membranas hasta rechazos del 99,4-99,5 % permitió conseguir dichas salinidades en un solo paso y llevó a la desaparición de este segundo paso con membranas de agua salobre.

Sin embargo, las exigencias cada vez mayores de los usuarios en cuanto a calidad del agua han vuelto a poner en uso estos sistemas en años recientes, aunque con otros fines.

Por una parte las actuales membranas de agua de mar consiguen salinidades del agua producto inferiores a 500 ppm en un solo paso, en consonancia con todas las normas o reglamentos en vigor, pero sin embargo ya en algunos lugares las exigencias de los usuarios rebajan dicha salinidad hasta 200-300 ppm, por lo que para conseguir dichos valores se requiere con determinadas aguas un segundo paso, aunque generalmente no del total del volumen de producto sino sólo de una parte del mismo. De esta forma, con un segundo bastidor que podríamos denominar de

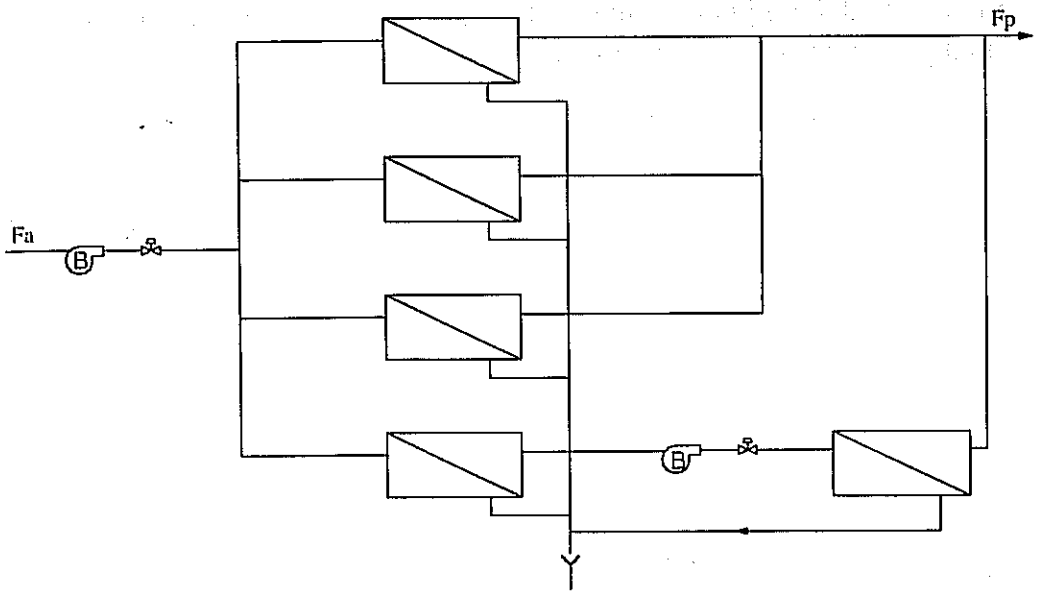


Figura 9.14. Esquema de instalación con etapa de afino.

afino y de menor capacidad que el principal, que solamente trataría una parte de la producción, se responde a las citadas exigencias (ver figura 9.14).

Pero este segundo bastidor tiene o puede tener un segundo efecto adicional digno de consideración y es la prolongación de la vida útil de las membranas del primer paso.

Con el uso, las membranas pierden parte de sus características y dan un producto de salinidad más elevada, lo que obliga en un momento dado a sustituirlas, para mantener la calidad exigida inicialmente a la instalación. Esta sustitución se realiza en proporciones que pueden variar según los casos entre el 4 y el 12 % del total.

Si disponemos de un segundo paso podemos utilizarlo para mejorar la calidad obtenida en el primero y evitar el cambio de membranas. Una evaluación del coste del cambio de membranas frente a los costes de este segundo paso tanto en inversión, como en energía, que suele ser de 0,3 a 0,5 kWh/m^3, nos decidirán por uno u otro tipo de solución.

Otra situación parecida se presenta en instalaciones de agua de mar de un solo paso pero dos etapas. En estas circunstancias y con recobros totales del 45 %, prácticamente el 75 % de la producción procede de la 1.ª etapa y el restante 25 % de la segunda.

Las calidades obtenidas en ambas etapas son también muy distintas y así pueden conseguirse fácilmente conductividades inferiores a 500 microsiemens/cm en la primera etapa y de 1.000 a 1.200 en la segunda.

A medida que envejecen las membranas aumenta la salinidad del producto y este incremento es superior en las membranas de la segunda etapa, que además de obligar al reemplazo más frecuente de las mismas, deteriora la calidad general del producto.

Las membranas de última generación y de rechazos superiores al 99,7 %, colocadas en la segunda etapa, permiten mejorar considerablemente su calidad, y consecuentemente la media de la instalación.

Esta disposición permite incluso aumentar la producción sin deterioro de la calidad puesto que se puede elevar la presión en la primera etapa, conscientes de que a la segunda llegará la salmuera a más presión, pero como las membranas de mayor rechazo precisan también presiones superiores, ello favorece el equilibrio interno del sistema.

Por último, en las instalaciones de agua salobre también se usan con frecuencia diferentes membranas en las distintas etapas del bastidor.

En aguas de salinidades medias se plantean frecuentemente dos opciones: la utilización de membranas de alto rechazo pero que funcionan a presiones medias, o la utilización de membranas de presiones más bajas pero de rechazos algo inferiores.

Como en estas instalaciones se necesitan dos o más etapas para alcanzar las elevadas conversiones del sistema, 75 % y superiores, se puede optar por una opción intermedia entre las dos citadas que consiste en utilizar las membranas de alto rechazo en la primera etapa y membranas de nanofiltración o de presión ultrabaja en las siguientes.

De esta forma se consigue incluso un mejor reparto de las producciones entre la primera y la segunda etapa y se abaratan los costes de funcionamiento.

9.16. Depósitos

También forman parte del diseño de la instalación los dos depósitos de agua producto, de regulación y de compensación, que se colocan en la planta, con fines completamente distintos, y el depósito intermedio cuando existe.

La capacidad de todos ellos debe ser convenientemente calculada de acuerdo con el papel que han de cumplir.

9.16.1. Depósito regulador

Las instalaciones de desalación importantes, especialmente las de agua de mar, no suelen estar situadas demasiado próximas a los puntos de consumo por lo que el agua producida debe ser impulsada a los depósitos principales de distribución.

Sin embargo, como el agua desalada sale de los bastidores a una presión generalmente inferior a 1 kg/cm^2, debe disponerse de un depósito en planta para desde él hacer el citado bombeo final.

Este depósito es de simple regulación y por tanto no se precisa de una gran capacidad, siendo suficiente que cubra la producción de la instalación durante 2 a 4

horas. Este tiempo se considera suficiente para atender contingencias imprevistas en las bombas de impulsión y permitir su reparación sin necesidad de tener que parar la instalación desaladora.

En algunas circunstancias, y dada la variación de las tarifas eléctricas a lo largo del día, puede ser conveniente estudiar un depósito de mayor capacidad que permita almacenar la producción de agua en horas de tarifas altas y su impulsión en las de menor precio.

El agua desalada entrará en el depósito regulador por su parte superior para que así al caer se produzca la reducción del CO_2 que generalmente contiene y que se ha producido en el pretratamiento ácido.

Si la entrada se hace por la parte inferior, se reduce la contrapresión del permeado y en consecuencia aumenta ligeramente el caudal de éste.

Esta solución, que puede ser utilizada en casos de escasez de agua, puede incrementar la producción en un 7-12 %, pero se requiere mantener el nivel del agua en el depósito de almacenamiento bastante bajo, para reducir la citada contrapresión.

Obliga por tanto a un bombeo de agua continuo, con todos los equipos disponibles, y los costes de la electricidad se pueden elevar.

9.16.2. Depósito antirretorno

En los casos en que se decida, su instalación debe contener suficiente agua producto para llenar todos los tubos de presión de que consta el bastidor, dejando empapadas las membranas y los circuitos de distribución del agua salada correspondiente; es decir, generalmente todas las tuberías de alta presión situadas entre la válvula de retención existente en la impulsión de la bomba de alta presión y el bastidor. El volumen de estos circuitos se calculará en función de los diámetros y longitudes de todos los colectores de distribución.

Respecto al volumen de los tubos de presión con sus correspondientes membranas ya se han dado en el apartado referente a los equipos de lavado las cifras de referencia.

9.16.3. Depósito intermedio

Aunque el bombeo directamente del agua captada hasta los bastidores, a través de filtros, es la solución más eficiente, en ocasiones puede ser conveniente la construcción de un depósito intermedio para garantizar un mejor funcionamiento de la instalación.

Este resulta especialmente necesario cuando la localización de la captación de agua está muy alejada de la instalación y por tanto su control es complicado,

o cuando la captación es mediante pozos que pueden sufrir oscilaciones importantes de caudal a lo largo del tiempo o incluso en breves períodos, cuando están directamente afectados por la acción de la infiltración del agua de lluvia o las mareas.

Dicho depósito permite un suministro continuo de agua a la alimentación de las correspondientes bombas y con pocas variaciones, lo que redunda en una mayor eficiencia en la utilización de las bombas, que habrán sido seleccionadas de acuerdo con esta circunstancia.

9.17. Equipos de dosificación

Todos ellos constan de dos o más bombas junto a los correspondientes filtros en su aspiración, válvulas de seguridad y depósitos para almacenamiento de productos.

La instalación de más de una bomba permite atender posibles roturas o reparaciones de una de ellas sin necesidad de parar el funcionamiento de la instalación, por lo que este montaje resulta imprescindible en las plantas grandes.

En las pequeñas y de funcionamiento discontinuo, por cuestiones de presupuesto, se suele emplear una sola bomba.

Los dos reactivos químicos de mayor consumo en la instalación son el hipoclorito sódico y el ácido sulfúrico, por lo que para ellos se utiliza un depósito que cubra las necesidades de la instalación durante 20 a 30 días, para evitar el transporte frecuente de productos peligrosos.

Se precisa, además, de una bomba de trasvase, dado que el suministro de estos productos se realiza mediante camión cisterna. Si las instalaciones son menores existen depósitos de 1 m^3 o incluso mucho menores, que suelen ser suministrados por los distribuidores de productos químicos.

Para los otros productos, coagulante, reductor o antiincrustante, se precisan generalmente de dos depósitos con objeto de preparar el producto en uno de ellos cuando se empieza a terminar el contenido en el otro depósito. De esta forma se consigue un suministro constante de producto fresco, lo que resulta importante en el caso del bisulfito sódico o el hexametafosfato sódico, que pierden propiedades con el tiempo.

La capacidad de las bombas debe calcularse teniendo en cuenta los siguientes aspectos:

— Contenido en principio activo del producto (riqueza).

— Suministro con cada bomba de la dosis total de la instalación.

— Variación de caudales de la bomba para poder suministrar según los casos las dosis necesarias para uno o más bastidores, según funcionen o no simultáneamente.

— Dosis a aplicar.

Para la selección de los depósitos para la preparación del producto que se va a dosificar, es necesario además conocer la solubilidad del mismo.

CAPITULO 10

OPERACION DE LA INSTALACION

10.1. Introducción

Una vez realizado el diseño, construida, y definitivamente realizado el montaje de los equipos de la planta desaladora es el momento de poner en marcha la instalación.

La comprobación del funcionamiento correcto de todos los elementos de la instalación es fundamental, por lo que antes de empezar a producir agua desalada hay que realizar una serie de operaciones de prueba y puesta a punto de la instalación.

Como las instalaciones de ósmosis son de unas características muy específicas y muchos equipos requieren materiales especiales, la mayoría de ellos no responde a los elementos de serie.

Este tipo de fabricación tan concreta requiere unas comprobaciones o inspecciones que pueden realizarse durante el proceso de fabricación, directamente o mediante las empresas especializadas correspondientes. Como este tipo de inspecciones suponen un incremento de costes, sólo es posible realizarlas en instalaciones de capacidades superiores a 1.000 m^3/día.

En las instalaciones pequeñas se debe al menos exigir al fabricante la documentación correspondiente a cada equipo.

Las primeras pruebas se realizan sobre todos los colectores del sistema, sean de alta o baja presión, para valorar que responden a las prestaciones que se les van a exigir.

Para ello se realizan pruebas hidráulicas, sometiendo a los distintos colectores a una vez y media la presión nominal de funcionamiento. En estas pruebas se divide la instalación, según las posibilidades de la misma, en tramos de distinta longi-

tud que se aislan y llenan de agua, aplicándoseles mediante una bomba de pistón la presión de prueba correspondiente.

Dicha presión debe mantenerse durante al menos 15 minutos sin variaciones para dar por válida la prueba. Una vez probados satisfactoriamente los circuitos hidráulicos se realiza la comprobación de los equipos mecánicos.

La instalación se compone de una serie de partes perfectamente diferenciadas, que deben ser ajustadas independientemente: toma de agua, pretratamientos, proceso e impulsión producto.

Como además el sentido de circulación del agua es el indicado por dichos sectores, no se podrá operar sobre uno de ellos sin previamente haber ajustado el anterior.

Realizadas las pruebas de puesta a punto de la instalación se realizan las pruebas de funcionamiento, en las que durante un período de funcionamiento ininterrumpido de 15 a 30 días se comprueba el cumplimiento de los parámetros básicos.

El objetivo final es obtener el caudal de producción, con la conductividad exigida y con el consumo energético específico previsto en el diseño.

Pero además a lo largo del tiempo se van produciendo algunos cambios en las variables de funcionamiento de la instalación que deben ser controladas, para lo cual es necesario conocer el papel que juegan en el proceso los elementos más importantes del sistema para poder actuar sobre ellos y garantizar la operación con regularidad de la planta.

10.2. Puesta en marcha de la instalación

Es la prueba real de la instalación y en ella hay que empezar por la comprobación de la *bomba o bombas de la captación de agua.*

Cuando las bombas no son del tipo sumergido se precisa un equipo de vacío para el cebado. En muchas ocasiones ésta es la parte que crea más problemas, especialmente cuando existe un único equipo para un conjunto de bombas, pues son fáciles las fugas de aire a través de los colectores y accesorios de unión.

El fallo del equipo de vacío impide el arranque de las bombas y está ligado generalmente a pérdidas en la red, que por tanto deberá ser concienzudamente examinada. El arranque de las bombas, cuando existen más de una, se hará primero individualmente y posteriormente de forma escalonada.

En cada prueba individual la bomba se tendrá en funcionamiento al menos dos horas de forma ininterrumpida. Al cabo de este tiempo se parará la bomba probada y se pondrá en marcha la siguiente.

Una vez que se han arrancado las bombas una a una, se hará una comprobación conjunta de todas las bombas que deben funcionar simultáneamente. La prueba simultánea de estas bombas se prolongará durante al menos 24 horas.

El arranque de cada bomba, del tipo centrífugo, se hará siempre con la válvula de mariposa situada en la impulsión cerrada, y una vez arrancada se irá abriendo lentamente, de forma manual o desde el centro de control si la planta está automatizada.

De esta forma se puede comprobar la intensidad consumida por el motor y si responde al diseño efectuado, a la vez que se comprueba la disponibilidad de potencia en el sistema, especialmente frente a los picos del arranque.

Este es también el momento de ajustar la carrera o porcentaje de apertura de estas válvulas. La apertura a válvula completamente abierta produciría un consumo excesivo del motor que podría incluso provocar daños al mismo.

En esta fase se comprueba además la resistencia de los colectores de agua de alimentación y las soldaduras que se hayan efectuado. Teniendo en cuenta que en la mayoría de los casos estos son de materiales plásticos, PVC ó PRFV, esta prueba dinámica es fundamental, pues en ocasiones habiéndose realizado pruebas hidráulicas estáticas de forma satisfactoria, la tubería puede romper por propios fallos de las uniones, por defectos en la soportación, o incluso por vibraciones producidas en el arranque.

Se comprueba también la eficacia del calderín antiariete, que suele colocarse si el desnivel entre la captación de agua y los filtros del pretratamiento, situados generalmente al nivel de la planta, es superior a los 8 metros.

Cuando no se dispone de este calderín hay que tener en cuenta que la válvula de retención existente a la salida de cada bomba soportará el peso de la columna líquida en cada parada.

Para disminuir esta carga dinámica sobre las citadas válvulas, se puede ralentizar el cierre de las mismas mediante el automatismo correspondiente o, si la distancia entre la captación y la instalación es grande, mediante otra válvula de retención que divida el recorrido.

Durante todas estas pruebas el agua impulsada debe ser eliminada antes de pasar por los filtros, por lo que si no existe una tubería de by-pass de estos hacia el drenaje, habrá que soltar alguna de las uniones embridadas del colector para dar salida al agua. De esta forma se consigue también limpiar el colector de elementos extraños que se hayan podido introducir en las tuberías durante su transporte y montaje.

10.2.1. Depósito intermedio

Cuando en la instalación existe un depósito para regular el suministro de agua procedente de la toma, se aprovecha la puesta en marcha de las primeras bombas pa-

ra realizar el llenado y limpieza del mismo y posteriormente su desinfección, para lo cual debe mantenerse una dosis alta de cloro libre (unos 5 ppm) durante 24 horas.

Pasado este tiempo se vacía el depósito, se limpia y si es necesario se neutraliza con bisulfito sódico.

En esta fase se comprueba y regula la situación de los niveles, cuya respuesta habrá sido simulada con anterioridad, si en la instalación existe un sistema de control automático.

En el caso de que la toma de agua se realice mediante una batería de pozos con bombas sumergibles, es el momento, a falta de medidores de caudal en cada una de las bombas, de la comprobación aunque sea aproximada de los caudales de cada una de ellas. Para ello y con la ayuda de cronómetros se miden los niveles del depósito funcionando las bombas, primero individualmente y posteriormente en conjunto.

10.2.2. Bombas de transferencia

Como realizan la misma misión de las bombas de la toma, en su puesta en marcha se siguen los mismos pasos que se han llevado a cabo en las anteriores.

Si las bombas tienen contadores eléctricos separados de las restantes bombas de la instalación se miden los consumos, en caso contrario las determinaciones se hacen de forma indirecta midiendo las intensidades de los motores.

10.2.3. Comprobación y ajuste del pretratamiento

Pretratamiento físico

Terminada la fase anterior, se introduce el agua en los filtros multicapa siguiendo pautas similares.

Al igual que en el caso anterior es necesario disponer de un colector de drenaje, y como en muchas instalaciones éste se encuentra después de los filtros de cartuchos y antes de las bombas de alta presión, se puede circular el agua por los filtros de cartuchos antes de la colocación de estos.

A continuación se comprueba el funcionamiento del equipo de aire y agua para el lavado de filtros, regulando las válvulas correspondientes para ajustar los caudales y las presiones de diseño previstas en el proyecto.

Se lavan también de esta forma los materiales filtrantes de los productos extraños que han podido recoger durante su manipulación.

También resulta conveniente la desinfección de los materiales filtrantes, que al igual que en otros casos se realiza con hipoclorito sódico en las dosis ya citadas.

Como los filtros multicapa tienen un complejo sistema de válvulas y colectores de entrada y salida de agua y aire, se comprueba la perfecta colocación de cada

una de dichas válvulas y, si el sistema es automático, la correcta transmisión de las señales eléctricas hasta el centro de control, así como el funcionamiento de los finales de carrera de las válvulas y el sentido de apertura y cierre de éstas, en sus cabezales hidráulicos.

Dada la importancia que tiene realizar un correcto lavado de los filtros, es el momento de establecer las secuencias de entrada y salida del aire y agua y los tiempos de duración de cada una de éstas, así como el funcionamiento de los niveles a los que ascenderá el agua por encima del material filtrante.

Si el funcionamiento es manual hay que entrenar a los operarios sobre la forma de realizar estas operaciones, mientras que si es automático se deberán establecer las necesarias correcciones en el software general del equipo. Es por tanto una etapa o fase lenta que requiere especiales cuidados.

Como en esta fase se han limpiado los colectores hasta la aspiración de las bombas de alta presión, a continuación pueden ya instalarse los distintos cartuchos componentes de los filtros.

Si existieran más de una etapa de filtración multicapa, las mismas pruebas se extenderían a los demás filtros y también se haría lo mismo para los filtros de precapa o nuevas etapas de cartuchos si existieran. Con todo este sistema hidráulico en funcionamiento se pasa a continuación al pretratamiento químico.

Pretratamiento químico

La puesta a punto se realiza en dos fases; en la primera se comprueba el correcto funcionamiento de todas las bombas dosificadoras, elementos de control como niveles, válvulas, medidores, variadores de frecuencia, etc., así como el ajuste de los restantes instrumentos, pH-metros, conductivímetros, medidores redox, manómetros, y las señales de alarma o parada correspondientes.

En la segunda se procede al ajuste de las dosificaciones de acuerdo con el agua realmente disponible.

Se empieza lógicamente por la desinfección y, tras la aplicación de diversas dosis y el análisis correspondiente del agua tratada para comprobar su respuesta, se pasa a los restantes tratamientos como regulación de pH, coagulación, reducción y estabilización.

Los variadores de frecuencia de los distintos equipos de dosificación deberán quedar perfectamente ajustados.

También en estas pruebas es el momento para ensayar distintos productos químicos para conseguir el funcionamiento óptimo de la instalación.

Se requiere por tanto un laboratorio de análisis para la comprobación de todos los resultados.

Una vez ajustados todos los pretratamientos y comprobados todos los elementos de seguridad de la instalación, se mantiene funcionando en estas condiciones durante varios días el sistema.

Es importante realizar durante este tiempo alguna parada periódica de toda la instalación para entrenar a los operarios en el nuevo reajuste que habrá que realizar, cuando por cualquier circunstancia se produzca una parada fortuita de la instalación durante el funcionamiento normal de la misma, o cuando también de forma fortuita cambien las características del agua de alimentación a la planta.

Es importante familiarizarse con el ajuste de las dosificaciones en las instalaciones que disponen de varios bastidores de membranas, pues como los lavados o interrupciones se producen periódicamente, a cada incidencia de este tipo hay que volver a ajustar las dosificaciones de acuerdo con el caudal de operación de la instalación.

Durante todas estas fases desarrolladas hasta ahora el agua bombeada desde la captación ha sido desviada a través de la tubería provista de una válvula de drenaje, que como se comprende resulta imprescindible en todas las instalaciones de una cierta importancia.

Permite además que al producirse cualquier parada accidental o programada de un bastidor por un tiempo reducido, no sea necesario parar completamente la instalación, que daría lugar a nuevos ajustes del pretratamiento en sucesivos arranques.

Cuando en las instalaciones existe el proceso de cloración-decloración, es importante la regulación del medidor de potencial Redox, que es el único elemento de protección de las membranas de poliamida frente a un exceso de cloro libre en el agua de alimentación.

También se harán sucesivas tomas de muestras para determinación del indice SDI y comprobar que la eficiencia de la filtración es tal que permite obtener valores de éste inferiores a 5. En caso contrario habría que mejorar el proceso de coagulación, con el ensayo de otros productos, primeramente en el laboratorio mediante la realización de jar-tests y posteriormente in situ.

En casos extremos habría que realizar el cambio del material filtrante o la colocación de nuevas capas.

Proceso

El verdadero corazón de la instalación está constituido por las turbobombas de alta presión y los bastidores con las membranas de ósmosis.

Desde el momento en que se arranca la bomba de alta presión empieza a entrar agua a los bastidores y por tanto a producirse agua desalada.

Es imprescindible de nuevo, antes de este arranque, comprobar la inexistencia de cloro libre después de los filtros de cartuchos, en el caso de que las membranas de ósmosis que se utilizan sean de poliamida.

Como las bombas de alta presión necesitan una presión mínima de succión o aspiración, tienen en su aspiración un presostato de baja presión y/o un transmisor de baja presión que habrá que regular de acuerdo con la presión disponible en el sistema.

Dado que el arranque de las bombas de alta presión se hace de una en una, para esta primera fase del arranque se regula dicho instrumento por encima de la presión necesaria y posteriormente y una vez que toda la instalación esté funcionando correctamente se realiza el ajuste definitivo, aunque es posible que a lo largo del funcionamiento de la planta sea conveniente realizar más de un ajuste.

Las presiones disponibles siempre estarán en función de las pérdidas de carga que se produzcan en los distintos filtros del sistema, que lógicamente al arrancar la instalación están completamente limpios, pero que a lo largo de su funcionamiento van adquiriendo una pérdida de carga permanente que se incrementa con el paso del tiempo, por el correspondiente ensuciamiento.

Antes de arrancar las bombas de alta presión, se habrán puesto a funcionar cada uno de sus motores en vacío durante algunas horas para comprobar el sentido de giro. Posteriormente se realiza el acoplamiento de bombas y motores, y su alineación y equilibrado.

Llegado el momento del verdadero arranque de la instalación se hará siempre con la válvula de control cerrada, para ir abriéndola lentamente, sin embargo la forma de operar es distinta según de disponga de bomba-turbina invertida con o sin embrague, o de turbina Pelton.

Durante esta fase que se realiza bastidor a bastidor, primero individualmente durante al menos 8-12 horas y posteriormente de forma escalonada hasta que todos estén funcionando simultáneamente, se ajustan los tiempos y porcentajes de apertura de la correspondiente válvula de control.

En los siguientes dibujos se indican los sistemas de arranque de uno y otro tipo de equipos, en función del elemento de recuperación de energía disponible.

Bomba alta presión-bomba invertida sin embrague

Cuando las turbobombas son de gran capacidad, la utilización del embrague para embalar la turbina es problemático y se pueden producir averías importantes.

En tales casos puede prescindirse del embrague y se realiza el arranque mediante una tubería de alta presión de by-pass, que conecta la impulsión de la bomba de alta presión con el retorno de la salmuera a la turbina, es decir, con la tubería de impulsión de la bomba invertida que actúa como turbina. En esta tubería se intercala una válvula para regular el paso de flujo.

Además la turbina debe llevar una válvula de by-pass provista de placa de orificio, para la regulación de la conversión.

Tanto en la aspiración de la bomba de alta presión como en la impulsión de la misma se colocan sendas válvulas motorizadas. La de la aspiración, de baja presión, de mariposa; la de impulsión, de alta presión, que actúa de control y con mecanismo que permita su apertura gradual.

La secuencia de arranque se realiza de la siguiente forma, partiendo de la posición inicial en que todas las válvulas están cerradas:

— Manteniendo cerrada la válvula de control de alimentación a membranas, Se abre la válvula de by-pass de alimentación a la turbina a un 15-20 % y se cierra la válvula de by-pass de la turbina para que reciba todo el caudal y alcance cuanto antes su situación de régimen.

- A continuación se abre la válvula de aspiración de la bomba de alta presión y se arranca ésta, desviándose todo el caudal a la turbina.
- Se continúa con la apertura de la válvula de by-pass hasta que un 80 % del caudal pasa a su través. Se tarda unos 3-5 segundos en llegar a este punto, que es el momento en que la turbina toma su velocidad de régimen.
- Pasados unos segundos se comienza la apertura de la válvula de alimentación al bastidor (control) hasta un 20%.
- Se prosigue abriendo la válvula de control hasta un 30-35 % alcanzando la presión de entrada a bastidores unos 55-58 kg/cm^2 en el caso del agua de mar o valores 4-5 kg/cm^2 inferiores a los de operación en el caso de instalaciones de agua salobre.
- En ese momento se empieza a producir un pequeño caudal de agua desalada y se inicia el cierre lento de la válvula de by-pass hasta que toda el agua de alimentación es impulsada hacia la válvula de control.

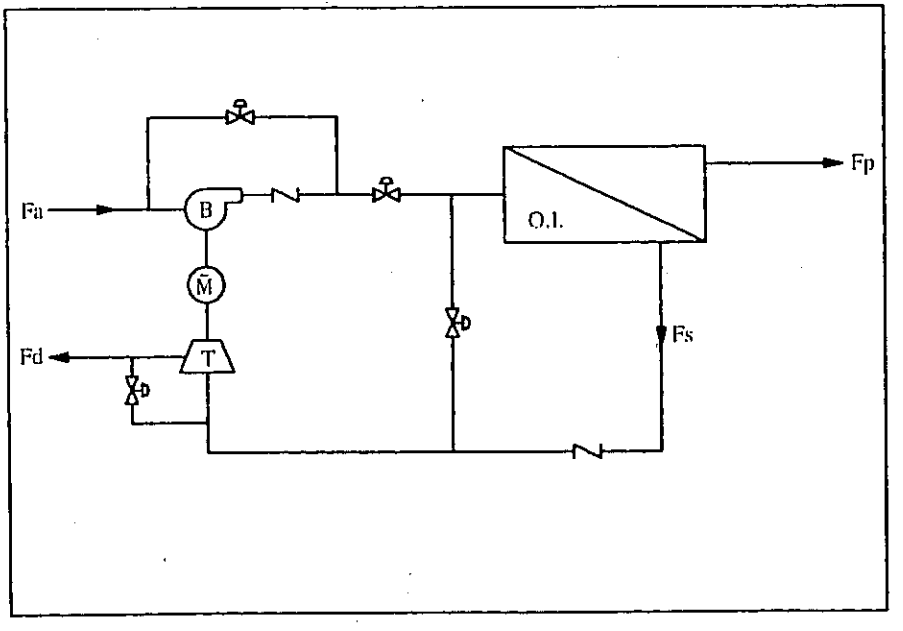


Figura 10.1. Arranque turbobombas con by-pass.

- Se continúa la apertura de la válvula de control hasta que se alcanza la presión de régimen, que estará según el estado de la limpieza de las membranas entre 60 y 65 kg/cm².
- Finalmente se regula la válvula de by-pass a turbina.

Todo este proceso tiene una duración de entre tres y cinco minutos y se requiere además una válvula de retención a la salida de la salmuera del bastidor para evitar el retorno del agua a tratar durante el by-pass de arranque.

Como normalmente en instalaciones de este tamaño se dispone de un sistema de control con lazos de regulación, la secuencia de arranque que conviene iniciar manualmente, desde el momento que se inicia la apertura de la válvula de control se pasa a la posición de automático realizándose el proceso de forma secuencial.

Turbobomba con embrague o turbina Pelton

Cuando se dispone de embrague para la bomba-turbina invertida o se trata de una turbina Pelton no es necesaria esta tubería de by-pass, impulsando directamente la bomba de alta presión el agua al bastidor, y desde el momento en que se empieza a producir salmuera ésta va a las turbinas, aumentando paulatinamente su velocidad hasta que el sistema entra en régimen.

Superada esta primera fase, se empieza a aumentar la presión de alimentación al bastidor, hasta conseguir un caudal entre un 10-20 % inferior al nominal y se mantiene así durante algunas horas.

En este tiempo se aprovecha para comprobar el funcionamiento de todos los instrumentos de control del proceso.

Normalmente durante el arranque se producen fugas por distintos lugares del bastidor, tanto en alta como en baja presión, pues ésta es la parte de la instalación con más conexiones. Si las fugas no son exageradas no se actuará sobre ellas, hasta que al cabo de unas horas se proceda a parar el bastidor.

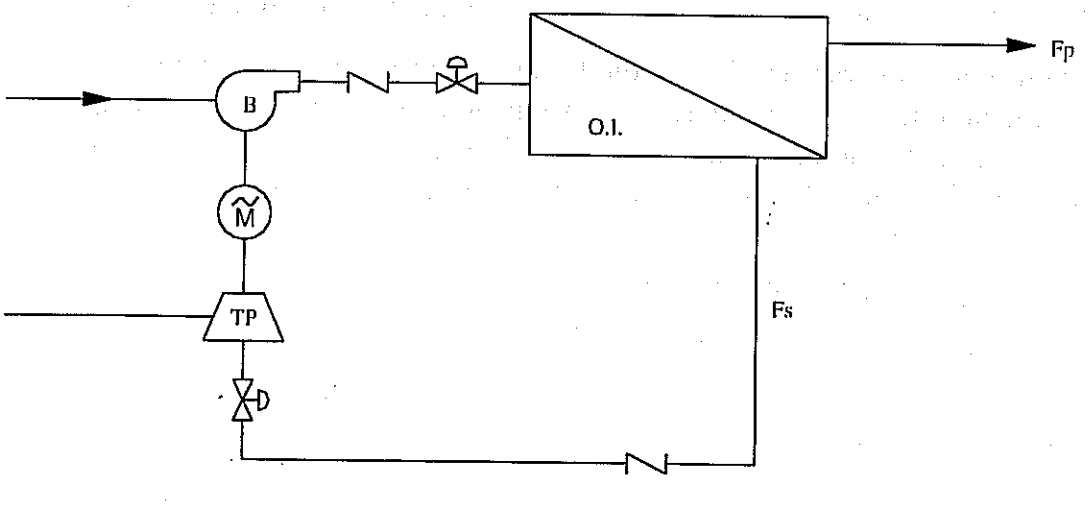


Figura 10.2. Arranque con turbina Pelton.

Las fugas del bastidor son más frecuentes en la parte de baja presión que en la de alta, pues en esta última generalmente se utilizan conexiones del tipo «victaulic», que son muy seguras y estancas, o soldaduras.

En los grandes colectores de alta presión tampoco son frecuentes las fugas, aunque pueden presentarse aisladamente en los puntos en que se colocan algunos instrumentos y llaves de aislamiento de éstos.

También se pueden detectar fugas, en el caso de las membranas de arrollamiento en espiral, en el acoplamiento de las membranas en el interior de los tubos de presión, mediante los interconectores, o si existieran membranas defectuosas, aunque este caso sea menos frecuente, ya que todas han sido probadas anteriormente en fábrica.

Este tipo de fugas se comprueba por la alta salinidad que puede tener un bastidor en el arranque, lo que es anormal al ser las membranas nuevas.

Una vez detectadas es fácil comprobar el tubo de presión que produce la fuga, puesto que en los bastidores de una cierta importancia existen tomas de muestra en cada tubo de presión.

Si no disponen de estos hay que abrir cada tubo por el lado de la baja presión y analizar con un conductivímetro la calidad del permeado.

En la parada que hay que hacer del bastidor se aprovecha no solo para corregir las fugas de agua externas, en los accesorios de conexión, sino también las interiores al tubo de presión, posiblemente en los interconectores.

Una vez corregidas todas ellas se vuelve a poner en marcha el bastidor y se le hace funcionar de forma continuada durante 24 ó 48 horas, al cabo de las cuales se desplaza el agua del bastidor y equipos de alta presión, se preservan las membranas en conservante (bisulfito sódico) y se pasa a la comprobación de los restantes bastidores de que conste la instalación, de forma individual.

Cuando ya están todos los bastidores comprobados se pone en funcionamiento toda la planta para comprobar la producción y conductividad nominal media total.

Esta forma de operar permite no solo hacer la contratación de la potencia eléctrica en función de las necesidades de la instalación, sino evitar el movimiento de personal en la carga de membranas de un bastidor cuando los otros están en funcionamiento, dado que el riesgo de fugas en los primeros momentos de funcionamiento son mayores.

El comportamiento inicial de cada bastidor de la instalación puede ser distinto del previsto, por lo que es necesario seguir unas determinadas pautas para estar seguro que todas las operaciones se han realizado correctamente.

Las membranas tardan un cierto tiempo en estabilizarse en su funcionamiento, dando salinidades iniciales superiores a las previstas. Asimismo las presiones y caudales experimentan oscilaciones, pero posteriormente, entre 4 y 8 días, la sali-

nidad mejora y los restantes parámetros se van acercando a las condiciones normales de funcionamiento previstas en el diseño. Por tanto no deben producirse alarmas por ese comportamiento inicial.

Dicha anomalía se debe generalmente al tiempo transcurrido desde que fueron fabricadas y a su conservación durante el mismo en productos químicos, fundamentalmente bisulfito sódico, del que quedan impregnadas.

Al arrancar la planta por primera vez conviene hacerlo con una presión lo más baja posible y con una conversión ligeramente inferior a la proyectada.

En estas condiciones el caudal que se obtiene es inferior al de diseño y la conductividad eléctrica superior. Con el paso de las horas la planta va estabilizándose en los valores adecuados.

Durante estas primeras horas de funcionamiento de la instalación, el permeado se tira a drenaje para evitar que pueda arrastrarse alguno de los productos que han sido utilizados en las diversas fases del proceso de producción de membranas, y que han quedado adheridos a las mismas.

La estabilización de las membranas se suele producir durante el período de 72 horas siguiente a la puesta en marcha de la instalación, aunque a veces puede durar hasta 7 ó 10 días.

Esa estabilización consiste en alcanzar las condiciones de producción y calidad a una presión igual o inferior a la proyectada, de una manera continua.

Se pueden calcular los parámetros normalizados de operación de cada bastidor de la instalación, en base a los datos de funcionamiento en dicho momento.

La normalización tiene por fin la comprobación real del funcionamiento de las membranas al cambiar las condiciones de aplicabilidad de las mismas, requiriéndose disponer del programa de proyecciones de la membrana específica que se ha instalado.

También hay que referir que la comprobación del funcionamiento de los equipos de lavado de membranas y de desplazamiento de agua deben realizarse antes del arranque de las turbobombas.

Por último se realiza la comprobación final del funcionamiento de *los equipos de impulsión del producto* y de los niveles del depósito correspondiente, que son más sencillos y similares a otros anteriormente citados.

Durante esta fase son frecuentes en las instalaciones muy automatizadas las alarmas o paradas de bombas como consecuencia del desajuste de los elementos de control, que son bastante sensibles como los presostatos o medidores de redox, o por la interferencia entre los cables de potencia y de control, si están colocados muy cerca unos de otros.

10.3. Válvulas de control del sistema

Hay dos válvulas fundamentales que son las que dirigen el funcionamiento del sistema: la válvula de control de la alimentación y la válvula de salmuera.

La *válvula de control* se coloca a la salida de la impulsión de la bomba de alta presión y por tanto antes del bastidor de ósmosis. Su papel es la regulación de la presión de alimentación a las membranas.

Como la bomba de alta presión se elige para un caudal igual al de diseño aumentado en un 5-10 %, y para una presión equivalente a la máxima presión de alimentación a las membranas, la presión de descarga de la bomba es siempre bastante más elevada, que la que se precisa cuando la instalación se pone en marcha por primera vez, o cuando las membranas están limpias.

Con la citada válvula se introduce por tanto una pérdida de carga en el colector de alimentación a membranas para conseguir adecuar la presión a las necesidades de cada momento. Por tanto en la válvula de control se pueden perder según los casos de 5 a 10 kg/cm^2. Se comprende por tanto la importancia de realizar un buen diseño, puesto que posteriormente no resulta posible corregir esas elevadas pérdidas de carga, que en definitiva no son sino incremento de costes de funcionamiento.

A medida que vamos abriendo esta válvula va disminuyendo esa pérdida de carga y aumentando la presión de alimentación a las membranas.

Aunque en teoría, si no hay variación en ninguno de los parámetros de funcionamiento de la instalación, a mayor presión correspondería un mayor caudal de producto, también se produce un aumento de la compactación y un más rápido ensuciamiento de las membranas.

En la práctica, la apertura de válvula y por tanto la elevación de la presión, se realiza para equilibrar esos efectos que se producen como consecuencia del uso de la instalación y para compensar la pérdida de caudal producido.

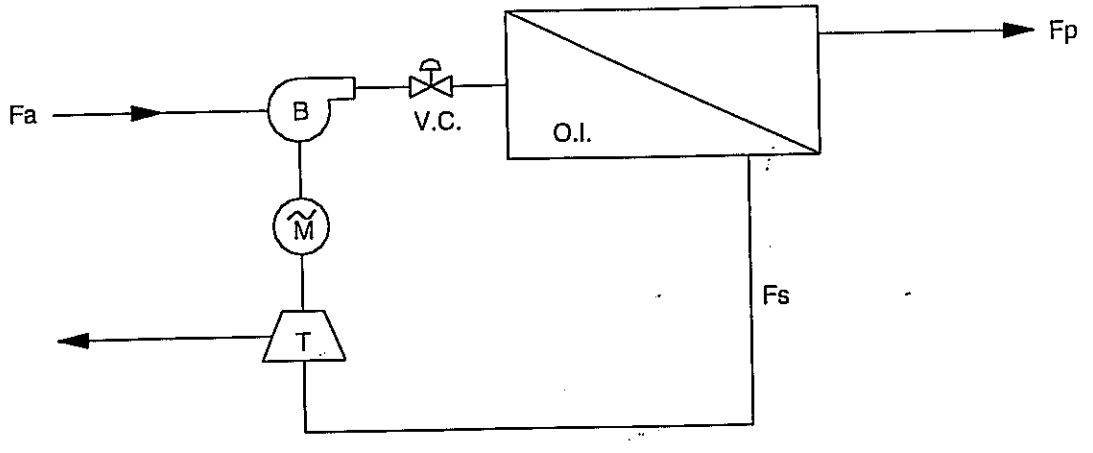


Figura 10.3. Situación de la válvula de control.

La *válvula de salmuera* es la que regula la conversión de la instalación, pero su colocación tiene bastante que ver con el tipo de instalación de que se trate.

En las pequeñas instalaciones de agua salobre se coloca en la tubería de alta presión de salida del bastidor de ósmosis. Cerrándola más o menos se permite una salida variable de la salmuera y de esta forma se consigue la regulación.

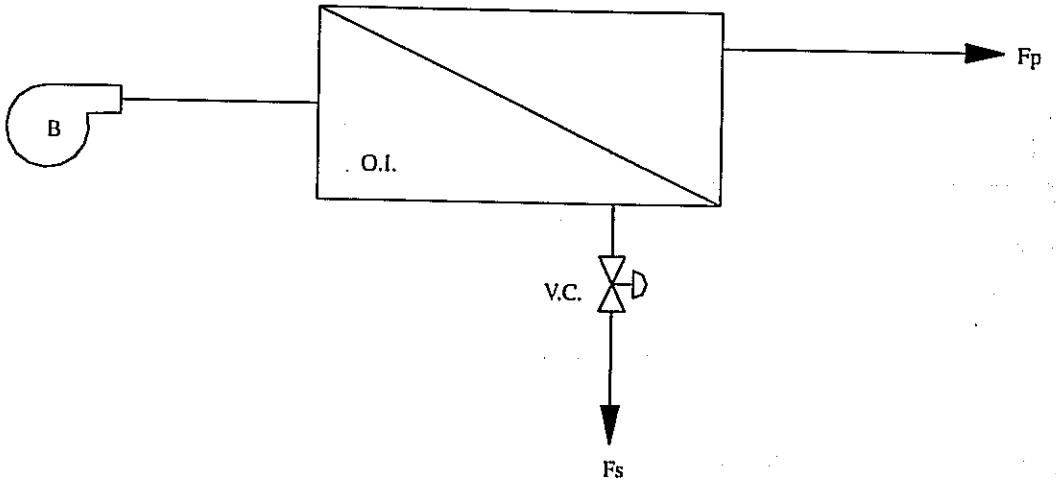


Figura 10.4. Colocación de la válvula de salmuera.

Como la salmuera sale del bastidor a alta presión, unos 2-6 kg/cm^2 inferior a la de alimentación, dicha válvula tiene que ser tal que provoque la pérdida de carga de salida, puesto que a dicha presión sería peligroso el manejo del citado rechazo. En pequeñas instalaciones se emplean usualmente las válvulas de aguja.

Cuando en la instalación de ósmosis inversa se utiliza un equipo de recuperación de energía esta válvula cambia su papel e incluso se sustituye por algún dispositivo que realiza la misma función.

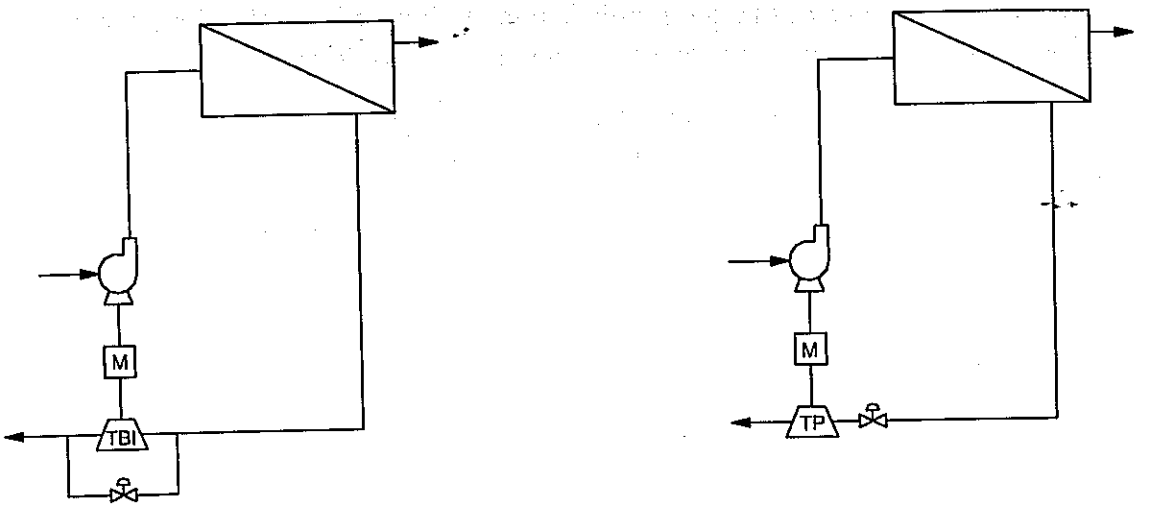
La turbina, sea del tipo bomba invertida o turbina Pelton, realiza este papel de control y por tanto de regulación de la conversión.

La única válvula de salmuera en este caso, es más bien una válvula de by-pass de la turbina-bomba invertida o de limitación de la presión de entrada a la turbina Pelton.

La recuperación de energía tiene especial significado en las instalaciones de agua de mar, en que se trabaja a altas presiones y bajas conversiones (inferiores al 50%), pues en estos casos se pueden utilizar equipos de alta eficiencia que tratan caudales importantes.

La salmuera o rechazo a alta presión se procesa a través de una turbina, que en estos casos es la que realiza el papel regulador de la conversión asignado a la citada válvula en las instalaciones ya citadas.

El funcionamiento de la turbina, como dispositivo de control de la conversión, es muy distinto según se trate de bombas trabajando en sentido inverso o de turbinas Pelton.



A) Bomba invertida

B) Turbina Pelton

Figura 10.5. Situación de la válvula de by-pass de la turbina.

En el primer caso, la elección de la turbina requiere un cuidado especial, realizándose el diseño para un caudal óptimo de rechazo y a una determinada presión, que permita la mayor recuperación de energía.

Esto presupone que la conversión que se fija en el diseño del sistema es un parámetro bastante fijo y que no admite grandes variaciones en el futuro.

El punto de diseño nos debe fijar además la presión mínima de entrada que no produce cavitación, y el caudal máximo que puede alimentar a la turbina.

Para mejorar la rigidez de este tipo de turbina se utiliza una válvula de by-pass, situada entre la tubería de alta presión, de alimentación a la turbina, y la tubería de baja presión de salida de la misma.

Esta válvula dispone de un disco de orificio a su salida y tiene una capacidad máxima que suele estar entre el 5 y el 10 % del caudal máximo de alimentación a la turbina.

Como a lo largo del funcionamiento de la instalación el caudal de rechazo puede variar, no sólo por ensuciamiento de las membranas con el consiguiente descenso de producción, sino también por variar la conversión en función de las necesidades de operación, la válvula permite hacer frente a esas contingencias.

Cuando está completamente cerrada, la turbina aprovecha toda la energía de la salmuera, que de acuerdo con la presión y caudal, puede o no corresponder al punto óptimo de funcionamiento de la misma.

Si se aumenta el caudal de alimentación a membranas manteniendo la misma conversión, o si se reduce ésta, aumenta el caudal de rechazo, que al no poder pasar a través de la turbina se tendrá que derivar a través de la válvula de by-pass, para evacuar ese exceso de caudal con respecto al nominal de la turbina.

Este by-pass permite que a la turbina llegue la salmuera con el caudal y la presión adecuada para que la turbina funcione cerca de su punto de funcionamiento de máxima eficiencia, consiguiendo una óptima recuperación.

Todo el caudal que se deriva a través de la válvula de by-pass es energía que se pierde y que por tanto no puede ser recuperada mediante la turbina, pero sin embargo permite esa mayor capacidad de operación del sistema de salmuera y mantener rendimientos.

Este sistema no es tan flexible como el utilizado para sistemas de baja presión con la válvula de salmuera pero, teniendo en cuenta que las variaciones de rechazo que se producen en las instalaciones de agua de mar no son demasiado grandes, resuelve adecuadamente el dilema.

La limitación del caudal de salmuera será pues el caudal que admite la turbina más el de la válvula de by-pass.

Pero la válvula de by-pass de la turbina desempeña otro papel muy importante cual es la modificación de las condiciones de funcionamiento de la instalación, para permitir una operación que responda a las condiciones en que se sitúa la planta.

Su papel es fundamental para prolongar el periodo de funcionamiento de la instalación entre dos limpiezas de membranas consecutivas, cuando las condiciones de abastecimiento de agua son precarias.

En estos casos la instalación, que a lo largo del tiempo va perdiendo sus parámetros nominales de funcionamiento, por ensuciamiento y compactación, empieza a tener pérdidas de carga diferenciales elevadas, que aconsejarían la limpieza de las membranas.

Si las circunstancias no permiten parar la instalación para limpieza, lo que consumiría de 8 a 12 horas con la consiguiente pérdida de producción, continuar funcionando en esas circunstancias provocaría un nuevo aumento de la presión diferencial que podría producir «telescoping» o un ensuciamiento irreversible de las membranas.

Abriendo la válvula de by-pass poco a poco se puede derivar a través de ella un 5-10 % del caudal. Por tanto, al disminuir la contrapresión en el bastidor, aumentaría el caudal de salmuera, es decir, se reduciría la conversión en un 2-5 %. La correspondiente disminución de la producción en ese porcentaje permite mantener o incluso disminuir la presión diferencial a través de las membranas, que pueden seguir funcionando sin que se rebasen los parámetros de riesgo de las mismas.

Esta variación produce lógicamente un aumento del consumo específico, pero al menos permite continuar con el funcionamiento sin interrupciones durante el tiempo necesario.

10.4. Aumento de producción

Las instalaciones de desalación, especialmente cuando se dedican a satisfacer una necesidad importante como puede ser un abastecimiento doméstico en lugares de escasez de agua, o un riego en zonas áridas, suelen crear una dependencia directa muy importante y además contribuyen a un aumento de la demanda a un ritmo superior a las previsiones.

Como las instalaciones de ósmosis son modulares resulta fácil la ampliación de la instalación con nuevas unidades, pero se requiere tiempo y financiación para ello.

Para atender ese período intermedio se puede tratar de revisar con detalle el diseño de la instalación y aprovechar las posibilidades que éste ofrece para intentar, al menos parcialmente, responder a esas necesidades existentes.

La experiencia permite comprobar la falta de precisión de muchos diseños, especialmente antiguos, y también la posibilidad de realizar mejoras en la instalación que repercutan en una mayor eficiencia del sistema.

Dado que la bomba de alta presión es el elemento limitante de caudal y presión de la instalación, existen tres formas principales o modificaciones del sistema que se pueden realizar para conseguir el aumento de producción.

10.4.1. Incremento del número de membranas

Como las membranas al cabo del tiempo van perdiendo caudal y obligan a aumentar la presión de funcionamiento de la instalación para mantener el caudal nominal de producción, pueden analizarse los márgenes de presión disponibles en el sistema.

Cuando se arranca una instalación las membranas trabajan a la menor presión posible y, a medida que se van ensuciando, se va aumentando ésta hasta aproximarse a la máxima presión que soportan las membranas. Como el diseño se suele realizar para responder a estas contingencias existe normalmente una disponibilidad de 5 a 10 kg/cm^2 en la bomba de alta presión y que se pierden en la válvula de control.

Analizando las curvas de la bomba de alta presión se puede determinar el máximo caudal que se puede bombear sin que la presión descienda en exceso; es decir, si el diseño se ha hecho para trabajar a una presión máxima de 69-70 kg/cm^2 y con un caudal de un 5 % superior al necesario, se determina el punto de funcionamiento de caudal máximo para una presión de 66-67 kg/cm^2 y éste es el elemento de partida para hacer la transformación. En este nuevo punto de funcionamiento la eficiencia de la bomba bajará normalmente un 1-3 %.

En función de estas nuevas prestaciones exigidas a la bomba puede ser necesario introducir alguna modificación en la misma que normalmente suele ser el recorte de los rodetes o impulsores que producen un aumento del caudal y un descenso de la presión.

Una vez realizada esta modificación, como se trata de mantener la conversión del sistema, se calcula el número de membranas necesario para aumentar la producción del sistema. Al ser estas membranas nuevas, contribuirán al aumento de producción a la vez que equilibrarán a las otras membranas más viejas.

Para completar la modificación, como se aumenta simultáneamente el caudal de rechazo, debe estudiarse también la turbina para ver si puede admitirlo o si es necesario también recortar algún rodete o incluso eliminar uno de los rodetes existentes y sustituirlo por uno ciego y además aprovechar al máximo la capacidad de la válvula de by-pass que se mantendrá abierta al máximo.

10.4.2. Sustitución de las membranas

Como constantemente están apareciendo en el mercado membranas con mejores prestaciones, tanto en cuanto a mayor producción y rechazo de sales como en cuanto a menores presiones de funcionamiento, la sustitución de todas las membranas del bastidor por otras de nueva generación, junto al estudio de las modificaciones de bomba y turbina explicadas anteriormente, permiten determinar la capacidad de ampliación de la producción posible.

10.4.3. Sustitución de la turbina

Si los cambios introducidos en la bomba y el incremento del número de membranas producen un aumento del caudal de rechazo que no puede ser absorbido por la turbina existente, habrá que pensar en cambiar ésta por una de mayor capacidad, sea del mismo tipo de bomba multicelular invertida o del tipo Pelton.

En todas estas modificaciones se produce un aumento del consumo energético de la instalación que debe contar con la potencia eléctrica necesaria, pero a su vez hay un aumento de producción que restituye el consumo específico en kWh/m^3 a valores muy cercanos a los de diseño.

En última instancia se puede evitar la sustitución de la turbina, tanto en el caso de que ésta fuera del tipo Pelton como del tipo Francis, mediante la colocación de otra tubería de evacuación del exceso de salmuera, similar a la de by-pass de la turbina-bomba invertida.

Sin embargo, habrá que analizar el consumo energético final y los precios de los equipos para decidir si es conveniente seguir manteniendo la turbina existente o es preferible realizar un cambio completo de la misma.

10.4.4. Aumento de la conversión

Aunque en el diseño se trata de mantener la conversión más elevada posible compatible con las características químicas del agua que se va a desalar, en casos especiales de escasez de agua se puede intentar aumentar la producción de agua desalada.

Aunque en cualquier caso este aumento no debe suponer más de un 10 %, dicha cifra puede ser lo suficientemente importante como para tenerla en consideración, siempre que los equipos mecánicos disponibles permitan su manejo.

La situación que se presenta es distinta según se trata de agua salobre o de mar.

Agua salobre

Normalmente las instalaciones de agua salobre utilizan entre los pretratamientos químicos algún tipo de antiincrustante, por lo que el aumento de la conversión va a exigir una mayor utilización de estos y además un estudio más profundo de las características químicas, en especial en lo que se refiere a la presencia de algún elemento que puede actuar como catalizador de los precipitados como el hierro, aluminio o manganeso, así como una filtración más exigente para evitar la presencia de coloides que puedan favorecer dicho proceso.

Cuando el factor limitante que ha obligado a operar con una conversión baja es la sílice, las posibilidades de aumento de la producción son mayores.

Pero además de actuar sobre la temperatura o el pH que pueden influir en la solubilidad de la sílice, o la utilización de los nuevos antiincrustantes ya citados, algunos de los cuales permiten superar concentraciones de 800 ppm en el rechazo manteniendo la sílice coloidal dispersa en el agua de circulación, dado que los precipitados de sílice son tan negativos para las membranas, es preferible no asumir tales riesgos y mantenerse en concentraciones muy inferiores.

Ante esas dudas derivadas de los posibles componentes químicos del agua es preferible utilizar membranas de sacrificio, separadas de los tubos de presión, que son las que quedarían incrustadas y por tanto inservibles en caso de precipitados.

Este sistema válido para las membranas de arrollamiento en espiral consiste en utilizar una membrana más de las contenidas en los tubos de presión, generalmente de menor tamaño, que se coloca a continuación de estos y separada de ellos.

Se regula la conversión de la instalación para que sólo esta membrana sea la que reciba un agua de alimentación con concentraciones de SiO_2 superiores a las de su solubilidad y se hace un seguimiento de la misma colocándole medidores de caudal, pérdida de carga y conductividad.

Puesto que la formación de precipitados se iniciaría por dicha membrana que es la que se encuentra en peores condiciones, con ella se protege el funcionamiento de las restantes.

La limpieza de los precipitados de silicatos es muy difícil de eliminar. La única posibilidad consiste en una rápida intervención en cuanto se detecta, después ya resulta muy tarde.

El lavado se realiza con una solución del 1% de SHMP.

Si está en forma polimerizada, la sosa cáustica a pH 11,5 es efectiva.

Agua de mar

Como las conversiones son bajas, entre el 38 y el 45 %, el aumento de la conversión hasta el 50-55 % es posible, aún cuando los riesgos de precipitación de carbonatos y sulfatos existen.

La única vía de asumir dichos riesgos es, además de la vigilancia de las precauciones citadas anteriormente, el empleo de antiincrustantes, que en la desalación de agua de mar no son utilizados con tanta frecuencia como en agua salobre.

Los fabricantes de membranas de fibra hueca son más favorables al aumento de la conversión hasta dichos valores que los de arrollamiento en espiral, por lo que conviene consultar con ellos las posibilidades de unas y otras membranas.

10.5. Funcionamiento de las membranas

Un aspecto fundamental del funcionamiento de una instalación de ósmosis es el comportamiento de las membranas.

Para ello, a lo largo de la operación de la planta, se toman periódicamente una serie de datos o parámetros que directa o indirectamente nos dan información sobre la misma.

De tales datos los principales son el caudal, presión de alimentación, salinidad, pérdida de carga en las membranas y temperatura.

Para poder interpretar dichos datos es necesario conocer el comportamiento de las membranas respecto a dichos parámetros que ha sido indicado en un capítulo anterior.

Las situaciones que más frecuentemente se presentan en la operación de una instalación de ósmosis pueden resumirse en las siguientes:

10.5.1. Influencia de la presión

Las condiciones nominales de funcionamiento de una membrana nueva o limpia vienen dadas por una presión y un caudal determinado, además del consiguiente rechazo de sales.

Desde el momento en que la instalación se ha puesto en marcha y ha quedado estabilizada, la pérdida de carga o presión diferencial a través de las membranas empieza a aumentar, por ensuciamiento u otras causas. En consecuencia la presión neta, diferencia entre la de alimentación y la pérdida de carga, que inicialmente da el caudal nominal previsto, empieza a disminuir y consiguientemente el caudal empieza a descender.

La recuperación de dicho caudal se consigue aumentando la presión, que está limitada por la máxima resistencia que la membrana puede soportar.

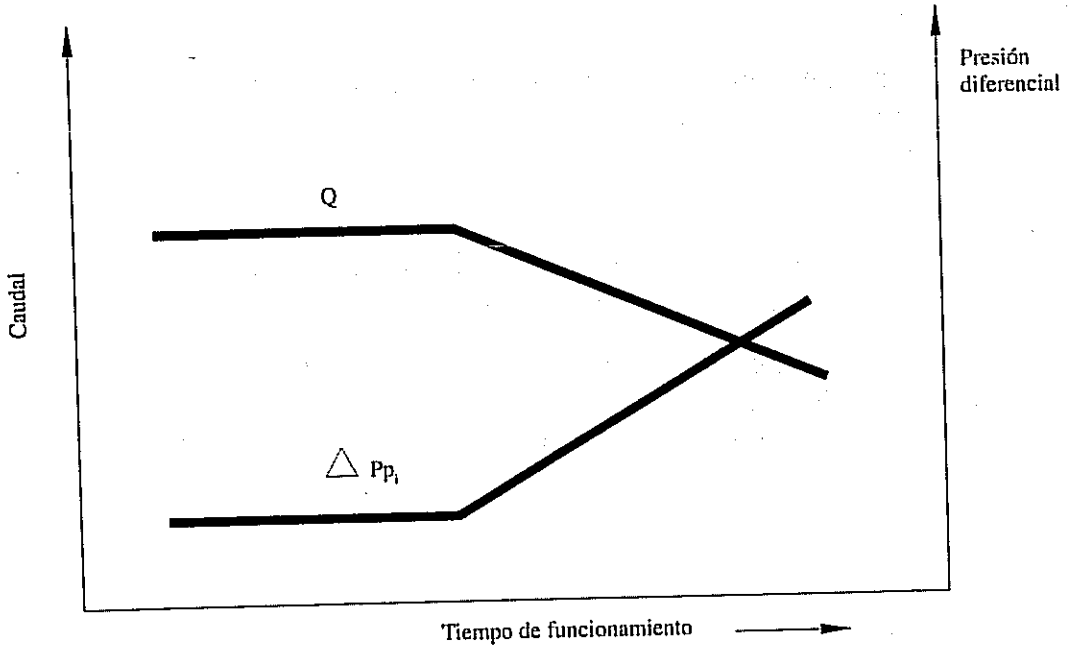


Figura 10.6. Variación del caudal y la presión diferencial con el tiempo.

Cuando se llega a este punto para recuperar la capacidad de producción de las membranas hay que proceder a su lavado con diversos productos químicos.

Sin embargo en la operación normal de una instalación nunca debe llegarse a estos valores extremos, pues al aumentar la presión se produce una mayor compactación y un incremento de la pérdida de carga, dado que las partículas que producen el ensuciamiento de las membranas son presionadas con más fuerza sobre ella produciendo en ocasiones una película de suciedad que tiene otros efectos.

A su vez, al disminuir la permeabilidad a través de la membrana, aumenta el caudal de rechazo, por lo que si no regulamos convenientemente la válvula de salmuera o la de by-pass de la turbina, se produce una contrapresión que favorece la disminución del caudal.

Además de los efectos físicos sobre la membrana, el aumento de la presión de operación produce un incremento del consumo específico de la instalación.

10.5.2. Influencia de la temperatura

La comprobación de las variaciones de la temperatura del agua es también importante, puesto que existe una relación directa entre ésta y el caudal.

Al elevarse la temperatura se produce una especie de dilatación de los poros de la membrana y una variación en la viscosidad del agua a desalar, por lo que no solo el caudal aumenta sino que además pasan más iones a través de la membrana, es decir, disminuye el rechazo y en consecuencia la calidad del permeado es inferior.

Por tanto un aumento del caudal o salinidad puede no ser signo de que las membranas estén funcionando mal, sino consecuencia de la temperatura.

En las instalaciones de desalación se observa una importante variación en la cantidad y la calidad del agua producto entre el verano y el invierno e incluso a lo largo del día, dependiendo de la época del año.

En el caso de tratamiento de aguas en extensiones abiertas como lagos o el mar las temperaturas más bajas se producen en las primeras horas del día y las más elevadas después de la puesta del sol.

El aumento de la temperatura favorece también la actividad biológica, por lo que son de prever ensuciamientos más frecuentes e importantes, que habrá que tratar de controlar mediante los productos químicos adecuados.

A su vez el aumento de la temperatura puede contrarrestarse con una bajada de la presión de alimentación y de esta forma, sin disminuir el caudal, se consigue al menos que la suciedad, la materia orgánica o las bacterias no queden fuertemente pegadas o adheridas a las membranas, a la vez que se reduce el consumo energético.

Respecto al efecto que se produce en cuanto al incremento de la salinidad, no hay forma de combatirlo, aunque es importante saber que se trata de un efecto pasajero y que tan pronto desciende la temperatura se vuelve a los valores anteriores.

10.5.3. Influencia de la salinidad

También es importante el control de la salinidad, tanto en el agua producto como, en el caso de aguas salobres de pozo, en la de alimentación.

La variación de ésta puede inducir a errores si no ha sido advertido previamente, pues se produce no solo una disminución importante del caudal, que puede compensarse con una subida de la presión, sino una subida de la salinidad del producto que no tiene otra solución que recurrir a la instalación de otras membranas que tengan un mayor rechazo de sales.

Hay que tener en cuenta que la ósmosis inversa aplica una presión para vencer la presión osmótica diferencial entre la de la solución que se trata de desalar, y la de la salmuera. Esta diferencia entre ambas presiones es la que obliga al agua a pasar a través de la membrana.

Como la presión osmótica de una solución depende de su salinidad, al aumentar ésta disminuye la presión neta transmembrana y en consecuencia al presionar menos sobre la misma se produce un caudal menor.

Pero además el rechazo de sales de una membrana es una característica fija de la misma, por tanto en el producto habrá más sales si el agua que se trata de desalar es más salina.

Pero el aumento de la salinidad del permeado puede ser debida a otras causas como:

— Deterioro irreversible de las membranas que con el tiempo o en determinadas circunstancias pierde parte de sus características de rechazo.

— De alguna fuga de agua salada en los interconectores que unen las membranas en el interior de los tubos de presión.

— De la formación de una capa de suciedad sobre la superficie de la membrana, que actúa como si fuera una membrana distinta de menor rechazo y que se recupera mediante el lavado.

— De la parada de la instalación por causas accidentales, especialmente si son frecuentes.

En cada una de estas circunstancias se requieren actuaciones distintas y en las dos primeras hay que proceder al cambio de membranas o de interconectores.

Para vigilar estas variaciones y su causa, se recomienda lavar las membranas cuando la salinidad se incrementa en un 10-15 %.

Si no existe recuperación adecuada de la calidad hay que proceder al citado cambio de membranas.

Las fugas de los interconectores son más fáciles de detectar pues se producen periódicamente y de inmediato generan, como se ha indicado anteriormente, un fuerte incremento de la salinidad.

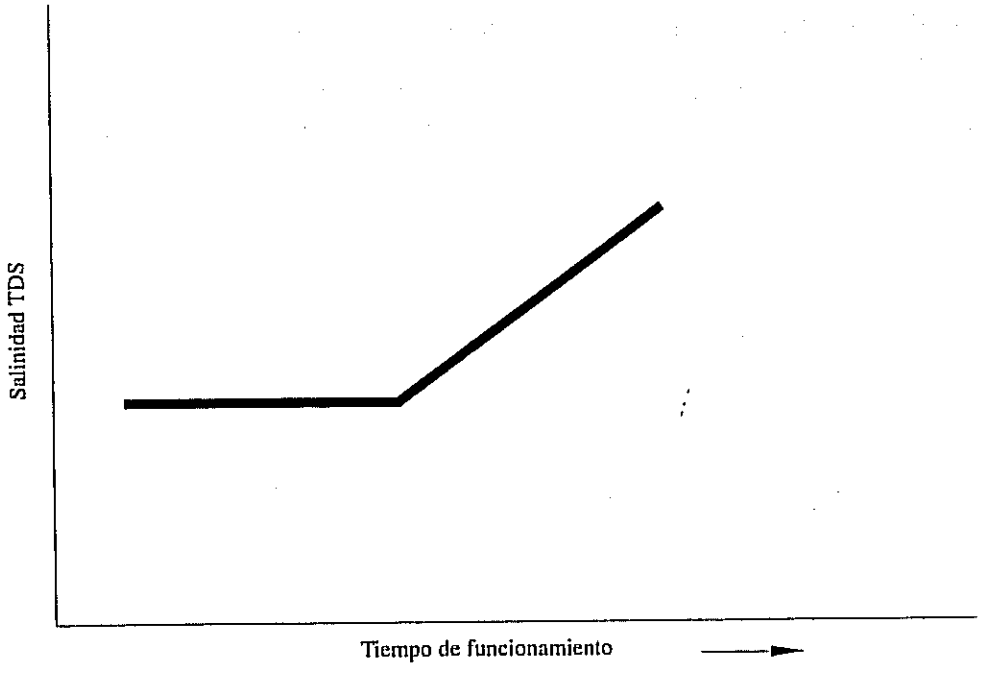


Figura 10.7. Variación de la salinidad con el tiempo.

10.6. Ensuciamiento de membranas

A pesar de todos los pretratamientos que se aplican a las instalaciones desaladoras, antes o después se puede producir su ensuciamiento, que dependiendo del tipo de aguas a tratar tiene uno o varios de los siguientes orígenes, como ya se ha mencionado a lo largo del libro.

10.6.1. Biológico

Es consecuencia de la actividad biológica y aunque la desinfección del agua, de los filtros de arena y de cartuchos contribuye a su reducción, es muy difícil la eliminación completa de la misma, por lo que en tales circunstancias hay que acostumbrarse a convivir con estos microorganismos y tratar de mantenerlos bajo control, dentro de ciertos límites.

No tiene por tanto mayor importancia el realizar pruebas exhaustivas para determinar el agente bacteriano o vírico causante de la contaminación, pues su eliminación es prácticamente imposible.

Es más importante ser consciente de las condiciones en que se debe trabajar y reducir al máximo las causas que provocan esa proliferación bacteriana, como son la desinfección con cloro u otros biocidas, la eliminación del oxígeno presente en el agua a tratar, e incluso la utilización de otros productos con características similares y que forman parte del tratamiento como ocurre con el bisulfito sódico.

También deben vigilarse especialmente las vías de contaminación a través de los equipos dosificadores de antiincrustantes, pues al ser estos generalmente compuestos fosforados constituyen un excelente medio nutritivo de dichos microorganismos.

Los filtros de cartuchos, cuyo material, polipropileno, recubierto de los elementos que retiene favorece también dicha proliferación debe vigilarse, aplicando en el caso de membranas de poliamida el producto reductor a la salida de estos filtros.

Los compuestos orgánicos del agua que favorecen esta actividad también deben controlarse favoreciendo su decantación mediante la elección de materiales de filtración de la granulometría adecuada y de coagulantes apropiados a tal fin.

10.6.2. Coloidal

Se produce también a pesar de la batería de elementos de filtración que se colocan en las instalaciones. El pequeño tamaño de estas partículas atraviesa todas estas protecciones y llega a la membranas.

El estudio concienzudo de los citados filtros y coagulantes, así como equipos con funciones complementarias, como decantadores o clarificadores ayudan a mejorar la situación.

En última instancia productos de limpieza y tiempos de humedecimiento y ablandamiento adecuados resultan eficaces.

10.6.3. Químico

Los precipitados se corrigen controlando la conversión, regulando el pH y utilizando antiincrustantes o estabilizadores específicos, y la eliminación de las condiciones de oxidación que favorecen la precipitación de determinados metales también es un procedimiento a tener en consideración en la explotación de las instalaciones.

Los lavados ácidos recuperan finalmente las prestaciones características de las membranas, aunque su abuso reduce su vida útil.

10.7. Recuperación de membranas

Las membranas de ósmosis inversa pierden con el tiempo sus características básicas de funcionamiento, es decir, sus propiedades de rechazo o su caudal.

Y este fenómeno se produce tanto por una mala operación de la instalación, como por causas naturales, aunque sus consecuencias no son las mismas.

Lógicamente la mala operación de la planta conduce a un deterioro de la membrana sin posibilidad de recuperación posterior.

En cambio las causas naturales, derivadas fundamentalmente de las características del agua a tratar determinan una pérdida de tipo temporal, que permite con el tratamiento adecuado seguir utilizando las membranas.

Descubrir la causa de esta pérdida es importante, pues puede conducir a decisiones tan drásticas y con tan importantes consecuencias económicas como es la sustitución por otras membranas nuevas, o por el contrario emplear medidas que permitan seguir utilizándolas sin mayores problemas.

Las causas principales de deterioro irreversible de las membranas son:

— Compactación.

— Ensuciamiento excesivo.

— Desplazamiento interno de las distintas láminas componentes (telescoping).

— Rotura de la cubierta externa protectora.

— Rotura de algún componente de la membranas.

— Pretratamientos químicos inadecuados.

— Rotura de algún elemento de filtración.

El deterioro temporal está causado por el ensuciamiento ya citado en sus distintas formas, físico, químico o biológico.

Los síntomas que detectan este tipo de problemas están relacionados con los citados parámetros básicos, y consisten en una pérdida de producción, un aumento de la salinidad o ambas cosas a la vez.

Analizando el origen de estas causas se pueden tomar las precauciones correspondientes en el manejo de la instalación.

La *compactación* de la membrana es un proceso que se empieza a desarrollar desde el momento en que se arranca la instalación, y como su nombre indica se produce al chocar el agua a alta presión contra la superficie de la membrana. Este choque comprime la capa selectiva o separadora de la membrana, que es la más delicada, contra el material soporte de la misma.

Como consecuencia se produce un sellado de los poros de la membrana y una pérdida de caudal. Las membranas que funcionan a alta presión son más sensibles a este fenómeno que las que lo hacen a baja presión.

Sin embargo este fenómeno natural no es preocupante, aunque está influenciado por las interrupciones que se producen en el funcionamiento regular de la instalación. Es decir, que cuanto más elevada es la presión de funcionamiento y mayor el número de paradas y subsiguientes arranques de la instalación, que generan los correspondientes golpes de ariete, mayor es la compactación.

El proceso de compactación es generalmente lento y a lo largo de los siete a diez años, que se considera como período medio de vida de la membrana, se va intensificando hasta que la reducción de caudal es tan importante que altera sensiblemente los costes de producción del agua desalada.

A partir de una pérdida de caudal del 20 % puede considerarse que es el momento de pensar en poner membranas nuevas, aunque otras circunstancias pueden adelantar o atrasar el cambio de membranas.

Por ejemplo, en caso de gran escasez de agua y energía barata puede alargarse dicho tiempo. Por el contrario con energía cara y exigencias de calidad de agua se debe acortar. La compactación aparece además ligada a problemas de ensuciamiento.

Los últimos filtros que se colocan antes de las membranas son de 5 micras, es decir, bastante más grandes que muchas de las partículas que existen en el agua y que pasan a las membranas.

Los tratamientos químicos también alcanzan hasta ciertos niveles de seguridad que se consideran suficientes.

Superar unos y otros dan lugar a un aumento excesivo de los costes de operación, incluidos los energéticos que no compensan frente al deterioro lento y controlado que pueden tener las membranas.

La deposición de los distintos elementos «ensuciantes o ensuciadores» sobre la superficie de las membranas, produce un descenso de caudal que se une al de la compactación, una pérdida de calidad del producto al disminuir el rechazo y un aumento de la presión diferencial interior de las membranas.

Las membranas sucias deben lavarse para eliminar esos 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 excesivo, en el que las partículas quedan fuertemente adheridas a la membrana y son imposibles de liberar. La membrana experimenta un fuerte descenso en sus prestaciones y se debe cambiar.

El ensuciamiento conduce al operador a una elevación de la presión de operación, para compensar por presión el caudal perdido por ensuciamiento y compactación, lo que incrementa el deterioro de la membrana.

El *desplazamiento de las láminas componentes de la membrana* se produce precisamente por prolongar excesivamente el tiempo de funcionamiento sin recurrir a lavados.

La pérdida de carga que se produce en el interior de la membrana por rozamiento del agua, pero sobre todo porque los depósitos obstruyen los canales hidráulicos de las membranas limitando el paso del agua, aumenta a medida que la membrana se ensucia.

Como el ensuciamiento no es completamente uniforme en toda la membrana, si la pérdida de carga aumenta excesivamente se produce un desequilibrio interno de la misma y unas capas se desplazan con respecto a otras.

En este desplazamiento se suelen producir grietas y por tanto fugas, por lo que se produce un incremento elevado y súbito de la salinidad del agua producto, al mezclarse ésta con la salmuera.

En muchas ocasiones el «telescoping» se produce con pérdidas de carga inferiores a las normales, a consecuencia de golpes de ariete y desplazamiento de las membranas en el tubo, por holguras en los interconectores entre membranas, defectos en la fabricación de éstas o de los tubos de presión, o pandeo por excesiva longitud de éstos (7 u 8 membranas).

Los fabricantes de membranas establecen las pérdidas de carga máximas toleradas tanto por membranas, como por tubos de presión, en 0,69 kg/cm^2 (10 psi) por unidad y 4,14 kg/cm^2 (60 psi) por tubo de seis membranas.

Aunque con ciertas precauciones estos valores pueden sobrepasarse hasta en un 10-15 %, no conviene hacerlo como medida de seguridad.

La *rotura de la cubierta externa protectora* de la membrana, generalmente de PRFV, se produce por defectos de fabricación, o por desplazamientos internos de las membranas en el interior de los tubos de presión, por las excesivas holguras de unos u otros.

Estas holguras pueden detectarse durante el montaje de las membranas en el interior del tubo, por lo que se requiere una cierta experiencia para que las membranas estén perfectamente sujetas en su interior y evitar desplazamientos longitudinales.

Las roturas son también causa de un incremento excesivo de la salinidad del producto. La rotura de algún componente de la membrana aunque menos frecuente se produce por causas similares al caso anterior y sus consecuencias son equivalentes.

El caso más frecuente de *pretratamientos químicos inadecuados* es cuando al utilizarse membranas de poliamida existen en el agua a tratar condiciones de oxidación, naturales o provocadas que no se eliminan antes de que el agua llegue a las membranas.

El caso ya tratado en otro lugar de la utilización de cloro como desinfectante, que no se elimina con bisulfito por dosificación insuficiente o defectuoso control del proceso, no es extraordinario.

Menos normal suele ser el salirse de los límites operativos de las membranas respecto al pH, que en el caso de membranas de acetato de celulosa produce su hidrólisis. En estos casos se produce un incremento tanto del caudal como de la salinidad.

Por último *la rotura de algún elemento de los filtros de cartucho* produce la llegada a las membranas de elementos sólidos de mayor tamaño del tolerado, que puede producir la rotura de la membrana o la incrustación de las partículas en ésta con un aumento de salinidad y caudal.

10.7.1. Lavado de membranas

Cuando se produce un descenso en el caudal de agua producto del 10 %, un aumento en la salinidad, o una pérdida de carga en el tubo de presión importante hay que proceder al lavado de las membranas.

Aunque estos valores no son rigurosos, hay que tener en cuenta que prolongar el funcionamiento de la instalación tiene unas consecuencias económicas negativas importantes, como consecuencia de los tres procesos ya citados:

— Compactación.

— Ensuciamiento.

— Pérdidas de carga.

Las dos primeras causas permiten la recuperación total o parcial de las características de funcionamiento de las membranas mediante su lavado, mientras que las consecuencias de la tercera son irreversibles.

Los productos químicos que se emplean en el lavado deben ser apropiados al agente causante del ensuciamiento y además la cadencia y el tiempo de duración

es distinto según el tipo de ensuciamiento presente. En muchas ocasiones el proceso se complica por haber más de una causa.

Tres son los tipos principales de lavados que se aplican a las membranas:

— Acido para la eliminación de precipitados inorgánicos.

— Alcalino para ensuciamiento por materia orgánica.

— Lavados especiales para ensuciamientos biológicos.

Aunque el lavado que se suele hacer es el específico para cada situación, en muchos casos no se conoce la causa exacta del ensuciamiento y se realiza en dos fases, comenzando por un lavado ácido y siguiendo por otro básico, aunque en casos de ensuciamientos muy persistentes se realizan también lavados especiales.

Acido

Tiene por fin la eliminación del ensuciamiento químico, es decir la disolución de los precipitados salinos, carbonatos y sulfatos que se han depositado sobre las membranas.

El sistema operativo de realizar el lavado es similar en ambos casos aunque se emplean lógicamente productos distintos.

En el depósito de lavado se disuelve el ácido en una solución de agua producto, libre de cloro hasta conseguir un pH muy bajo (3-4) y se empieza a recircular bombeando por el circuito de lavado existente al efecto, que deberá llevar intercalado un filtro de 4 micras para proteger a las membranas de sustancias extrañas que se agregan con los reactivos o de la mala disolución de estos, llevando el agua tratada al bastidor de membranas y tras pasar sobre ellas se recoge y se devuelve al depósito.

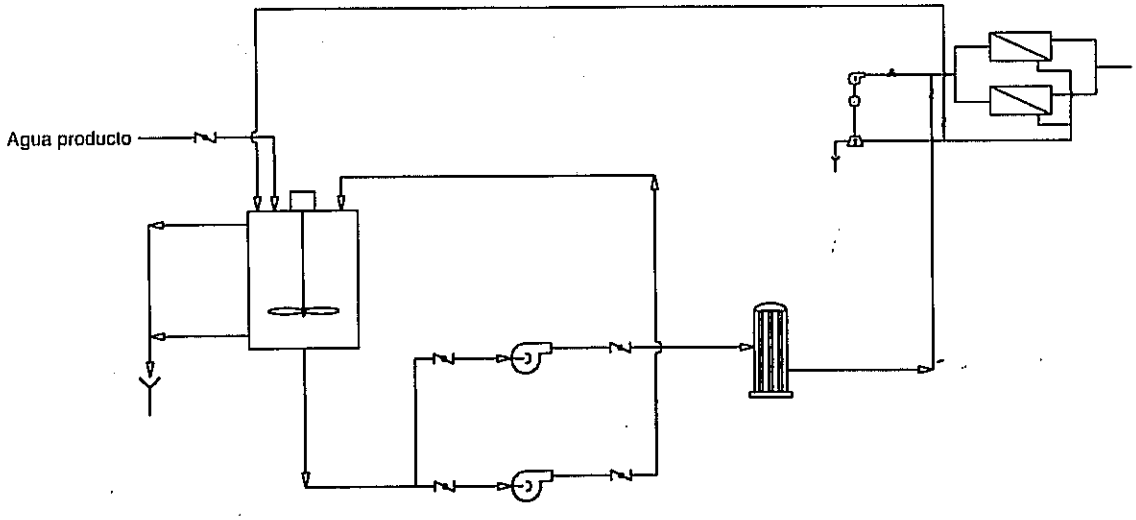


Fig. 10.8. Esquema del equipo de lavado de membranas.

Si el pH baja demasiado se sube hasta los valores citados con hidróxido amónico.

Se comprueba el pH a la salida de las membranas, que generalmente habrá subido algo y se continúa añadiendo ácido en el depósito y recirculando hasta que el pH se mantenga constante en todo el circuito.

Una vez lograda esta uniformidad, se paraliza la recirculación y se dejan las membranas embebidas en el líquido durante un período variable entre 2 y 4 horas. Pasado el mismo se pone en marcha nuevamente la recirculación con agua tratada que va expulsando a drenaje el líquido acidificado hasta que a la salida de las membranas se obtenga la misma calidad del agua de entrada, en cuyo momento se considera que se ha producido el desplazamiento de todo el producto de lavado y se puede volver a poner en marcha el bastidor.

La limpieza se puede ensayar inicialmente con ácido acético, pero si los precipitados son persistentes, en su lugar se utilizan el ácido clorhídrico en solución al 0,1 %, el fosfórico al 0,4 % o el cítrico al 1 %, que resultan más enérgicos y eficaces. Además existen un conjunto de reactivos que recomienda el fabricante y que en esencia realiza el mismo papel que estos, facilitando el desprendimiento de los precipitados.

Como los resultados no son siempre positivos se pueden ensayar otros productos aunque es aconsejable consultar con el fabricante de las membranas o el de los productos químicos de la compatibilidad de ambos.

Aunque muchas veces el ensuciamiento está claramente producido por precipitados, y en el caso del hierro es muy fácilmente detectable por el color rojizo que adquiere el agua de lavado, generalmente junto a los precipitados quedan retenidos contaminantes orgánicos o microorganismos, por lo que también es aconsejable realizar seguidamente un lavado alcalino.

Lo contrario no es en cambio tan cierto, por lo que en la mayoría de las ocasiones el lavado alcalino no se acompaña del lavado ácido.

Alcalino

Es para combatir el ensuciamiento biológico y se realiza llevando el líquido de lavado a un pH muy alto, de al menos 11, mediante la adición al agua tratada de hidróxido sódico, conjuntamente con algún producto más enérgico entre los que se emplean:

STPP (tripolifosfato sódico).

EDTA en polvo o en solución.

TSP (fosfato trisódico).

Cuando se ha introducido en las membranas la solución limpiadora se dejan también empapadas en ella, pero durante un período más largo, que será como mí-

nimo de ocho horas, y pudiendo prolongarse en función del grado de ensuciamiento y contaminación, hasta 24 horas. El desplazamiento es similar a como se ha referido anteriormente.

El caudal de lavado aconsejable suele estar también limitado por el fabricante con valores normales de 2 m^3/h por tubo de 4" y 9 m^3/h, por tubo de 8".

Lavado mixto

Se realiza para provocar la rotura de la capa de bacterias que cubren la superficie de las membranas y eliminarla posteriormente con un lavado normal y consiste en la aplicación de ambos tipos de lavados.

El primer lavado, que debe ser alcalino, mata y desprende las bacterias, mientras que el ácido que se aplica en segundo lugar elimina las precipitaciones y con ellas se arrastran las bacterias muertas.

Para ello se prepara en la cuba de lavado una solución con sosa hasta pH 12, utilizando sosa líquida en lugar de sosa en escamas.

Se recircula la solución de lavado, añadiendo sosa en la cuba de lavado hasta estabilizar el citado pH.

Esta operación puede tardar más de 1 hora y deberá hacerse con cuidado para no pasarse, efectuando lecturas periódicas de pH a la salida del bastidor hasta conseguir el valor deseado de pH.

A continuación con el pH estabilizado en 12 se recircula el bastidor durante 1,5-2 horas.

Se desplaza todo el líquido de lavado con agua producto y a continuación se realiza el lavado normal con productos apropiados como el laurilsulfato, que resulta más fácil y no requiere elevar tanto el pH. Posteriormente, se realiza un lavado ácido como se ha descrito con anterioridad.

En otras ocasiones se realizan el lavado ácido y básico por duplicado. Manteniendo la recirculación de la solución alcalina durante la noche.

Por la mañana se desplaza la solución básica y se lava con ácido cítrico o clorhídrico durante 2 h. Se desplaza la solución ácida y se vuelve a lavar con solución básica, recirculando durante 4 h. Se vuelve a desplazar y se da un segundo lavado ácido recirculando durante un tiempo menor al anterior.

A veces después de un lavado ácido puede detectarse una elevada salinidad en el agua producto, que se mantiene durante bastante tiempo.

Según B. Riley, se puede deber a que en los grupos carboxilos de la membrana se produce una sustitución del Na^+ del COONa por el H^+ del ácido. En estos casos conviene después de la limpieza ácida hacer una recirculación de corta duración con sosa.

Lavados especiales

Cuando la contaminación orgánica y biológica es importante, se recurre a tratamientos más intensos que el lavado alcalino. Estos no solo se aplican en el proceso de lavado sino que en ocasiones se extienden incluso a aplicaciones preventivas, aplicadas de forma periódica como pretratamiento, inmediatamente antes de las membranas.

Los productos que se aplican en estos casos responden al nombre genérico de biocidas, aunque su composición es muy variada. Sin embargo deben tomarse precauciones en su uso y asegurarse después del lavado de que no quedan restos sobre las membranas, puesto que son peligrosos.

También se puede hacer la desinfección con peróxido de hidrógeno diluido al 25 % en agua producto. Como alternativa a veces se usa ácido acético y ácido peracético que se diluyen al 1/100 en agua producto para obtener peróxido de hidrógeno.

El peróxido se recircula durante 20 minutos y a un pH 3-4 para conseguir los mejores resultados biocidas. Después, como en los casos anteriores, se dejan empapar las membranas en la solución durante un tiempo de al menos 2-12 horas.

El formaldehido al 0,3-0,5 % también puede emplearse pero al ser peligroso para la salud se recomienda que después de su aplicación se haga funcionar la instalación durante al menos 6 horas tirando el agua a drenaje, para garantizar que no está contaminada. Además cuando se arranca de nuevo tras el tratamiento se produce un descenso en el caudal que se recupera posteriormente.

El sulfato de cobre, que es también alguicida, puede utilizarse en concentraciones de 0,1-0,5 ppm en continuo pero a pH bajo para evitar precipitados de hidroxido de cobre. Sin embargo, por esta causa no es tan frecuente su uso, siendo preferible su utilización en los depósitos o tomas desde los que se alimenta la instalación para evitar la proliferación de algas en ellos.

Como algunos de estos productos se aplican a veces en línea de forma periódica, hay que suspender durante la aplicación del producto el suministro de agua tratada que debe ser tirada a drenaje.

Aparte de biocidas más o menos específicos, se emplean también en la desinfección tanto el formaldehido como el peróxido de hidrógeno.

10.7.2. Síntomas de ensuciamiento

Aunque solo sea de forma aproximada se pueden detectar las causas del ensuciamiento por una serie de características o síntomas que son:

— Precipitados de calcio: marcado descenso del rechazo de sales y moderado aumento de la pérdida de carga.

— Hidróxidos metálicos de Fe, Ni, Cu: rápido descenso del rechazo y rápido aumento de las pérdidas de carga.

— Coloides: ligero descenso del rechazo y gradual aumento de las pérdidas de carga.

— SO_4Ca: importante descenso del rechazo y ligero a moderado aumento de la presión diferencial (pérdidas de carga).

— Materia orgánica: marcado descenso del rechazo y aumento gradual de la presión diferencial.

— Ensuciamiento biológico: marcado descenso del rechazo y marcado descenso de la presión diferencial.

10.7.3. Recubrimiento

Las membranas de poliamida de fibra hueca como consecuencia del ensuciamiento aumentan su salinidad en mayor grado que las de arrollamiento en espiral. Sin embargo cuando se les somete a limpieza también recuperan con más facilidad sus características de rechazo. Ello se debe fundamentalmente al post-tratamiento químico a que se somete a la membrana después de cada lavado, y que le permite reducir el flujo de sales a través de las imperfecciones de las fibras de la membrana. Por ello las membranas de fibra hueca se pueden considerar en cierta medida unas membranas dinámicas que incluso emplean dichos tratamientos al final del proceso de fabricación. La dificultad de la fabricación de los delgados «cabellos» que constituyen dicha membrana, deja ciertas imperfecciones que son recubiertas con otros productos químicos.

Se emplean dos productos distintos que se conocen como PT-A, y PT-B, por haber sido patentados por el fabricante, y que son realmente polivinil metil éter y ácido tánico, respectivamente.

El PT-A se aplica en el proceso de fabricación, tanto a las membranas de agua salobre como a las de agua de mar y permite mejorar el rechazo de sales. También se aplica posteriormente a las membranas de agua salobre después de cada lavado, cuando su rechazo decrece.

El PT-B se aplica solamente a las membranas de agua de mar al final del proceso de fabricación y actúa absorbiéndose sobre la superficie de la membrana. También como en el caso anterior se utiliza después de cada lavado para recuperar las condiciones de rechazo.

La aplicación de PT-B a las membranas de agua salobre también mejora sus cualidades de rechazo.

Su aplicación se puede realizar en continuo dosificándole en la aspiración de las bombas de alta presión durante su funcionamiento, con equipos similares a los de los empleados en la limpieza de las membranas en régimen de recirculación.

Esta capa permite a estas membranas resistir algo mejor el cloro e incluso el hierro, que al quedar sobre esta capa dinámica no llega a atacar completamente a la membrana.

El PT-A y el PT-B no se deben aplicar simultáneamente porque pueden producirse precipitados por reacción entre ambos. Cuando se aplican sucesivamente primero se aplica el PT-B, y una vez que se ha lavado suficientemente se aplica el otro tratamiento.

Las dosis de estos productos a utilizar en cada aplicación pueden consultarse en los manuales del fabricante de los mismos.

Las membranas de fibra hueca de acetato de celulosa no necesitan este tratamiento. Aunque en las membranas de arrollamiento en espiral no se suele usar, su aplicación en casos de deterioro de las mismas mejora sus condiciones separadoras, aunque no en la misma medida y durante períodos de tiempo tan prolongados como en las membranas de fibra hueca, que como decimos son su verdadero campo de aplicación.

10.7.4. Cambio de membranas

Finalmente cuando con los lavados no se recuperan las características de las membranas en un grado apreciable se procede a la sustitución por otras nuevas. Sin embargo el deterioro de las membranas no se produce uniformemente ni de igual manera en todas las membranas de un bastidor.

Por ello no se espera a que el deterioro sea elevado para sustituir todo el bastidor a la vez.

Lo normal es sustituir anualmente las membranas más deterioradas, y considerar este reemplazo como un coste de mantenimiento de la instalación.

En circunstancias de funcionamiento normales con tomas de agua en pozo, una sustitución media anual del 4-5 % puede ser suficiente. Para tomas de agua superficiales se puede llegar al 10-12 % anual.

En la desalación de aguas residuales se puede llegar en algunos casos a una sustitución media del 20-25 %.

10.8. Filtros de arena

En la explotación de una instalación pueden surgir problemas derivados del diseño de los filtros de arena o de una selección inadecuada del material filtrante, que se traducen en altos índices SDI después de la filtración.

Hay tres métodos de mejorar la calidad del agua filtrada:

— Modificación de la gradación y distribución del tamaño de las partículas. Un medio filtrante conteniendo arena fina de elevada uniformidad produce un agua más limpia que otra con arena gruesa de menor uniformidad.

  La arena ideal es la que tiene un coeficiente de uniformidad de 1,5. La arena redondeada, como la de playa, carece de los bordes agudos esenciales.

— Regulación de la profundidad del lecho filtrante. La experiencia ha demostrado que 30 cm es el óptimo. Mayores espesores proporcionan mayor capacidad de filtración, pero son más costosos y no optimizan la inversión.

— Actuación sobre la velocidad de filtración. Si la velocidad es mayor de los valores medios, el tiempo de contacto con el medio filtrante es insuficiente para atrapar las partículas que pasan a través del filtro.

10.8.1. Lavado

El lavado de los filtros de arena o multicapa se hace con aire y agua que se inyectan a contracorriente, estableciendo una secuencia de lavado que normalmente se automatiza.

El proceso de lavado se aplica cuando se detecta una pérdida de carga importante entre la entrada y salida de los filtros. Aunque dicha pérdida de carga puede variar según el diseño entre 0,4 y 1 kg/cm^2, según se trate de filtros abiertos o cerrados, debe analizarse en función de las condiciones del agua la solución más económica respecto al consumo energético, comparando el consumo extra de energía al funcionar de forma prolongada con alta pérdida de carga en los filtros y el que se produce como consecuencia de la parada de un filtro, que por tanto incrementa la pérdida de carga en los restantes.

Las velocidades de lavado de agua y aire y las presiones deben también estudiarse para no producir arrastres excesivos de material filtrante.

Para evitar tener que parar la instalación se realiza filtro a filtro, aislándolos del sistema mediante la apertura y cierre de las válvulas adecuadas de interconexión.

La secuencia de lavado se inicia con la entrada de aire por la parte inferior del filtro que remueve las partículas del medio filtrante, facilitando la liberación del material atrapado por las mismas.

Sin embargo para que la agitación sea eficaz se necesita disminuir el espesor de la carga de agua que hay sobre el mismo, y que puede ser de hasta 1 metro. Se abre la válvula de drenaje inferior del filtro para evacuar el agua sobre el mismo hasta que la lámina sea de unos 5 cm, en cuyo momento empieza la agitación.

Al cabo de 10 a 20 minutos se introduce agua a contracorriente por la parte inferior del filtro, que arrastra las partículas de suciedad que han quedado liberadas y las elimina a drenaje por rebose en la parte superior del filtro.

Fig. 10.9. Lavado de filtros con aire.

El proceso se puede repetir varias veces si se considera oportuno, hasta que en el proceso de agitación se vea que el agua está limpia, en cuyo momento el filtro se vuelve a poner en servicio. La clave de una buena filtración prolongada está en la eficiencia del retrolavado.

Cada medio filtrante tiene una velocidad de lavado óptima que asegura una expansión adecuada de la arena para su limpieza.

Una velocidad inferior no asegura un lavado adecuado, mientras que si es superior arrastra el material filtrante y disminuye la eficiencia. La presión no tiene en cambio efecto en la eficiencia del retrolavado.

En ocasiones puede ocurrir que el SDI del agua a la salida del filtro sea superior que la existente a la entrada del mismo, debido a que en el filtro se acumula material orgánico coloidal que origina una actividad biológica que puede ser peligrosa para las membranas y que por tanto hay que evitar.

Esta situación se puede producir incluso en el caso de tomas de agua de pozo de excelente calidad y por tanto con un SDI muy bajo, y obligan a la desinfección de los filtros con hipoclorito sódico, a veces con cierta frecuencia.

En estas circunstancias puede estudiarse si es conveniente realizar la filtración sobre arena, pudiéndose prescindir de los filtros, para lo cual se suele dotar a las instalaciones de un colector adecuado para realizar esta operación.

10.8.2. Sustitución de materiales

Los filtros de arena pierden material filtrante por dos causas principales:

— Por rotura de las boquillas de los colectores de recogida del agua filtrada.

— Como consecuencia de los procesos de lavado.

La primera no es muy frecuente pero es la que ocasiona mayores trastornos. Dado que el material que pasa a través de los huecos de las boquillas llega al depósito o colector de agua filtrada y de allí a los filtros de cartucho, puede también ocasionar problemas a estos, al incrustarse en ellos o por rozamiento, obligando al cambio de los cartuchos.

En algunos casos se han producido averías mayores al llegar la arena a las membranas de ósmosis y a las bombas de alta presión a las que puede erosionar.

Por ello antes de realizar el llenado de los filtros debe comprobarse el perfecto estado de todas las boquillas eliminando aquellas que planteen algunas dudas.

En el caso de los filtros a presión a veces pueden producirse roturas de boquillas, por sobrepresiones producidas en el proceso de filtrado.

Una vez detectadas las fugas de arena resulta relativamente fácil localizar la boquilla defectuosa ya que constituye un camino preferencial para el paso del agua que se ve perfectamente en superficie por el remolino o burbujeo que se produce en torno a ella. Sin embargo la sustitución es más laboriosa puesto que hay que retirar la capa o capa de material filtrante colocado sobre ella, hasta alcanzar el falso fondo en el que se encuentran. El posterior relleno con el material filtrante es muy difícil hacerlo de manera homogénea.

Además todas estas operaciones son más fáciles de realizar con filtros abiertos que con filtros cerrados.

La segunda causa es no sólo muy frecuente sino casi inevitable. En el proceso de lavado hay una fase en que el agua se introduce en el filtro a contracorriente para provocar el desprendimiento de la suciedad adherida a los granos del material filtrante. Por muy bien que se regule la velocidad y caudales de lavado siempre se produce un pequeño arrastre que se elimina por el drenaje.

Además, con el tiempo, el material filtrante se impregna de suciedad y los lavados sucesivos no consiguen desprenderla, por lo que el filtro queda saturado.

En los dos primeros casos se produce una pérdida de calidad del filtrado que puede ser insuficiente para las exigencias del proceso. En el último hay además una pérdida de carga permanente que afecta a los caudales y presiones.

En dichos casos se procede a sustituir el material filtrante o a rellenar los filtros parcialmente para que el lecho de filtración alcance el espesor de diseño.

Hay otra situación que se produce a veces en las instalaciones con toma de agua abierta, como consecuencia del desconocimiento que se tiene de la calidad de ésta hasta el mismo momento de arranque de la instalación.

El diseño de los filtros y la elección del material correspondiente se suele hacer en base a análisis que se hacen sobre el terreno y que pueden resultar muy diferentes de la situación real que se produce, cuando se extraen los elevados caudales que requiere la instalación.

La calidad del filtrado no es entonces la adecuada y en muchos casos para mejorarla no hace falta cambiar todo el lecho filtrante, sino que basta con retirar la capa superficial de 15-20 cm y sustituirla por otra de material algo más gruesa.

De esta forma se consigue un efecto de filtración en profundidad que mejora considerablemente el producto.

10.9. Filtros precapa

Un aspecto importante de la utilización de filtros precapa es el conocimiento de los mecanismos de formación y de eliminación de ésta. La precapa supone una protección de los filtros de cartuchos y membranas, pero su duración es limitada. La suciedad o contaminación del agua es fundamental en su duración. Cuando las pérdidas de carga alcanzan un valor importante, alrededor de 1 kg/cm^2, es necesario remover la precapa existente y sustituirla por una nueva.

La duración de una precapa es muy variable, pero en las tomas de agua abiertas, que es en las únicas que tiene justificación su uso, puede variar entre un máximo de una semana y un mínimo de un día.

Se precisa de dos depósitos auxiliares y las correspondientes bombas, integradas dentro de un circuito de regulación.

10.9.1. Aplicación de la precapa

La precapa se prepara en un depósito auxiliar en el que se mezcla el producto con agua, agitando con un electroagitador de velocidad lenta para formar una solución pastosa.

En otro depósito se almacena el agua que se va a utilizar para el mantenimiento de la precapa, que se prefiere sea agua filtrada.

Se impulsa este agua al filtro y en un punto de este colector de alimentación se inyecta la precapa a través de su correspondiente bomba. Cuando el filtro es pequeño la solución de precapa se inyecta directamente al filtro. La alimentación al filtro se hace desde la parte inferior, en sentido ascendente.

Se recircula sobre el filtro a una velocidad suficientemente alta para que todo el material de la precapa quede en suspensión y pueda aplicarse y ser retenido de una manera uniforme en todo el soporte. Para realizarla es por tanto necesario un colector que conecte la salida del agua filtrada procedente de la aplicación de la precapa al tanque de preparación de ésta.

Si la velocidad no fuera alta la precapa no sería uniforme, quedando muy gruesa en la parte inferior del cartucho y muy delgada en la parte superior.

Para garantizar esta uniformidad a veces se coloca una nueva bomba que aspira la precapa del interior de la parte superior del interior del filtro y lo recircula inyectándolo de nuevo en la entrada de éste.

10.9.2. Proceso de filtrado

Una vez colocada la precapa se pone en funcionamiento el filtro, actuando ésta como material filtrante.

Debido al pequeño tamaño de los granos de la precapa (4-30 micras), las partículas en suspensión en el agua, de 1 a 50 micras, se depositan sobre ella y formarían otra precapa que podría ser muy poco permeable y que aumentaría de forma rápida las pérdidas de carga de la instalación.

Para evitar la formación de esta capa, se añade de una forma continua durante el filtrado una pequeña cantidad del material de la precapa, que al mezclarse con las partículas controla el espesor de la capa y su permeabilidad.

La formación de esta película es inevitable, por lo que al iniciarse el proceso de filtración el espesor de la precapa puede ser de unos 3-5 milímetros y al final de 2-3 cm.

Cuando se produce una parada accidental de la alimentación de agua, el filtro que está sometido a presión experimenta un golpe de ariete y parte de la precapa puede desprenderse, por lo que en cada parada hay que realizar una renovación completa de la precapa, para asegurarse de su validez.

Esto puede solucionarse mediante una bomba auxiliar o conectando con un colector de agua presurizado y provisto de una válvula automática que se abra en tales circunstancias y permita mantener la presión del filtro.

10.9.3. Renovación de la precapa

Con el tiempo el material retenido obstruye buena parte de los huecos de la precapa. Los materiales retenidos crean una presión diferencial que cuando alcanza un determinado valor, hay que proceder a su renovación.

El lavado del filtro por así decirlo consiste en este caso en la eliminación de la masa de la precapa (*cake* en la terminología inglesa), y su sustitución por otra limpia. En los filtros tubulares la precapa es lavada a contracorriente, mientras que en los del tipo de hoja se elimina por limpieza superficial.

El mayor problema es la rotura y desprendimiento de la densa capa que ha quedado pegada a los filtros.

Se alimenta el filtro con agua a contracorriente de forma violenta que desde el interior presiona la precapa hasta su rotura, enviándose el material desprendido a drenaje, o se lleva a unas eras de secado para su posterior transporte a vertedero. La rotura de la precapa puede hacerse también con aire a presión.

10.10. Otros elementos de protección

En la toma de agua pueden producirse situaciones no previstas al construir la instalación desaladora, y que no se detectan hasta la terminación de la obra.

Generalmente están asociadas a la captación de agua en los pozos o tomas superficiales y se trata de la aparición de arenas que dificultan el pretratamiento y pueden erosionar las bombas, o algas que obstruyen éstas e incluso las rejillas que se han colocado como protección.

Las bombas representan una parte importante de la inversión, cuyo control sin embargo termina muchas veces con su montaje. Hay muchos elementos que le hacen perder eficiencia como arena, gravilla, precipitados, residuos, etc.

En tomas superficiales las aspiraciones de las bombas deben protegerse para evitar obstrucciones que ocasionan daños a la bomba y cavitación. Deben protegerse todas las bombas importantes para mantener su eficiencia elevada y evitar los efectos de la abrasión por las partículas que el agua transporta.

Los filtros autolimpiantes en la aspiración de las bombas mantienen fuera de éstas toda clase de material extraño.

Se trata de filtros formados por un cilindro cuyas paredes están constituídas por mallas de un paso determinado en función de las características del material a separar, conectado por su parte central a la citada aspiración.

Una pequeña parte del caudal de descarga de la bomba se desvía a un brazo provisto de pequeños aspersores que gira impulsado por la presión del agua en el interior del cilindro, limpiando continuamente la superficie de ésta desde su parte interior.

Con esta técnica se eliminan los procedimientos de limpieza manual, y además estos filtros no añaden pérdida de carga ni reducen el caudal de la bomba. Estos filtros se emplean también para la eliminación de algas. Las mallas más frecuentes están entre 10 y 30 mesh y sus capacidades están comprendidas entre 0,2 y 200 lps.

También se emplean separadores de arena instalados en la aspiración de una bomba sumergible o turbina de un pozo de agua.

En otros casos se utilizan antes de los filtros de arena filtros de tipo hidrociclón, que son depósitos cilíndricos en los que el agua entra tangencialmente, con lo que adquiere un movimiento circular de alta velocidad. Como consecuencia del centrifugado que se produce, las partículas de arena se distribuyen en láminas concéntricas cuya velocidad disminuye por rozamiento desde la pared hasta el centro del filtro.

En este punto de velocidad cero se produce la decantación de las arenas que son retiradas por la parte inferior del filtro.

Estos filtros deben ser de alta resistencia debido a las tensiones a que están sometidos por el movimiento giratorio del agua, por lo que se contruyen de chapa metálica recubierta de una película protectora de la corrosión.

Son filtros muy eficaces, que separan más del 98 % de las arenas, pero por sus características no suelen construirse de grandes tamaños (50 l/s). Para capacidades menores se pueden construir de materiales plásticos.

Debe vigilarse su corrosión, fundamentalmente por abrasión, para evitar que el hierro pueda llegar a las membranas. También se pueden arbitrar otras medidas de protección sobre el mismo pozo.

La técnica consiste en controlar el flujo de aspiración de la bomba teniendo en cuenta que la mayor parte del agua que afluye a un pozo procede de la zona más próxima a la aspiración de ésta.

Para distribuir el flujo entrante en una mayor área vertical del pozo, se puede colocar en la aspiración de la bomba un accesorio a modo de pantalla construido con tubería de PVC con orificios. De esta forma se reduce la velocidad del agua entrante en cualquier punto, y se retarda la entrada de arena, mejorando la utilización de los estratos que rodean el pozo, que son los productores de agua.

Este mismo accesorio reduce también el descenso del cono de aspiración de la bomba, por lo que en casos en que el caudal del pozo es muy ajustado, se evitan las paradas por baja presión en la aspiración.

10.11. Utilización de los pretratamientos físicos

El grado de limpieza del agua que se consigue con uno u otro sistema de filtración es bien distinto, por lo que es la propia sensibilidad de los sistemas de desalación la que determina el tipo o tipos de filtros a instalar.

Al ser las membranas de ósmosis inversa tan delicadas o sensibles al ensuciamiento, necesariamente han de llevar filtros de arena simples o multicapa y filtros de cartucho de al menos 5 micras de selectividad.

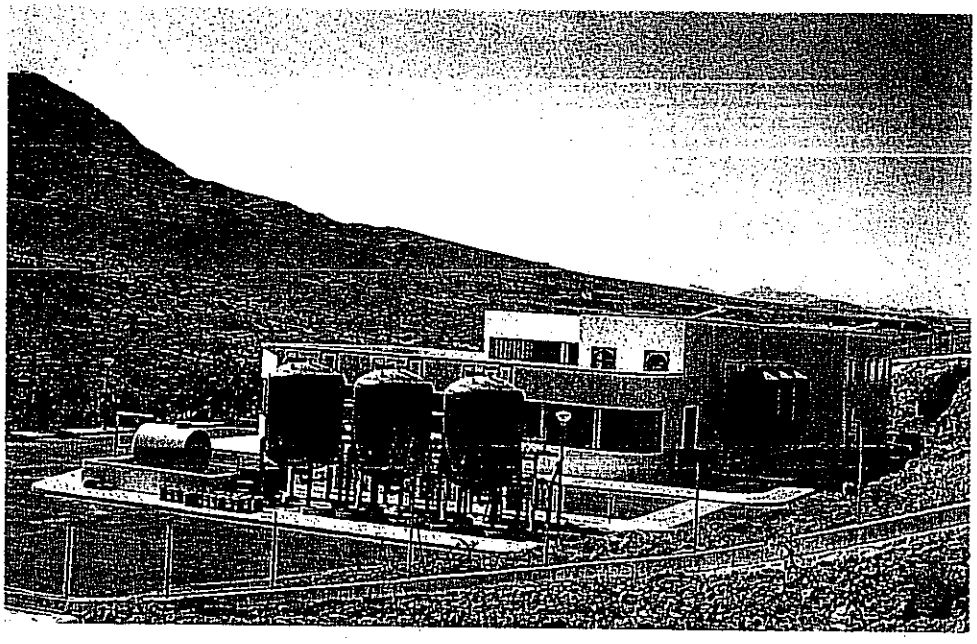


Fig. 10.10 Instalación de doble etapa de filtración.

En tomas de agua abiertas o en las que es previsible algún tipo de contaminación, puede ser necesario recurrir a una segunda etapa de filtración mediante arenas o incluso instalar entre los filtros de arena y los de cartuchos, unos filtros de precapa.

Cuando se utiliza una segunda etapa, la velocidad de filtración de ésta debe ser mayor que la de la primera, por lo que el número de filtros, en caso de ser de la misma capacidad, será menor.

CAPITULO 11

CONSIDERACIONES ENERGETICAS

11.1. Introducción

Las instalaciones de ósmosis inversa utilizan como fuente de energía la presión, que se aplica mediante una bomba. Por tanto requieren una energía externa al proceso, que viene reflejada en el consumo de combustible o en la electricidad que se necesita para mover el correspondiente motor.

No permiten, como ocurre con determinadas instalaciones de desalación por evaporación, su acoplamiento a otras fuentes de producción de vapor o el aprovechamiento de calores residuales.

Sin embargo a pesar de ello el consumo energético de estas instalaciones es el más bajo que en la actualidad puede conseguirse con la tecnología disponible.

Uno de los grandes desarrollos de la tecnología de ósmosis inversa que ha sido el principal valedor de su expansión de los últimos años ha sido la constante reducción de los consumos energéticos, fundamentalmente por el descubrimiento de membranas cada vez más eficientes y que por tanto necesitan menos presión para trabajar, pero también por los avances en los diseños de ingeniería y en las mejoras de los equipos mecánicos y eléctricos.

Cualquier instalación moderna de ósmosis inversa, tanto de agua salobre como de agua de mar, está consumiendo en la actualidad prácticamente la mitad de lo que consumía hace 15 ó 20 años.

Aunque estas mejoras no se han conseguido con ninguno de los otros sistemas de desalación en uso, todavía el margen de reducción parece importante habida cuenta de la importante diferencia que existe entre la presión osmótica de la solución que se pretende desalar y la que hay que aplicar al proceso para tener unos caudales económicamente interesantes.

El consumo energético es el caballo de batalla de todas las tecnologías de desalación, por su completa dependencia de unas fuentes escasas y en la mayoría de los casos no disponibles en los países en que se instalan plantas desaladoras.

Aunque a lo largo de los últimos 30 años ha habido grandes variaciones en el precio internacional de la energía, expresado en el coste del barril de petróleo, tras las diversas inflexiones producidas a raíz de conflictos bélicos que han afectado directa o indirectamente a los países productores de petróleo, en los últimos años parece que se ha estabilizado.

En nuestro país, con una fuerte dependencia energética del exterior, los distintos intentos de desarrollar una ley que tras analizar profundamente los costes reales de producción de electricidad por parte de las empresas eléctricas, y las infraestructuras de transporte, de carácter público, determinara unas nuevas tarifas eléctricas a la baja, han sido lentos.

El elevado precio de la electricidad ha sido sin embargo positivo, puesto que ha permitido estudiar la introducción de equipos y diseños que en otras circunstancias quizás no hubieran tenido una especial motivación, como ha ocurrido por ejemplo en los países del Golfo Pérsico.

Gracias a ello podemos analizar actualmente esas innovaciones que ya se ofrecen como parte indispensable de una instalación de desalación moderna.

11.2. Energía mínima de separación

Los procesos de membranas requieren menos energía que el equivalente sistema térmico de separación.

Para extraer un litro de agua pura a 25 °C, de un volumen ilimitado de agua de mar se necesita un mínimo de 0,7 kcal; éste es el mínimo de energía termodinámico o teórico; y es el valor más pequeño posible independientemente del método de separación.

Pero este mínimo aumenta con la temperatura, así a 70 °C es de 0,81 kWh y a 0 °C sólo de 0,65 kWh. Además, estas cifras se refieren a procesos ideales sin ningún tipo de pérdidas, lo que en la práctica es imposible de conseguir.

Cualquier tipo de proceso experimenta pérdidas por fricción, los equipos mecánicos o eléctricos que utiliza son imperfectos, y existen otro tipo de pérdidas que no se han tenido en cuenta en las cifras anteriores.

Sólo se puede acercar a este límite mínimo cuando todos los pasos de un proceso son reversibles, es decir, cuando se está cerca del equilibrio y los procesos se realizan de una forma extremadamente lenta, lo que requeriría instalaciones de unos tamaños enormes y muy caras y nuevos diseños para trabajar eficientemente en estas condiciones.

Puede incrementarse la velocidad operando con grandes diferencias de temperatura, pero la desviación frente al equilibrio y la reversibilidad representa un gran coste de energía. Por ejemplo la extracción de un litro de agua por destilación requiere unas 540 kcal, de las cuales sólo una parte pueden recuperarse en un intercambiador de calor.

La evaporación y condensación también se podrían llevar a cabo de manera que fueran casi reversibles, realizando ambos procesos a la misma presión y temperatura. Sin embargo, bajo estas condiciones los procesos térmicos son muy lentos y requieren muchos aparatos.

Cuando la energía se aplica en forma de calor, hay que considerar que solo una parte de éste se puede transformar en trabajo, dependiendo este porcentaje del tipo de proceso. Por ejemplo, en la conversión de calor en energía eléctrica, las modernas centrales térmicas apenas alcanzan una eficiencia del 30 al 40 %.

Por otra parte las membranas funcionan muy bien cerca del equilibrio. Este litro de agua puede separarse por ósmosis inversa gastando unas tres kilocalorías, es decir, sólo unas cuatro veces el mínimo de energía.

11.3. Energía del proceso de ósmosis

La energía que se consume en el proceso de ósmosis inversa procede de diferentes medios.

Si analizamos el funcionamiento mecánico de una instalación, podemos descubrir fácilmente que el origen principal de este consumo está en los siguientes aspectos:

a) Energía termodinámica mínima que se requiere para realizar el proceso de ósmosis.

b) Exceso de presión que se precisa para producir un flujo efectivo a través de la membrana.

c) Aumento de la energía para vencer la concentración de la polarización.

d) Energía que se pierde en el caudal de rechazo.

e) Necesidades de bombeo para producir un barrido de partículas y sales que se concentran sobre la superficie de la membrana y minimice la concentración de la polarización.

Pero junto a ellos, existen otros consumos no tan importantes que se añaden al conjunto, y que proceden de los distintos elementos mecánicos que forman parte de la instalación aunque no participan específicamente en el proceso de ósmosis inversa, como son:

f) Energía para desplazar el agua desde la toma hasta la instalación.

g) Energía para conducir el agua producida al depósito de almacenamiento.

h) Energía de los equipos de dosificación de reactivos.

i) Energía de los equipos de lavado de filtros y membranas.

j) Energía de consumo interno de la instalación.

k) Energía perdida en la red eléctrica y transformadores.

Pasemos pues a analizar cada uno de los puntos más importantes:

a) La energía termodinámica mínima que se requiere para realizar el proceso de ósmosis inversa viene determinada por la relación entre las actividades o concentraciones del agua en el medio salino y en el producto que, como ya se ha expuesto, depende del porcentaje de recobro de agua.

La relación entre energía libre y actividad viene dada por:

$$\text{Energía libre por mol} = -RT \ln a$$

En los sistemas de agua de dos componentes la actividad se obtiene directamente de tablas en función del coeficiente osmótico.

Si hay una sal predominante, el valor del coeficiente osmótico para esta sal puede determinarse aproximadamente mediante la fuerza iónica de la mezcla.

En soluciones con muchas sales, y especialmente en soluciones diluidas, dicho coeficiente es próximo a la unidad y puede despreciarse en aplicaciones prácticas.

Dicho coeficiente para el caso del agua de mar ha sido determinado por Stoughton y Lietzke.

En la práctica su determinación también puede hacerse teniendo en cuenta que la presión osmótica de una solución depende de la presión y la temperatura y viene expresada por la ecuación de Van't Hoff:

$$\Pi = \phi \, nNRT$$

siendo

ϕ el coeficiente de presión osmótica (aproximadamente 0,9 para el ClNa).

Π la presión osmótica en atm.

n el número de partículas por molécula de soluto.

N la concentración molar del soluto en moles por litro.

R la constante de los gases en at/(moles/litro)/°K.

T la temperatura absoluta en °K.

La energía unitaria necesaria para equilibrar el proceso de ósmosis vendrá dada por $\Pi \cdot V_l$, en la que V_l es la velocidad del líquido.

b) Pero una vez equilibrada la presión osmótica, es necesario conseguir un flujo efectivo a través de la membrana. Para ello debe existir una diferencia de pre-

sión a través de ella que sea superior que la diferencia de presión osmótica a ambos lados de la membrana.

El consumo de energía correspondiente a este exceso de presión viene dado por $P_{ef} \cdot V1$. P_{ef} es en este caso la diferencia entre la presión aplicada y la osmótica. Dicho exceso de requerimientos energéticos depende mucho de la membrana.

Así por ejemplo, con las membranas existentes en la actualidad y agua de mar, este exceso de energía consumido es varias veces mayor que las necesidades energéticas mínimas.

Por ejemplo a 25 °C la presión osmótica del agua de mar es de unas 25 atm, mientras la presión que se aplica normalmente a los sistemas es de 60 a 70 atm.

Al aumentar la presión efectiva y el flujo, la superficie de membrana necesaria para producir un caudal determinado disminuye, pero la energía en exceso consumida aumenta.

El consumo de energía para el transporte de agua a través de la membrana es relativamente independiente de la salinidad del agua de alimentación.

Esto puede considerarse un inconveniente para el uso de la ósmosis en el tratamiento de aguas de baja salinidad y una desventaja frente al uso de la electrodiálisis en la que el exceso de energía varía rápidamente con la salinidad.

Sin embargo y puesto que las soluciones menos salinas necesitan menos energía para la eliminación de sales que el agua de mar, este incremento del transporte puede conseguirse mediante una reducción en el rechazo de las membranas.

También la investigación de membranas con poros más grandes, que permiten flujos importantes a presiones bajas, reduce el consumo energético.

c) Cuando hay concentración de polarización en la superficie de la membrana, las necesidades energéticas aumentan porque la actividad del agua a tener en consideración es la de la solución adyacente a la membrana.

Sin embargo la concentración de la polarización viene determinada por las variables de diseño, que tratan de optimizarse.

Desde el punto de vista de las necesidades energéticas, se permite una mayor concentración de polarización en aguas de baja salinidad que en agua de mar.

d) En ósmosis una parte del agua que debe ser presurizada no atraviesa la membrana, sino que la abandona a una presión ligeramente inferior. Existe por tanto una energía libre que se pierde en el agua de rechazo.

Dado que el volumen de rechazo puede ser superior al de producto, como ocurre en las instalaciones de desalación de agua de mar, la energía perdida en éste puede ser por tanto mayor que la consumida en el proceso de ósmosis.

Su energía vendrá dada por $P_r.V_2$ (P_r = presión en el rechazo; V_2= velocidad del rechazo).

e) Por último el agua que alimenta a la membrana debe estar dotada de una cierta velocidad de circulación para producir el arrastre de las sales que se acumulan junto a la superficie de la membrana y evitar el fenómeno de concentración de polarización. Existe por tanto un consumo de energía adicional para producir este fenómeno.

11.4. Factores que afectan al consumo energético

Una vez conocido dónde se produce el consumo de energía, al margen de los equipos que constituyen la instalación, los principales factores que pueden influir en el consumo energético de una instalación de ósmosis inversa son:

11.4.1. Presión osmótica

El factor que más directamente afecta al consumo energético del proceso es la presión osmótica del agua de alimentación, que como sabemos está relacionada con su salinidad.

Para conseguir caudales de permeado razonables es normal trabajar a presiones entre 20 y 30 atm por encima de la presión osmótica.

11.4.2. Temperatura

La temperatura tiene también varios efectos sobre el consumo energético.

En primer lugar, como hemos visto anteriormente, la presión osmótica es directamente proporcional a la temperatura absoluta, de acuerdo con la citada ecuación de Van't Hoff.

Este efecto, aunque real, no es muy importante, dado que el rango normal de variación de las temperaturas en las instalaciones de ósmosis no es grande.

Pero es mucho más importante su influencia en el coeficiente de transporte de masa A, que viene dado por:

$$A = A_0 \cdot e^{-U(1/T_0 - 1/T)}$$

Siendo

A el coeficiente de transporte del agua en $cm^3/cm^2 \cdot atm$.

A_0 es el coeficiente de transporte de masa a la temperatura de referencia.

U es un coeficiente empírico que para las membranas TFC es aproximadamente 2160 $°C^{-1}$.

T_0 es la temperatura de referencia en °K.

T es la temperatura de operación del sistema en °K.

Aunque este efecto no es completamente lineal, para un rango estrecho de temperaturas viene a significar un 2,5% de incremento por cada °C de aumento de la temperatura.

Según ello este efecto reduce el consumo de energía necesaria por unidad de volumen de permeado.

Sin embargo en la práctica la energía que hay que aplicar para calentar el agua 1 °C es muy superior al ahorro que se consigue a dicha temperatura en el proceso de ósmosis. Sólo en caso de disponer de vapor residual podría utilizarse en este proceso, aunque existen inconvenientes de otro tipo ya explicados en otra parte, que también hay que analizar.

11.4.3. Conversión

Es el principal factor que desde el punto de vista del diseño influye en la conversión. Además al contrario de los anteriormente citados en que la capacidad de influencia externa es limitada, en éste sí puede existir una cierta capacidad de maniobra.

Cuando la conversión aumenta, la cantidad de energía que se pierde en el concentrado disminuye y, en consecuencia, como aumenta la parte de energía que se dedica a la producción del permeado, las necesidades energéticas disminuyen. Esta disminución es paralela a un aumento de la salinidad del agua producto que puede ser importante y que es consecuencia del aumento de la concentración media del sistema.

En el caso de conversiones elevadas, frecuentes en las aguas salobres, del 80-90 %, la energía potencialmente recuperable es tan pequeña que no compensa generalmente la utilización de dispositivos de recuperación de energía.

Pero existe una limitación en el valor de la conversión, que en el caso de aguas salobres viene dada por la presencia de algún ión, y en el agua de mar por la presión osmótica del concentrado o la calidad del permeado.

11.4.4. La calidad del permeado

No tiene un efecto directo en el consumo energético, pero sí varios efectos indirectos.

a) Al operar a baja presión se reducen las necesidades energéticas, pero aumenta la salinidad del permeado; lo que puede imponer una presión mínima de trabajo.

b) Al aumentar la conversión, también lo hace la concentración media alimentación/concentrado, que también incrementa la salinidad del permeado, y que lógicamente también puede ser una limitación.

c) Por último la calidad del producto puede ser tal que requiera una segunda etapa.

11.4.5. Las pérdidas de carga

El rozamiento del fluido en los colectores y en las membranas disminuye la cantidad de energía recuperable en el concentrado. Para contrarrestarlo se requiere un incremento en la presión de alimentación.

El incremento en la velocidad del flujo en los canales de alimentación y concentrado o el uso de separadores que provocan turbulencia, aumentan estas pérdidas aunque disminuyen la concentración de sales en la superficie de la membrana.

Esta reducción en la presión osmótica efectiva también reduce las necesidades de presión y por tanto energéticas.

La relación entre los flujos de agua de alimentación y salmuera también tienen un efecto importante en las necesidades energéticas.

Por último el ensuciamiento de la membrana por causas físicas o biológicas contribuye a incrementar esa pérdida de carga y también el consumo.

Pero también hay factores que están ligados a la selección *de los equipos, como es la eficiencia.* En particular la de las bombas de alta presión tiene una enorme influencia en dicho consumo energético.

Con bombas de desplazamiento positivo se pueden conseguir eficiencias bomba-motor hasta del 90 % mientras en bombas centrífugas verticales en ocasiones no se alcanza sino el 60 %

11.4.6. Los sistemas de recuperación de energía

Ya citados con anterioridad, producen un ahorro importante en el consumo de ésta. Aunque para agua de mar es normal trabajar a conversiones del 40 al 45 %, la mayor reducción en el consumo energético, utilizando sistemas de recuperación de energía se consigue para conversiones del 30 %, aunque la inversión en bombas en este caso es superior.

Según lo expuesto hasta aquí se comprende que en la reducción del consumo energético de una instalación el ingeniero consultor o proyectista puede actuar desde alguno de los ángulos siguientes:

— En el diseño.
  - Hidráulica.
  - Conversión.
  - Pretratamiento.

— En las membranas.
  - Menores presiones de funcionamiento.
  - Flujo y rechazo de sales.

— En los equipos.
  - Eficiencias elevadas.
  - Sistemas de recuperación de energía.
  - Variadores de velocidad.

— En las condiciones del agua.
  - Actuando sobre la temperatura.
  - Actuando sobre la salinidad.

11.5. Mejora del rendimiento energético

Desde los viejos sistemas de destilación MSF, que actuando de forma individual tenían consumos superiores a los 40 kWh/m^3, todos los avances en los sistemas de desalación han conducido en última instancia al ahorro de energía.

La desalación por ósmosis inversa supuso desde el principio un salto cuantitativo en el consumo de energía, pero también en el curso de los años se ha ido reduciendo y si las primeras instalaciones de agua de mar de los años 70 consumían más de 8 kWh/m^3, las más modernas apenas llegan a los 4 kWh/m^3.

Esa mejora del rendimiento energético desde el punto de vista tecnológico se debe tanto a las membranas como a los equipos mecánicos.

11.5.1. Membranas

Las membranas actuales nada tienen que ver con las de hace 10 ó 15 años, y si en aquellos momentos los esfuerzos de investigación se volcaban en la mejora del rechazo de sales, posteriormente los avances han sido en la reducción de la presión de funcionamiento y en el aumento del caudal, y ambos aspectos tienen una relación directa con el ahorro de energía.

Las primeras membranas de agua salobre, tanto las de acetato de celulosa como las posteriores de poliamida, trabajaban a presiones entre 30 y 40 kg/cm^2, que posteriormente descendieron para las mismas condiciones de funcionamiento a unos 25-28 kg/cm^2.

Nuevas membranas de baja presión llevaron dichos valores en torno a los 18-20 kg/cm^2 y las membranas más recientes de presión ultrabaja o de nanofiltración funcionan por debajo de los 15 kg/cm^2 de presión y en algunos casos incluso por debajo de los 10 kg/cm^2.

Por tanto si hace 15 años se hablaba de consumos de energía en instalaciones de agua salobre entre 2 y 3 kWh/m^3, en la actualidad dichos consumos han descendido hasta 0,7 a 1,5 kWh/m^3.

En cuanto al agua de mar eran normales las presiones de operación de 65 a 68 kg/cm^2 en membranas en espiral, que en el caso de fibra hueca podían subir hasta 72 ó 76 kg/cm^2.

Aunque la tecnología puesta a punto para las membranas de agua salobre que permite una reducción tan drástica de las presiones no ha sido todavía adaptada a las membranas de agua de mar, las reducciones también son importantes y en la actualidad se trabaja normalmente con presiones iniciales entre los 58 y 60 kg/cm^2.

Estos 4 a 6 kg/cm^2 menos de presión pueden suponer ahorros energéticos de 0,5 a 0,75 kWh/m^3.

11.5.2. Equipos para mejora del rendimiento energético

El agua a tratar se introduce en las membranas a una presión que depende de su salinidad y se divide en dos corrientes principales: en una de ellas el producto sale a presión prácticamente atmosférica y, en la otra, el rechazo abandona las membranas a una presión elevada, ligeramente inferior a la de entrada, como consecuencia de la pérdida de carga que se produce en el interior de la misma.

Como a esta elevada presión no puede ser eliminada del sistema, se coloca en la salida del rechazo una válvula de aguja que actúa como elemento de control, para provocar una pérdida de carga importante y reducir la alta presión hasta unos 1,5-2,5 kg/cm^2.

Este rechazo o salmuera, que de esta manera no se aprovecha, es el que debe utilizarse para recuperar la energía hidráulica que contiene, antes de evacuarla de la instalación.

La energía que se puede recuperar es función de dos parámetros:

— Caudal del rechazo.

— Presión de funcionamiento de la instalación.

Cuanto más elevados sean ambos, mayor será la recuperación de energía.

En consecuencia las instalaciones de agua de mar, en que las recuperaciones son menores (35-50 %) y las presiones de funcionamiento elevadas (58-75 kg/cm^2), son las más idóneas para la utilización de elementos de recuperación de energía.

En estas circunstancias puede recuperarse un 30-40 % de la energía necesaria para el proceso.

En las de agua salobre con recuperaciones más elevadas (70-90 %) y presiones de funcionamiento menores (20-40 kg/cm^2) las posibilidades de recuperación

energética son más limitadas por lo que vale la pena plantearse si realmente es interesante económicamente su recuperación.

Bombas

En una instalación de ósmosis inversa hay tres tipos de bombas importantes, las de la captación de agua, las de alta presión y las de impulsión del producto. El reparto del consumo energético de la instalación entre estos tres equipos es el siguiente:

— Bombas agua de mar: 11-12,5 %.

— Turbobombas de alta presión: 78-80 %.

— Bombas impulsión producto: 7- 9 %.

Por tanto los mayores esfuerzos para reducir el consumo energético deben realizarse sobre las bombas de alta presión.

Las bombas que suministran la presión al proceso consumen una energía que depende del caudal de alimentación a las membranas y de la presión de operación de éstas.

Las bombas encargadas de realizar este trabajo, pueden ser muy distintas como hemos visto en un capítulo anterior, y las eficiencias o rendimientos de las mismas son variables en función del tipo de diseño, las presiones de funcionamiento y el caudal que impulsan.

Los mayores rendimientos se obtienen para las bombas que trabajan a mayores presiones y con mayores caudales, pero como existe una limitación en el tamaño de las bombas, la elección del tamaño del bastidor, que se hará en función de una serie de circunstancias no siempre técnicas, es el que determinará la eficiencia final y el consumo energético real.

Equipos de recuperación

Una vez decidida la instalación de un sistema de recuperación de energía es necesario utilizar el equipo adecuado a las características de la instalación.

Los equipos más utilizados para la recuperación de energía en las instalaciones de ósmosis inversa son como ya se ha citado en otro lugar:

— Turbobombas compactas.

— Bombas invertidas.

— Turbinas Pelton.

— Turbo-charger.

— Bomba-turbina Pelton integrada.

a) *Turbobombas compactas*

Fueron quizás las primeras utilizadas en este tipo de instalaciones, y consisten en una bomba centrífuga de alta presión y una turbina, ambas multietápicas integradas en una carcasa única.

Los colectores de aspiración e impulsión de cada una de ellas están conectados directamente entre sí. El eje de ambas unidades es único y conecta con el eje del motor de impulsión, lo que simplifica bastante el sistema de acoplamiento, aunque para incrementar la velocidad del motor se precisa de un multiplicador.

Son unidades muy compactas y por tanto de tamaño reducido, pero muy revolucionadas (6.000 rpm), por lo que pueden presentar problemas de mantenimiento y averías importantes.

Sus capacidades son asimismo limitadas, por lo que sólo se utilizan para módulos de tamaño medio.

Hoy día no se están utilizando tanto como prometían en un principio, habiéndose sustituido por otros elementos que ofrecen mayores garantías en la mayoría de los casos. Ocupan, sin embargo, menos espacio que las otras soluciones.

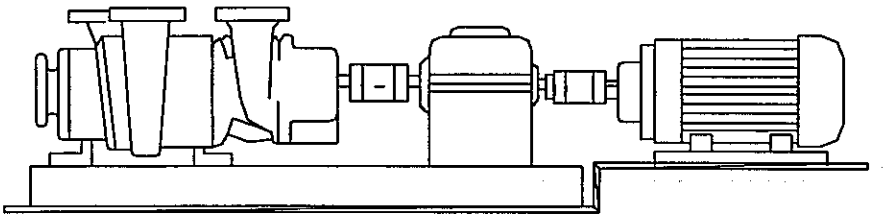


Figura 11.1. Acoplamiento turbobomba compacta-motor

b) *Bombas invertidas*

Se trata de bombas centrífugas multietápicas que se hacen funcionar en sentido inverso.

Pueden utilizarse por tanto bombas de cámara partida o de segmentos, siendo aconsejable que bomba y turbina sean del mismo tipo.

La entrada de agua a presión en la turbina se produce por su colector de impulsión, por lo que la energía que recupera hace girar el eje de la bomba en sentido contrario.

La bomba invertida se puede conectar directamente tanto al eje de la bomba de impulsión principal como al motor. En este último caso el eje del motor se construye con doble eje que se hace sobresalir por ambos extremos.

Sin embargo, cuando los equipos son de cierto tamaño, es aconsejable la colocación del motor en el centro de ambas bombas, pues el otro tipo de conexión obliga al eje de la bomba a soportar además las tensiones de la turbina.

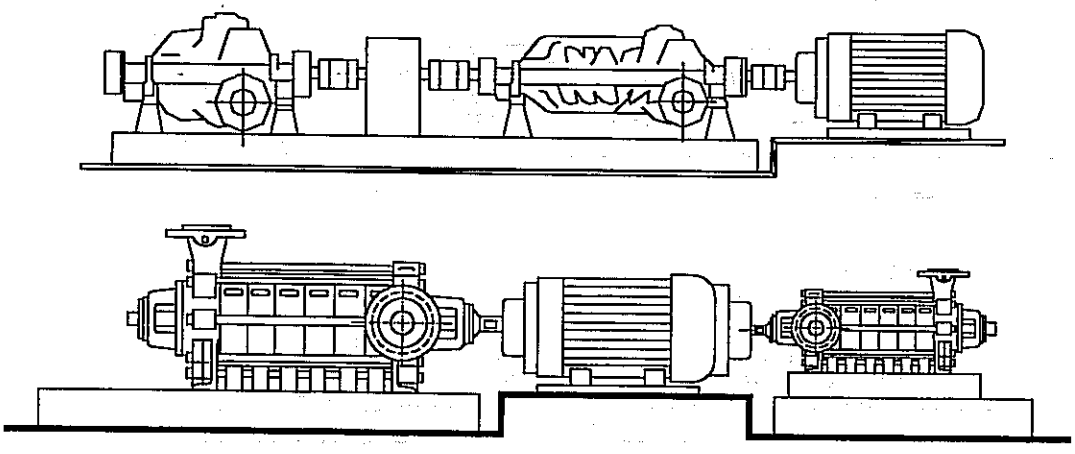


Figura 11.2. Formas de acoplamiento de turbobombas multietapa acopladas al motor.

La bomba y turbina que forman el equipo son de las mismas características, pero lógicamente la turbina es de menor tamaño puesto que sólo aprovecha el rechazo.

La eficiencia de la bomba y turbina son similares (72-86 %), únicamente diferenciadas en los porcentajes inherentes al tamaño de las mismas.

c) *Turbinas Pelton*

Consisten en una rueda giratoria provista de cubos o álabes en su circunferencia, colocada en el interior de una carcasa.

El agua a presión golpea los cubos y hace girar el eje de la turbina, que se conecta directamente al motor.

No se suele acoplar directamente a la bomba, porque generalmente las velocidades de ambos ejes en el punto de máxima eficiencia son diferentes.

Recupera por tanto energía mecánica que se utiliza generalmente para ayudar al motor de la turbobomba y reducir su potencia.

Se han utilizado desde hace tiempo, en general en instalaciones de tipo pequeño.

Algunos problemas que se presentaron inicialmente con la precipitación de sales dentro de la turbina, y el desgaste de los álabes a causa de las elevadas presiones que disminuían su eficiencia, limitó bastante su uso.

Finalmente, superados los problemas técnicos, empiezan a ser utilizadas en instalaciones de mayor capacidad.

Son los equipos de recuperación de mayor eficiencia puesto que se puede alcanzar hasta el 90 %, sin embargo su instalación es exigente, pues en caso contrario la eficiencia disminuye sensiblemente.

En este sentido el principal aspecto a solucionar es la construcción de una conducción de salida libre, que no presente ningún tipo de contrapresiones.

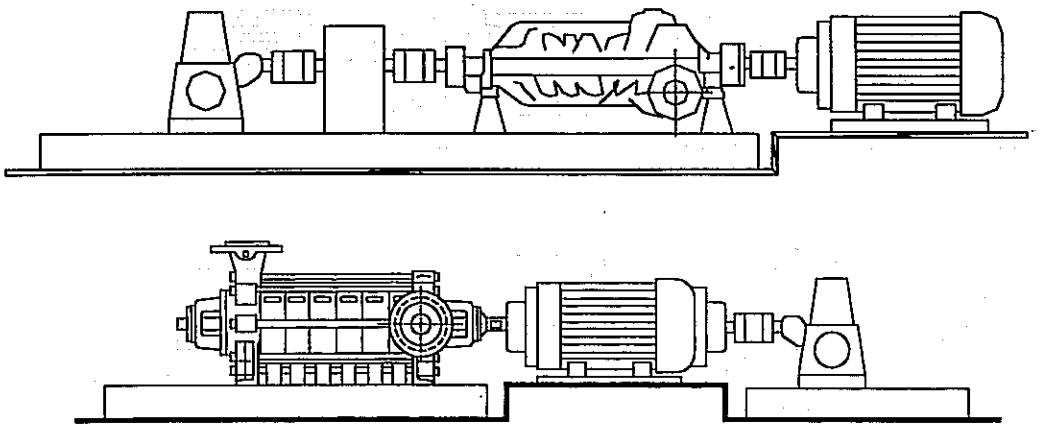


Figura 11.3. Formas de acoplamiento bomba-turbina Pelton-motor.

La mejor solución consiste en la construcción de una arqueta grande y bastante profunda conectada a un colector amplio y de salida libre.

d) *Turbo-charger*

Es un equipo de reciente introducción en el mercado y que en cierto modo se parece a la turbobomba integrada citada anteriormente, ya que dentro de una sola carcasa reúne ambos elementos de impulsión.

Son equipos de pequeñas dimensiones que permiten su empleo en distintas partes del circuito hidráulico, lo que permite su aplicación tanto a las bombas de alta presión como a las de media o baja en instalaciones de agua salobre.

Son muy compactas y, al igual que las citadas en primer lugar, muy revolucionadas.

Hasta el momento no tenemos conocimiento de su empleo en instalaciones de agua de mar de una cierta entidad aunque en teoría no hay ninguna razón técnica que se oponga a ello.

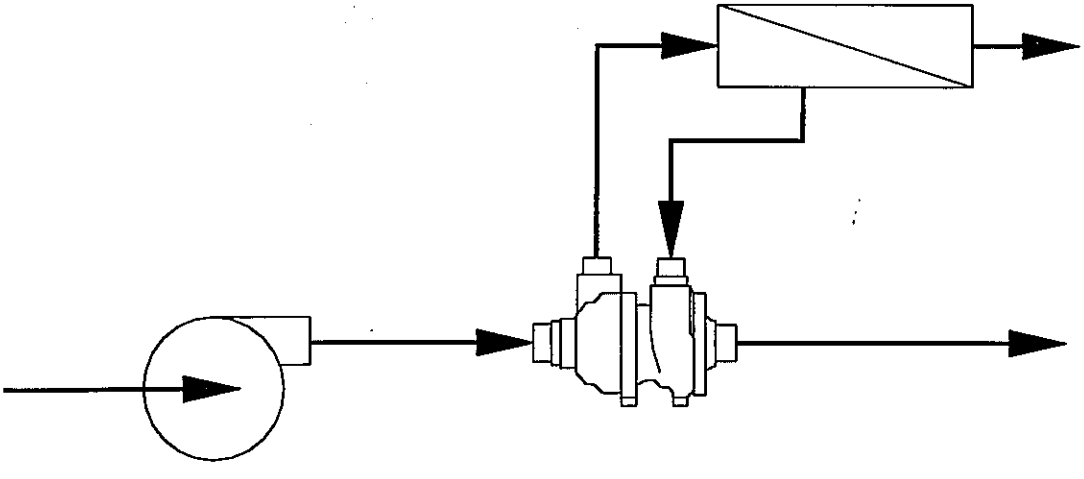


Figura 11.4. Acoplamiento del turbo-charger.

e) *Bomba-turbina Pelton monoblock (integrada)*

Siguiendo la inicial idea de la turbobomba integrada ya citada, trata de integrar sobre un eje único una bomba multicelular de cámara partida y una turbina Pelton, aprovechando las ventajas de uno y otro equipo.

Al contrario de las bombas integradas, la velocidad de este conjunto se ha reducido a las 3.000 rpm reduciendo los riesgos de averías que tenían los anteriores más revolucionados. Los cuerpos de ambos equipos son independientes y no tienen por tanto una carcasa común.

Su aparición en el mercado es bastante reciente por lo que no se dispone de excesivas referencias. Sin embargo parecen equipos bastante fiables, que ocupan menos espacio que el conjunto bomba-turbina Pelton, independientes y se sitúan a un solo lado del motor, que no necesita eje doble. Lo importante es que puedan aunar las eficiencias de ambas máquinas sin pérdidas de eficiencia en los internos.

Rendimientos de los equipos de recuperación

El conjunto bomba-turbina (turbobomba) es el que determina el consumo energético de la instalación, por lo que deben buscarse equipos de la mayor eficiencia. Esta eficiencia está ligada al tipo de máquina y al tamaño de la misma.

Habida cuenta que la bomba procesa la totalidad del caudal de alimentación a las membranas y la turbina sólo una parte del mismo variable entre el 30 y el 65 %, es de la mayor importancia la adecuada selección de la bomba.

En las instalaciones de ósmosis se emplean tanto bombas de desplazamiento positivo como centrífugas y dada la mayor eficiencia de las primeras, todo haría pensar que éste sería el tipo principal a usar.

Sin embargo la forma en que puede integrarse la bomba con la turbina es también importante y en base a ello se hace la selección. Las bombas de pistón tienen rendimientos elevados, en torno al 90 % y una limitación de tamaño.

Las centrífugas multietápicas no tienen dicha limitación, aunque sus rendimientos algo inferiores están ligados directamente a su capacidad. Por último las turbinas Pelton tienen rendimientos del 85 al 90 %.

Cuando se utiliza como turbina una bomba multicelular girando en sentido inverso, tiene más importancia la selección de la turbina, para que en función de las oscilaciones de la presión de entrada como consecuencia del ensuciamiento de las membranas, trabaje el mayor tiempo posible próxima a su punto de mayor eficiencia.

Al ser la eficiencia de la bomba que actúa como turbina menor que la de la bomba de alta presión y teniendo una curva menos tendida, pequeñas oscilaciones fuera del punto de diseño determinan pérdidas de eficiencia de varios puntos, lo que no ocurre en las bombas de alta presión.

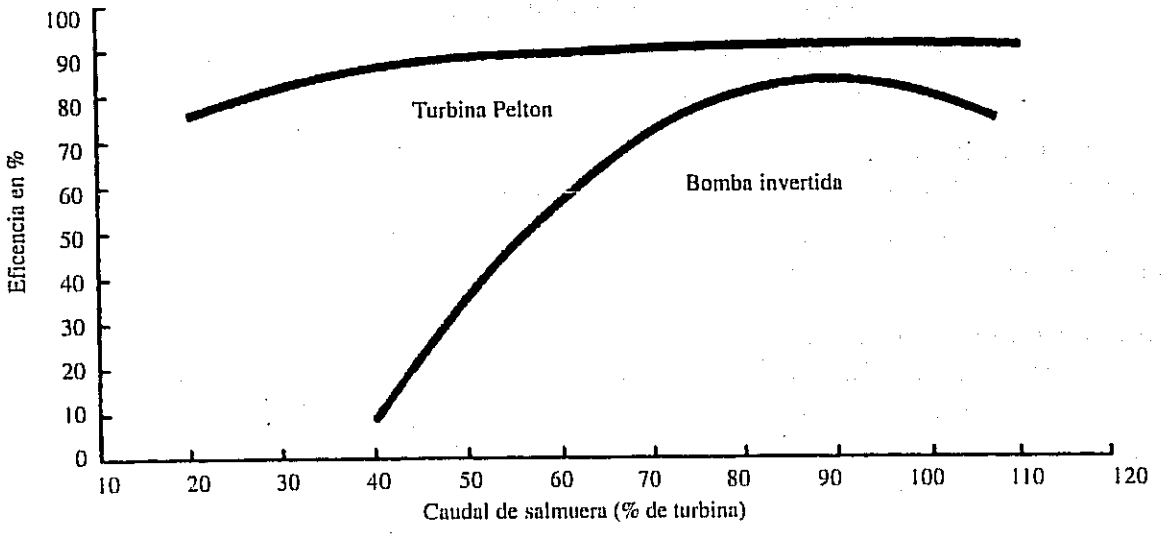


Figura 11.5. Curvas de turbina Pelton y bomba invertida.

En el caso de que la turbina sea del tipo Pelton, su curva es más tendida, por lo que en variaciones relativamente grandes del caudal de entrada a la misma, la eficiencia no decae sensiblemente.

El conjunto bomba de desplazamiento positivo-turbina Pelton se utiliza en instalaciones pequeñas, hasta 1.000 m^3/día de capacidad, aún cuando las averías de la bomba de pistones suelen ser más frecuentes. No existe demasiada experiencia en tamaños mayores y las averías de la bomba de pistón se incrementan.

El siguiente cuadro refleja los consumos teóricos específicos que pueden conseguirse con diferentes combinaciones de bombas y turbinas con las eficiencias normales en estos equipos, para un caudal de agua de mar de 100 litros/seg y con un 45 % de recuperación.

Se ve a su vez la importancia que tiene la adecuada selección del equipo de alta presión, que puede permitir ahorros de casi un kWh/m^3.

CUADRO 23

Recuperación en función del tipo de turbobomba

Tipo de Turbobomba	*Consumo kW*	*Recuperación kW*	*Consumo Neto KW*	*Consideración específica kWh/m³*
Bomba multicelular	875,84	252,43	623,41	3,84
Bomba multc. + turbina Pelton	875,84	306,87	568,97	3,51
Bomba pistón + turb. multicelular	782,37	231,84	550,53	3,4
Bomba pistón + turbina Pelton	782,37	300,28	482,09	2,97

11.5.3. Otros elementos de ahorro energético

La repercusión que tiene el elevado coste de la energía en los países sin recursos fósiles ha movido a numerosos trabajos para tratar de reducir el consumo que se han traducido en algunos elementos que ya se están aplicando a gran escala, mientras que otros se encuentran en fase experimental o trabajando en instalaciones piloto y que se presentan bastante prometedores.

El más importante de los que se han incorporado a las instalaciones desaladoras modernas es el variador de velocidad.

Constituido por un relé que se acopla al equipo eléctrico del motor y teniendo en cuenta que las características de funcionamiento de una bomba determinada están ligadas a su velocidad de giro y a su presión de aspiración, permiten actuar sobre ambos.

En las instalaciones de agua salobre el variador de velocidad se puede acoplar directamente a las bombas de alta presión.

En las de agua de mar, la elevada potencia de los motores y las altas presiones de funcionamiento hacen más aconsejable su utilización junto con las bombas de alimentación a ellas, es decir, las bombas de agua de mar o las de transferencia según los casos, por su menor potencia.

El papel desarrollado por estos equipos se traduce en ahorros en el consumo que según los casos pueden llegar hasta 0,5 kWh/m^3.

Se basan en aprovechar las necesarias holguras con que deben diseñarse los equipos principales de la ósmosis, es decir, los de alta presión, con objeto de responder a las variaciones que a lo largo del tiempo se producen en los principales parámetros del sistema.

En los colectores de la instalación y especialmente en los filtros de cartuchos y multicapa se producen pérdidas de carga variables que las bombas de alimentación deben ser capaces de vencer.

Según que los filtros multicapa estén limpios al comienzo del ciclo de funcionamiento, o sucios a final del mismo, pueden producirse variaciones en la pérdida de carga de 0,4-0,8 kg/cm^2.

Del mismo modo en los filtros de cartuchos, según que sean nuevos o no, puede producirse variaciones de 0,5 a 1 kg/cm^2.

Como los equipos de alimentación a ósmosis deben estar diseñados para suministrar la presión y caudal necesarios en las condiciones más desfavorables, solamente por el concepto de filtros existe un margen de presión que puede aprovecharse de 1-1,5 kg/cm^2.

Lo mismo ocurre con los bastidores de ósmosis inversa que al empezar a funcionar pueden requerir presiones de funcionamiento de 58-60 kg/cm^2 y a medida

que las membranas se ensucian van incrementando las presiones hasta 69-70 kg/cm^2.

Como el punto de diseño óptimo de las bombas, en cuanto a su eficiencia, no puede tolerar variaciones tan elevadas, en el proceso normal de funcionamiento de una instalación hay muchos momentos en que los equipos operan fuera de sus condiciones de máxima eficiencia.

Con los variadores de velocidad podemos conseguir que la bomba esté operando permanentemente muy próxima a su punto de mayor eficiencia, aumentando la presión en la aspiración.

El efecto hidraúlico que se consigue es elevar la curva de funcionamiento de la bomba hacia otra posición paralela a la anterior, consiguiendo que el punto de funcionamiento no se desplace demasiado del de mayor eficiencia para conseguir el rendimiento óptimo.

11.6. Consumos eléctricos

Dentro de una instalación de ósmosis inversa se comprende que la energía consumida no es la del propio proceso de ósmosis, sino la de los equipos que son necesarios para la producción del agua desalada.

Dentro de estos hay que considerar dos tipos distintos según que funcionen de una manera permanente o por el contrario sólo se pongan en funcionamiento de una manera periódica y por breves períodos de tiempo.

Entre los primeros tendríamos:

— Bombas de agua de alimentación a la planta.

— Equipo de vacío de las bombas de alimentación.

— Bombas dosificadoras de productos químicos del pretratamiento.

— Agitadores de los depósitos de reactivos.

— Bombas de transferencia.

— Bombas de impulsión de producto.

— Bombas de productos de post-tratamiento.

— Equipos de aire de los circuitos hidráulicos.

— Válvulas motorizadas.

— Sistema de control.

— Equipos para servicios interiores de la planta.

Entre los segundos estarían:

— Bomba de lavado de filtros.

— Soplantes de lavado de filtros.

— Bomba de lavado de membranas.

— Agitador del depósito de lavado de membranas.

— Resistencia de calentamiento del depósito de lavado.

— Bombas de desplazamiento.

De todos ellos, las bombas de alta presión son las responsables del mayor consumo.

11.6.1. Bombas de alimentación

Tanto las bombas sumergibles como las verticales son las encargadas de conducir el agua a tratar hasta la aspiración de las turbobombas.

En ocasiones estas bombas llevan un equipo de vacío individual, o uno general para todas ellas.

Su consumo es muy variable según el tipo de bomba, altura de elevación, etc. En conjunto suelen representar entre 0,35 y 0,7 kWh/m^3 de agua producto, en las instalaciones de agua de mar, y valores inferiores de 0,15-0,25 kWh/m^3 para las de agua salobre, debido a su mayor recobro.

11.6.2. Bombas de alta presión

Para agua de mar los consumos más extendidos en las instalaciones en funcionamiento están comprendidos entre 3,8 y 4,8 kWh/m^3 cuando se utilizan equipos de recuperación de energía, y 1-2 kWh/m^3 más si no se emplean tales dispositivos.

Sin embargo, como hemos visto antes, con un diseño adecuado y las eficiencias de los modernos equipos, dichos consumos pueden mejorarse notablemente.

En el caso de aguas salobres estos consumos pueden estar comprendidos entre 0,7 y 2,5 kWh/m^3.

En ocasiones las exigencias de calidad del agua producto pueden requerir, en el caso de agua de mar, una segunda etapa de ósmosis para bajar la salinidad de 150 ó 50 ppm. Esta segunda etapa incrementa el consumo total de la instalación entre 0,5 y1 kWh/m^3, dado que suele instalarse sistema de recuperación de energía.

11.6.3. Bombas de impulsión producto

El agua desalada se almacena en un depósito regulador situado al pie de la instalación desde el que se bombea a su punto de consumo o almacenamiento.

Se comprende que las condiciones de la impulsión pueden ser muy variables y los consumos pueden ser tan diferentes como 0,2 ó 1 kWh/m^3.

11.6.4. Resto de los consumos fijos

Son muy poco relevantes, por lo que sólo a efectos ilustrativos las potencias más frecuentes de dichos equipos suelen ser:

— Bombas dosificadoras: 0,15-0,25 kW.

— Agitadores de reactivos: 0,75-2 kW.

— Equipos de aire comprimido: 5-10 kW.

— Válvulas motorizadas: 0,25-1,5 kW.

— Sistema de control: 1-1,5 kW.

— Acondicionador de aire: 1,5-2,5 kW.

La repercusión del consumo de estos equipos en el específico del sistema apenas alcanza el 0,1-0,15 kWh/m^3.

11.7. Instalaciones híbridas

Este concepto se viene lanzando sistemáticamente en todos los foros técnicos sobre desalación de los últimos dos años, aunque con objetivos bien distintos.

Si en su concepto inicial se refiere al uso conjunto de la destilación y la ósmosis como tecnologías de producción de agua desalada, el objetivo es en definitiva la utilización de las ventajas de una y otra para obtener un agua de la mejor calidad al mejor precio. Mezclando agua producida por destilación, de mejor calidad pero superior consumo energético, con agua osmotizada, de calidad algo inferior pero de menor consumo energético, se obtiene un agua que puede fácilmente superar los estándar de calidad más exigentes, a un precio medio aceptable.

Sin embargo, debe tenerse en cuenta que este concepto ha surgido de los fabricantes de equipos de destilación como forma de defender sus tecnologías ante el crecimiento en espiral de la ósmosis inversa por su mayor eficiencia energética.

Dado que el aumento de la capacidad de las instalaciones de destilación, frecuente en los últimos años en los países del Golfo, reduce los costes unitarios de la inversión, pero escasamente los energéticos, las ideas híbridas pretenden reducir ambos.

En definitiva se trata de actuaciones conjuntas en la generación de electricidad y agua desalada, tratando de aprovechar al máximo las turbinas de vapor de las instalaciones duales.

Las posibles ventajas que pregonan los impulsores de estos sistemas son, además de las ya conocidas, las siguientes:

— Permiten a las membranas trabajar a presiones menores aunque se obtenga una calidad de agua inadecuada.

— En estas condiciones se prolonga la vida de las membranas.

— El exceso de producción de los complejos eléctricos puede reducirse considerablemente.

En muchas zonas la demanda eléctrica varía mucho de una época a otra del año, en cifras que pueden variar del 30 al 40 %.

En épocas de menor consumo se puede utilizar el vapor de extracción de las turbinas a baja presión para calentar el agua de alimentación a la ósmosis, aumentando su producción, o desalar por destilación, mientras en los otros meses todo el vapor iría a la producción de electricidad.

Frente a estos posibles aspectos positivos hay otros que no lo son tanto. El principal es que el coste medio del agua producida, incluidos todos los gastos, es superior con este sistema que sólo con ósmosis inversa, y especialmente el consumo energético. Unicamente si se utiliza ésta en varias etapas para producir un agua de calidad similar a la producida por destilación, las diferencias económicas en los costes de ambos procesos se reducen.

Sin embargo en estos casos muy especiales con necesidades de calidad de agua típicamente industriales, el manejo de la instalación de vapor puede compensar por su mayor sencillez.

CAPITULO 12

CONSIDERACIONES ECONOMICAS

12.1. Generalidades

La viabilidad de una instalación de desalación depende en primera instancia del precio final al que se pueda obtener el agua producto.

Sin embargo hay que tener también en cuenta la necesidad que se va a cubrir mediante el agua desalada y el sector económico al que se dedique, por cuanto su mayor o menor poder adquisitivo podrá justificar la instalación, al menos desde un punto de vista social o puramente económico.

Las instalaciones desaladoras precisan de una fuente de energía para realizar el proceso, sea en forma de vapor o electricidad, y dado que ésta es escasa y por tanto cara, deberá buscarse siempre el menor consumo energético.

Como hemos visto a lo largo de capítulos anteriores la tecnología de desalación ha progresado notablemente en los últimos 15 años, el mercado se ha ampliado considerablemente y las aplicaciones también, sin embargo es todavía el aspecto económico el que limita su expansión.

La escasez de agua en muchos lugares del mundo es importante, las sociedades ven limitado su progreso por la dependencia creciente que existe respecto a ese elemento y los ciudadanos padecen con más frecuencia de la deseada esa escasez, a pesar de que la técnica es capaz de solucionar el problema.

No hay que olvidar que la civilización surge precisamente en una zona del mundo situada entre dos ríos importantes, y que durante siglos toda la historia conocida del mundo se desarrolla en ese ambiente de abundancia de agua.

La agricultura ha sido tradicionalmente el sector mayor consumidor de agua, de forma que en la antigüedad era casi el único que marcaba el avance de los pueblos y de hecho éstos se asentaban en zonas favorables desde el punto de vista hídrico.

Aunque hoy día sigue siendo el usuario por excelencia del agua, la industria tiene una dependencia importante de ésta y el abastecimiento de las ciudades cada vez requiere mayores cantidades de agua.

Uno de los índices que precisamente marcan el estado de desarrollo de una ciudad o sociedad es el consumo de agua.

Dada la dependencia energética que como hemos resaltado tienen todas las tecnologías, los países en que la energía es más barata son los que tienen mayor capacidad instalada y además esa falta de consideración hacia el factor energía hace que además sean las instalaciones de mayor consumo específico las que predominan en los mismos.

Los avances tecnológicos desde hace años van dirigidos hacia lograr una reducción del consumo energético.

Pero no sólo el coste energético es importante, las inversiones que hay que realizar en el proceso tecnológico también pueden tener una repercusión importante en el coste del agua. Entre éstas destacan los equipos, instrumentos o materiales que se catalogan y que permiten prolongar la vida de las mismas.

12.2. Costes de la desalación

Puesto que prácticamente cada instalación desaladora constituye un ente único, dado que este tipo de plantas se construyen a la medida, los costes del agua desalada pueden ser muy variables de un caso a otro, no ya según que se trate de desalar agua salobre o de mar, sino incluso para un mismo tipo de agua.

La ósmosis inversa tiene una gran flexibilidad para adaptarse a cualquier tipo de circunstancias, por lo que es posible realizar diseños muy distintos para un mismo tipo de agua, en función de las circunstancias que pueden presentarse, y cumpliendo en todas ellas el agua producto unas condiciones mínimas.

Los parámetros que maneja el diseñador son varios y debe tratarse siempre de optimizar la instalación de forma que no sólo se considere el dinero que supone la primera inversión, sino también los gastos que como consecuencia de su operación se van a realizar a lo largo de los años.

En el siguiente cuadro se reflejan distintos diseños que pueden realizarse para una instalación de agua salobre de 10.000 m^3/día de capacidad, en dos aspectos importantes por su incidencia en el coste final del agua producto, como son la conversión y el número de membranas utilizadas.

En el mismo se refleja también la repercusión económica que desde el punto de vista energético suponen uno u otro diseño.

Otros aspectos que no se reflejan en el cuadro pero que también tienen importancia para la operación de la planta serían los pretratamientos químicos o las lim-

piezas de las membranas, que también tiene influencia en la duración de las mismas y su período de amortización.

En estos casos las instalaciones de menor conversión tendrían un mayor consumo de productos químicos y en las de menor número de membranas se incrementarían los costes de lavado y de reposición de estas.

También puede verse que para un mismo tipo de agua a tratar se puede obtener una calidad de agua muy distinta.

CUADRO 24

Influencia del diseño en los costes del agua desalada

PLANTA DESALADORA DE AGUA SALOBRE			
Capacidad 10.000 m³/día	*TDS alimentación 2.000 ppm*		
Conversión	60	75	87,5
Producto (mg/l)	188	228	320
Presión (kg/cm²)	14.96	14,9	14,9
N.° de Membranas	816	816	896
Consumo específico (kWh/m³)	1,1	0,88	0,7
Coste anual energía (Mptas)	47,29	37,84	32,13
Conversión	60	75	87,5
Producto (mg/l)	141	164	225
Presión (kg/cm²)	19,79	20,06	20,2
N.° de Membranas	600	576	616
Consumo específico (kWh/m³)	1,42	1,15	0,9
Coste anual energía (Mptas)	61,05	49,44	42,56
Conversión	60	75	87,5
Producto (mg/l)	114	131	186
Presión (kg/cm²)	24,47	24,82	24,19
N.° de Membranas	480	456	504
Consumo específico (kWh/m³)	1,72	1,4	1,17
Coste anual energía (Mptas)	73,95	60,18	50,30
Conversión	60	75	87,5
Producto (mg/l)	98	112	153
Presión (kg/cm²)	28,67	29,19	29,37
N.° de Membranas	408	384	306
Consumo específico (kWh/m³)	2,00	1,63	1,37
Coste anual energía (Mptas)	85,98	70,08	58,90

Aunque con carácter general puede decirse que los dos aspectos que más influyen en el coste del agua desalada son por tanto *la calidad del agua a tratar* y *la del agua que se quiere obtener*, sin embargo hay otros aspectos de la instalación que pueden tener una importancia grande según las circunstancias como:

— Tamaño de la instalación. Se consigue generalmente una economía de escala tanto en la inversión como en la mano de obra de operación. Además instalaciones grandes, por ejemplo, pueden permitir el empleo de determi-

nados instrumentos o la instalación de ciertos equipos que facilitan su operación reduciendo costes.

— Materiales a emplear. Cuanto más nobles son los materiales que se utilizan tanto más elevada es la inversión inicial, pero también se reducen los costes de mantenimiento y se prolonga la vida de los mismos.

— Eficiencia de los equipos. Una mayor eficiencia de bombas y motores aumenta la inversión inicial pero reduce costes energéticos de operación.

— Conversión. Al reducir ésta aumenta el tamaño de los equipos y por tanto su inversión inicial, pero a su vez permite un funcionamiento menos problemático de la instalación e incluso adaptarse más fácilmente a futuros cambios tecnológicos.

— Número de membranas. Un número menor reduce la inversión, pero produce mayores problemas de ensuciamiento durante la operación de la planta, por lo que se incrementan los costes de lavado, se disminuye la eficiencia de la instalación, y se acorta la vida media de las membranas.

— Tiempo de funcionamiento de la instalación. Las instalaciones desaladoras deben funcionar de forma continua durante el mayor tiempo posible, pues al aumentar la producción disminuye el coste total por metro cúbico producido.

Por tanto todas estas circunstancias deben valorarse a la hora de realizar el diseño para obtener el coste del agua desalada más bajo posible.

Como se ha dicho más arriba, de las distintas partidas económicas o capítulos en que se estructuran los costes hay dos, que en general, tienen mayor influencia en el coste del agua desalada: la inversión y la energía, aunque en algunas instalaciones pequeñas la repercusión del coste de la mano de obra puede ser elevada.

Por ello vamos a establecer la estructura general de costes de una instalación desaladora y analizar cada uno de los capítulos. Una vez tomada la decisión de construir una instalación desaladora o de otro tipo se generan dos tipos de gastos:

12.2.1. Gastos o costes fijos

Los gastos fijos son los que se generan como consecuencia de la construcción de la planta. Una vez terminada ésta repercuten en la misma tanto si funciona como si por circunstancias especiales debe estar parada.

Dentro de este capítulo se incluyen principalmente:

— Amortización de la inversión.

— Personal.

— Mantenimiento.

Pasamos a analizar los distintos capítulos:

Amortización de la inversión

Se entiende por inversión todos los gastos iniciales que se generan al poner en marcha un proyecto de este tipo; en consecuencia, deberán tenerse en consideración los gastos generados por:

— Compra de solares.

— Permisos administrativos.

— Proyectos y estudios técnicos.

— Coste de los edificios y equipos.

Su amortización deberá realizarse a lo largo de la vida de la instalación.

Sin embargo no debe fijarse para todos los conceptos el mismo período o plazo de tiempo, pues al tratarse de elementos completamente distintos los períodos sobre los que debe repercutirse dicha amortización también lo serán.

Debe fijarse, por ello, en primer lugar cuáles van a ser los plazos correspondientes.

En las instalaciones desaladoras, al contrario de otros tipos de obras de tratamientos de aguas, la obra civil no es tan importante, pudiéndose establecer para el caso de las instalaciones de agua de mar los siguientes porcentajes respecto a la inversión total:

— Obra civil: 15-25 %.

— Equipos mecánicos: 35-43 %.

— Membranas: 12-18 %.

— Equipos eléctricos: 10-14 %.

— Instrumentación y control: 2-4 %.

En el caso de las instalaciones de agua salobre dichos porcentajes son significativamente diferentes al ser equipos de materiales más simples, como consecuencia de la menor corrosividad y presiones más bajas de operación para aguas salobres. El período de amortización de cada uno de estos grupos es también bastante distinto.

Para la obra civil y el resto de los gastos de primer establecimiento se considera adecuado un período de 20 años, pues aunque años antes pueda ser necesario realizar una remodelación de algunos de los equipos desaladores, la obra civil es perfectamente aprovechable para la nueva instalación.

Unicamente en el caso de que la instalación desaladora fuera de tipo provisional para atender alguna necesidad puntual y pasajera, se acortaría dicho período para acomodarlo a la duración real de funcionamiento de la misma.

Para el resto de los equipos se establecen periodos más cortos y en muchos casos no tanto porque no vayan a seguir funcionando con buen rendimiento al cabo de dicho período, sino por obsolescencia técnica, dado que los progresos técnicos pueden aconsejar su cambio por otros de mayor eficiencia o más adaptados a las necesidades reales de la instalación.

Con estos criterios los períodos más frecuentemente adoptados son:

— Equipos mecánicos: 12 años.

— Membranas: 8 años.

— Equipos eléctricos: 15 años.

— Instrumentación y control: 12 años.

— Tuberías: 15 años.

Utilizando la fórmula de amortización siguiente:

$$A = C \cdot \frac{i}{1 - \frac{i}{1 + i^n}}$$

Que para una tasa de interés del 8 % y precios de 1998 supone unos costes entre 35 y 60 ptas/m^3.

La importancia que tiene una buena financiación de la obra queda reflejada en el siguiente cuadro que recoge dichas amortizaciones en función de la tasa de interés.

CUADRO 25

Costes de financiación

	Tamaño de la instalación	
Tasa de interés %	*Grande* *Ptas/m^3*	*Pequeña* *Ptas/m^3*
8	35	60
7	30,6	52,5
6	26,2	45
5	21,8	37,5
4	17,5	30

Personal y mantenimiento

Son dos partidas que podrían también considerarse como gastos variables, puesto que en teoría sólo se necesitan ambos si la planta funciona.

Sin embargo hacemos la consideración de que aún en el caso extraordinario de que la planta no funcionase de una manera continua, lo cual puede ocurrir por problemas administrativos o en caso de que la desaladora sirva sólo para atender demandas temporales, como en el sector turístico, sería preciso mantener un personal mínimo para garantizar tanto la puesta en marcha durante los períodos de funcionamiento como el valor de la instalación, es decir, el patrimonio que representa esa inversión.

Hay que tener en cuenta que una instalación de estas características requiere un personal con una formación técnica adecuada, que por tanto no puede improvisarse de la noche a la mañana.

Lo mismo puede decirse respecto al mantenimiento de la planta, aún cuando parte del mismo pueda subcontratarse externamente a la explotación.

En todo caso y si se quiere precisar un poco más, como ocurre actualmente con algunos contratos de construcción de instalaciones desaladoras por parte de empresas privadas para el abastecimiento urbano, se pueden incluir ambas partidas tanto entre los gastos fijos como entre los variables, de acuerdo con los criterios expresados.

Es decir el personal mínimo de mantenimiento sería un gasto fijo y el personal que incrementaría la plantilla en épocas de funcionamiento sería el gasto variable de operación.

Respecto a la citada mano de obra hay que tener en cuenta que cualquier instalación desaladora, y especialmente si es de agua de mar, requiere una inversión importante y por tanto exige una atención de personal permanente.

Sólo en el caso de instalaciones pequeñas podría prescindirse de la misma, siempre que los automatismos adecuados garantizasen un control desde algún punto cercano, que permitiera una rápida intervención en caso necesario y además se trabajara con diseños bastante conservadores.

El mantenimiento adecuado es la garantía no sólo de la mayor duración de la instalación, sino también de una mayor eficiencia en su funcionamiento, ya que las paradas por avería, que siempre suponen una merma de la producción, se reducen al mínimo.

Factor de energía

También podría tener la consideración de gasto fijo el término o factor de potencia que se establece en el contrato de suministro con la compañía eléctrica, en el sentido de que una vez establecidas las necesidades de potencia de la instalación, este término debe abonarse con independencia de que la planta esté parada o funcionando.

12.2.2. Gastos o Costes variables

Se producen exclusivamente como consecuencia de la operación o funcionamiento de la instalación y entre ellos se consideran los siguientes:

— Reactivos químicos.

— Reposición de membranas.

— Reposición de cartuchos.

— Reposición de arenas.

— Limpieza química.

— Repuestos.

— Energía.

— Varios.

— Seguros.

— Aceites y lubricantes.

— Limpieza.

— Material de oficina.

— Equipos de trabajo.

— Mantenimientos específicos.

Reactivos químicos

Todas las instalaciones desaladoras utilizan reactivos químicos tanto en el pretratamiento del agua a desalar como en el posterior del agua producida, pero el número de productos empleados y sus dosificaciones son muy variables, tanto en función de las características del agua a tratar como de la forma de operar la planta.

Los productos más empleados son:

— Hipoclorito sódico o cálcico, bisulfito sódico o biocidas orgánicos, como desinfectantes.

— Cloruro férrico o polielectrolitos coagulantes, en las etapas de filtración.

— Acido sulfúrico o polielectrolitos, para regulación del pH.

— Bisulfito, como agente reductor.

— Hexamentafosfatos y distintos antiincrustantes orgánicos, para controlar los precipitados.

Las dosificaciones correspondientes y los precios de los respectivos productos constituyen este capítulo, que como ya se ha dicho es específico de cada instalación.

A título orientativo los consumos medios de reactivos en las instalaciones de agua de mar son:

— Hipoclorito sódico: 25-35 g/m^3 de agua producto.

— Acido sulfúrico: 30- 45 g/m^3 agua producida.

— Coagulante: 3-10 g/m^3 de Cl_3Fe o 0,2-0,6 g/l polielectrolito.

— Reductor: 5-12 g/m^3 SHMP.

— Antiincrustante: 3-5 g/m^3.

En función de las circunstancias que concurran en la instalación se aplicarán algunos o todos ellos.

Reposición de membranas

Las membranas se deterioran con el uso y hay que cambiarlas, pero dicho deterioro no es el mismo en cada instalación.

Las características del agua a desalar que determinan la frecuencia de lavado y la experiencia operativa son fundamentales en la vida de la membrana.

Los fabricantes de membranas establecen una garantía para las membranas variables entre el 10 y el 12 % anual para un período generalmente de 5 años, es decir, una reposición entre el 50 y el 60 % para dicho período.

Es decir que si la reposición anual es inferior a ese porcentaje de membrana, los gastos corren a costa del operador, pues se considera normal dentro del proceso de desgaste, y lo que supere dicho porcentaje es sustituido gratuitamente por el fabricante.

Las mejoras tecnológicas en el desarrollo de las membranas y la mayor experiencia en la operación de las instalaciones, reduce sin embargo dicho porcentaje al 6-8 %, salvo caso de accidente, por lo que esos porcentajes pueden utilizarse con bastantes garantías dentro de los costes operativos de la instalación.

Es importante resaltar que muchas veces no se reemplazan estos porcentajes pensando que se consigue un ahorro en los gastos de la explotación, lo cual no suele ser cierto, pues al no cambiar las membranas que corresponden se incrementa el número de lavados, empeora la calidad del producto, se reduce la producción y aumenta el consumo energético específico.

Reposición de arenas

La arena de los filtros, cuando éstos forman parte de la instalación, se va perdiendo como consecuencia de los frecuentes lavados de éstos y además se va ensuciando. En los filtros multicapa se produce además una mezcla de los distintos medios filtrantes y se reduce su eficiencia.

Por tanto se necesita una reposición periódica de las pérdidas y un cambio total de arenas cada 7-10 años según las circunstancias.

Reposición de cartuchos

También los cartuchos de los filtros de seguridad de las instalaciones deben cambiarse, aunque con una frecuencia mucho mayor que las arenas.

La frecuencia normal de cambio suele ser de una a dos veces por año, aunque en instalaciones con aguas contaminadas dicha frecuencia debe duplicarse.

Limpieza química

Es función de la calidad del agua de alimentación a la instalación y por tanto su frecuencia varía, siendo los valores más normales de una vez cada mes o cada tres meses. Mayores frecuencias exigen revisar los pretratamientos para adaptarlos a las exigencias de la instalación.

Existen también casos excepcionales en que a causa de las excelentes condiciones físico-químicas del agua a tratar, los lavados se realizan una vez al año o incluso una vez cada varios años.

Los reactivos o productos químicos que se emplean para limpieza de las membranas suelen ser caros, por lo que se debe tratar de optimizar el funcionamiento de la instalación, para reducir la frecuencia de lavado.

Repuestos

Los repuestos más frecuentes en la instalación son los correspondientes a los equipos mecánicos, dado que en estos el funcionamiento es generalmente continuo.

Por tanto los rodamientos, cojinetes, cierres mecánicos y aros rozantes de las bombas son los recambios normales. Los elementos más caros son lógicamente los correspondientes a las turbobombas de alta presión.

En algunas instalaciones en que el agua contiene arenas puede producirse desgaste en los rodetes de las bombas de alimentación a la planta, lo que obliga a su cambio o al menos a su reparación.

Generalmente estos elementos citados se cambian una vez al año. Esta partida, especialmente en instalaciones pequeñas, puede ser importante, por lo que si se producen estos desgastes o incluso los períodos de sustitución son menores, vale la pena plantearse la utilización de aleaciones especiales que prolonguen su vida.

Energía

Este capítulo es el que genera los mayores costes del agua desalada.

La ósmosis inversa ha supuesto una reducción de los consumos energéticos frente a los sistemas de desalación anteriores, e incluso a lo largo de los años se han desarrollado nuevas membranas que funcionan a menores presiones y dan ma-

yores caudales, reduciendo por tanto el consumo específico. Pero aún así los procesos de desalación son importantes consumidores de energía.

En instalaciones de aguas salobres entre 1.500 y 4.000 ppm son consumos normales entre 0,7 y 1,7 kWh/m^3 según el tipo de membranas y la conversión aplicada.

Para agua de mar los consumos están entre 6,5 kWh/m^3, cuando no se utilizan equipos de recuperación de energía, y 3,75- 4,5 kWh/m^3, en función de los elementos que se instalen, dado que la capacidad de la planta también justifica la utilización de determinados equipos que no son posibles en instalaciones pequeñas.

Dentro de esta partida debe también tenerse en cuenta que las tarifas eléctricas están formadas por dos tipos de componentes. Uno que se puede considerar como fijo, constituído por los derechos de enganche y que deben pagarse tanto si la instalación funciona como si está parada. El otro es el término de potencia que es la que se consume realmente, función por tanto de las características de la instalación y del tiempo de funcionamiento de la misma.

Esta distinción es importante porque en los contratos de operación de instalaciones se suele hacer uso de estas diferencias, para el abono correspondiente. Las instalaciones de mayor capacidad pueden conseguir tarifas generalmente más baratas que las pequeñas.

Varios

En este capítulo habría que incluir todos aquellos gastos menores que forman parte de cualquier instalación de uso industrial:

— Seguros.

— Aceites y lubricantes.

— Limpieza.

— Material de oficina.

— Equipos de trabajo.

— Mantenimientos específicos.

El más importante de estos capítulos es el de los mantenimientos específicos.

Dada la sofisticación de los equipos, como consecuencia de los automatismos de que constan las instalaciones y los necesarios elementos de regulación y control, junto a bombas y motores de alto rendimiento, es preciso realizar un mantenimiento periódico y eficaz de la instalación, por lo cual muchos de dichos trabajos, especialmente en las instalaciones de tamaño pequeño y mediano, se subcontratan a empresas especializadas.

Unicamente las instalaciones de gran capacidad permiten disponer de personal altamente cualificado que realiza la mayor parte de los trabajos de mantenimiento.

Si el funcionamiento de la instalación es temporal, la mayor parte de los gastos de mantenimiento hay que cargarlos a la partida de gastos variables, mientras que si el funcionamiento es continuo habría que considerarlos como gastos fijos.

12.3. Financiación de las instalaciones

Uno de los problemas que más influyen actualmente en la mayor implantación de las instalaciones desaladoras, es la dificultad de encontrar una vía de financiación que permita obtener agua potable a un precio que sea asequible a la población que la demanda.

Como las inversiones son siempre importantes y las entidades públicas tienen presupuestos limitados, cada vez es más frecuente la financiación de las obras por parte de empresas privadas, que recuperan la inversión en base al precio del agua producida o en pagos aplazados. También este tipo de financiación es muy adecuada en el caso de plantas pequeñas, para abastecimiento de municipios, dado que la infraestructura técnica de los mismos es escasa e inadecuada para las necesidades que una explotación de este tipo requiere.

Tres son los tipos más frecuentes de financiación que se ofrecen y que según la terminología comercial se conocen como:

12.3.1. Turn-key (llave en mano)

Con este sistema el contratista hace la obra, la pone en marcha, forma generalmente al personal del cliente y le entrega finalmente a éste la instalación, mediante fórmula de pago previamente acordada.

12.3.2. BOO (Construido, operado y propiedad del constructor)

El contratista construye la instalación y la opera durante un período previamente acordado, durante el cual recibe del cliente el pago a la inversión realizada, generalmente incluída en el precio del agua.

Al final del plazo acordado, la instalación es propiedad del contratista, que de común acuerdo puede seguir explotándola o vendérsela al cliente si éste lo desea.

El cliente por su parte no adquiere compromiso alguno de seguir contratando con el contratista, pudiendo en caso de que la tecnología mejore o tenga otra oferta comprometer otro suministro.

12.3.3. BOOT (Construido, operado y transferido)

Similar al anterior, pero con la diferencia de que al final del período acordado, la propiedad de la instalación revierte al cliente, que por tanto podrá seguir explotándola en el futuro por sí mismo, o por medio del contratista que le ofrezca las mejores condiciones.

El primer tipo de financiación es generalmente el más barato, pero exige al cliente disponer de una infraestructura técnica adecuada para hacerse cargo de la explotación de la planta una vez terminada. Se da generalmente en instalaciones de tamaño pequeño o mediano y preferentemente en el sector industrial.

Los otros dos resultan más adecuados para entidades públicas, y la elección de uno u otro está en función de las disponibilidades de personal existentes y de la planificación futura del ente.

En cualquier caso sea cual fuere la vía de financiación elegida, es conveniente por parte del cliente realizar un seguimiento de la explotación de la instalación, para que ésta se realice de forma óptima.

BIBLIOGRAFIA

Langelier W.F: *The analytical control of anticorrosion water treatment.* J. American Waterworks Association 1936.

Larson T.E. y Buswell A.M.: *Calcium Carbonate saturation Index and Alcalinity Interpretations.* J. Am. Water Works Assoc. 1942.

Wilcox L.V.: *Tables for calculating the pHc values of waters.* US Salinity Laboratory 1963.

Bower C.C. y Wilcox L.V.: *An index of the tendency of CO_3Ca to precipitate from irrigation waters.* Soil Sci Soc Amer Proc. 1965.

Antonio Girelli: *Fresh water from the sea.* Pergamon Press. 1965.

Loeb S. y Merten U.: *Desalination by Reverse Osmosis.* Edt. Cambridge, Mass. The MTI Press.1966.

Sourirajan S.: *Reverse Osmosis.* Academic Press. New York.1970.

Vaillant J. R.: *Les problèmes du desalement de l'eau de mer.* Eyroles. 1970.

Kesting Robert E.: *Synthetic polymeric membranes.* Mc Graw Hill. 1971.

Kuhn A. T.: *Industrial electrochemical processes.* Elsevier. 1971.

Konrad Dorfner: *Ion exchanges.* Ann Harbor Science. 1972.

Lonsdale H. y Podal H.E.: *Reverse Osmosis Membrane Research.* New York: Plenum Press, 1972.

Lacey R.E. y Loeb, S.: *Industrial Processing with Membranes.* New York:Wiley-Interscience. 1972.

Desalting Handbook for planners. Bureau of Reclamation $ OSW. US Depart of Interior. 1972.

Gmelin: *Water Desalting.* Springer Verlag. 1974.

Porteous Andrew: *Saline water desalination processes.* Applied Science. 1975.

Kelle, Peter R.: *Membrane technology and Industrial separation techniques.* Noyes Data Corporation. 1976.

Meares, Patrick: *Membrane separation processes.* Elsevier. 1976.

Passani, Roberto: *Biological and artificial membranes and desalination water processes.* Elsevier. 1976.

Optimization of Chlorine Appication Procedures and Evaluation of Chlorine Monitoring Techniques. Berkeley, Calif. University of California, 1.976.

R.O. and synthetic membranes. Sourirajan. NRC. Canada. Ottawa. 1977.

Salt Water purification. Spiegler. Academic Press. 1977.

White, G.C.: *Handbook of Chlorination.* New York, N.Y. Van Nostrand Reinhold. 1978.

Dean, J. A.: *Lange´s Handbook of Chemistry.* New York: Mc Graw-Hill Book, Co. 1979.

Kemmer, F. M.: *The Nalco Water Handbook.* New York: Mc Graw-Hill Book Co., 1979.

Critset, James R.: *Membrane separation processes.* Lexington. LDI. 1979.

Eckenfelder W.W.: *Principes of water quality management.* CBI Pub Co. Massachusetts 1980.

Principes of Desalination. K.S.Spiegler. Academic Press. 1980.

Desalination Manual. IDE. 1980.

Carpenter, J.H. *et al.*: *Reactions Products from the Chlorination of Seawater.* Gulf Breeze, Fla. ERL, May 1981.

Scott, Jeanette: *Desalination of seawater by R.O.* NDC. 1981.

Porteous, Andrew: *Desalination Technology.* Applied Science. 1983.

Soriano, E. *et al: Nuevas tendencias en las tecnologías de desalación.* Universidad politécnica de Valencia. 1984.

Belfort, George: *Synthetic membranes processes.* Academic Press. 1984.

Handbook of public water systems. CULP. Robert Williams. 1986.

Torres, M. y Medina, J. A.: *La calidad del agua y las membranas semipermeables.* Ingeniería Civil 1986.

Simon, G.: *Desalination and water purification.* Elsevier 1986.

Lynn E.: *Posttreatment of Reverse Osmosis Product Waters.* Applegate. Journal AWWA. May 1986.

Kahn, A. H.: *Desalination processes and multistage flash distillation practice.* Elsevier 1986.

Membranes Applications, Encyclopedia of Physical Science and Technology. Academic Press Inc. 1987.

Morel. A.: *Osmose Inverse and Ultrafiltration.* Academic Press. 1987.

Ayers y Westcot: *La calidad del agua en la Agricultura.* FAO. 1987.

Lee, Eric: *Membrane applications. Encyclopedia of Physical Science and Technology.* Academic Press Incorp. 1987.

Piqué, G.G.: *Manual Práctico de Osmosis Inversa.* UOP Fluid Systems. 1989.

Tebbutt, T.H.: *Fundamentos de control de la calidad del agua.* Noriega Ed. Limusa. 1990.

Bipin S. Pareckh: *R.O. Technology.* Marcel Dekker Inc. New York and Basel. 1998.

Fariñas Iglesias, Manuel: *Osmosis Inversa. Fundamentos, tecnología y aplicaciones.* Mc Graw Hill. 1999.

INDICE DE FIGURAS Y CUADROS

INDICE DE ANUNCIANTES

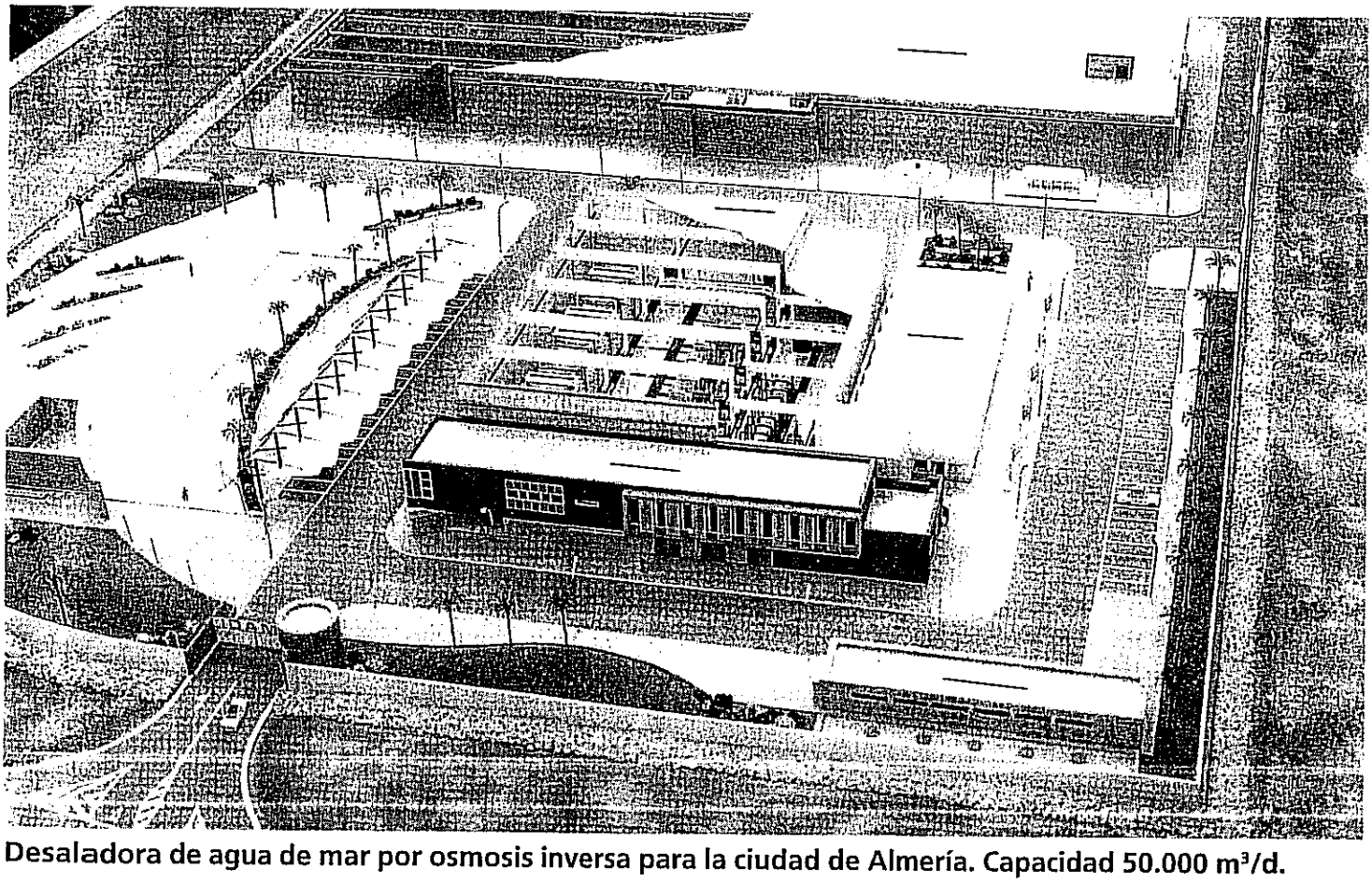
ABENSUR

Abengoa Servicios Urbanos

AENOR ER Empresa Registrada ER-522/1/96

En el campo del tratamiento de aguas, somos especialistas en :

- Desalación de agua de mar y salobres.
- Tratamientos terciarios.
- Tratamiento de aguas potables.
- Depuración de aguas residuales.



Desaladora de agua de mar por osmosis inversa para la ciudad de Almería. Capacidad 50.000 m^3/d.

Abengoa Servicios Urbanos, S.A.

Avda de la Buhaira, 2
41018 Sevilla (España)
Tf. 95 - 493 70 00
Fax. 95 - 493 70 21

Personas de contacto

Antonio Hernández Navarrete
E-mail: ahernandez@abensur.abengoa.com

José Luis García de Chiclana
E-mail: jlgarcía@abensur.abengoa.com

Su Interlocutor en Recursos y Soluciones Técnicas

Aquazur

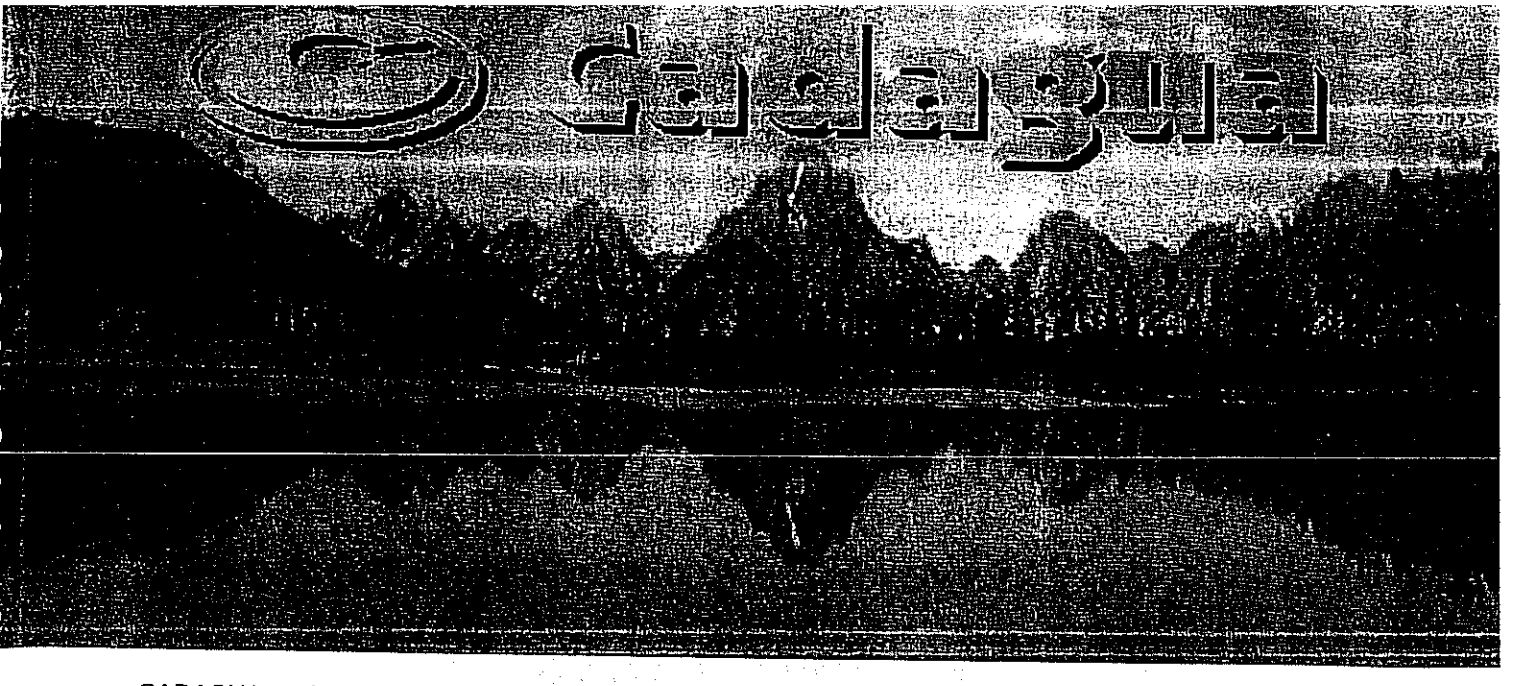
PermaCare España

Durante [illegible] nos el Grupo de acon[illegible]ionamiento Aquazur ha puesto a disposición de la industria del acondicionamiento del agua su experiencia y tecnología ofreciendo soluciones innovadoras y adaptadas a cada una de las necesidades

Aquazur Iberia, como parte integrante del mayor grupo de acondicionamiento en Europa a través de su división especializada Permacare España ha desarrollado una gama de especialidades químicas y sistemas de dosificación especialmente diseñados para la prevención y control de los problemas de corrosión, incrustación y ensuciamiento en los sistemas de membranas.

PermaCare España
Avenida Oscar Esplá 4
03003 Alicante
tel. 965 132649
fax. 965 132650
e - mail zarzo@aquazur.es

Aquazur Iberia S.L
Camino de Villanueva 2
28880 Meco. Madrid
tel. 91 887 73 00
fax. 91 886 06 94
e - mail aquazur@aquazur.es

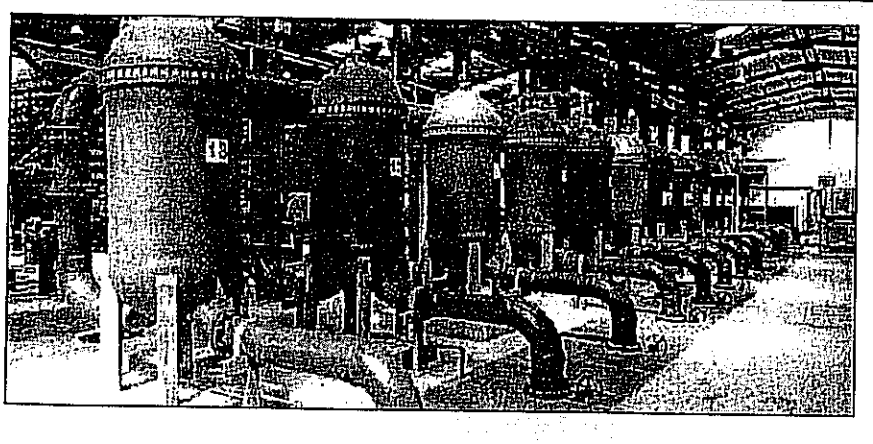


CADAGUA, más de 30 años de experiencia al servicio del ciudadano y del medio ambiente. La fórmula ideal para el tratamiento de aguas: desalación de agua de mar y salobre; tratamiento de aguas industriales, residuales urbanas y aguas potables. Para elegir el proceso más adecuado, CADAGUA pone a su disposición, ingeniería, experiencia en el diagnóstico, proyecto, diseño, construcción, mantenimiento, explotación y gestión de plantas de tratamiento y depuración de aguas.

De cara el nuevo milenio, CADAGUA se halla preparada con las más modernas tecnologías para acometer proyectos de desalación en cualquier lugar del mundo.
En la actualidad Cadagua contabiliza en construcción de plantas desaladoras una producción diaria de 220.000 m³ de agua desalada, y mantiene en explotación plantas desaladoras con una producción diaria de 135.000 m³.

Bastidores de Osmosis Inversa
y Bombas de Alta Presión
Desaladora para Agragua

Cliente: Agragua, S. A.
Capacidad: 15.000 m³/día
Uso: Agua para riego
Año de puesta en funcionamiento:
1.998



Filtros de cartucho
Desaladora en Dhekelia (Chipre)

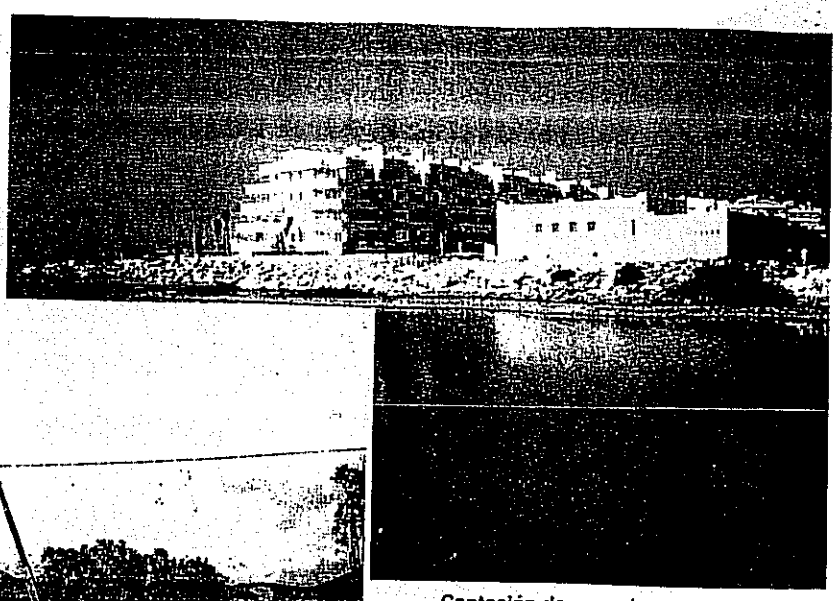
Cliente: Ministerio de Agricultura y Recursos Naturales – Dpto. de Agua y Desarrollo
Capacidad: 40.000 m³/día
Uso: Agua potable
Año de puesta en funcionamiento:
1.998

Cadagua
Tel.: 944 817 300 · Fax: 944 817 301 · e-mail: cadagua.info@cadagua.es
Tel.: 914 363 180 · Fax: 914 363 181 · e-mail: d-centro@cadagua.es

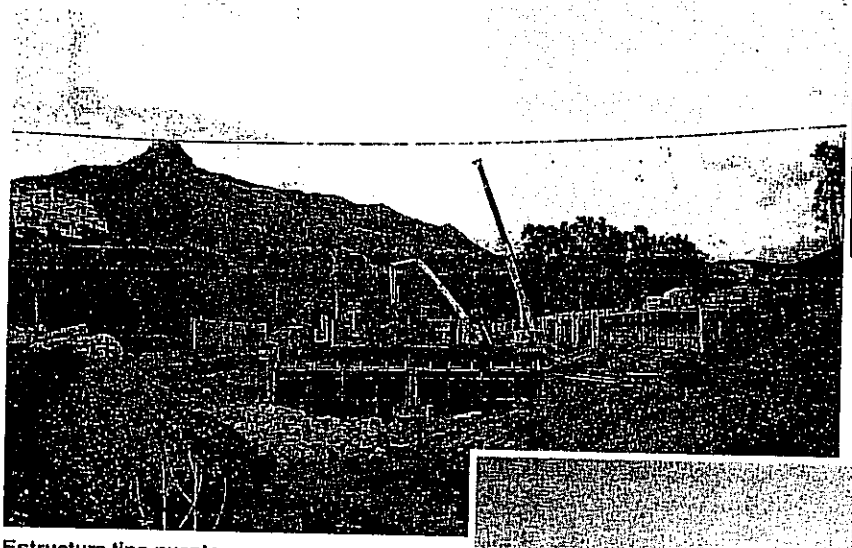
CALDER

TURBINAS PELTON PARA RECUPERACIÓN DE ENERGIA

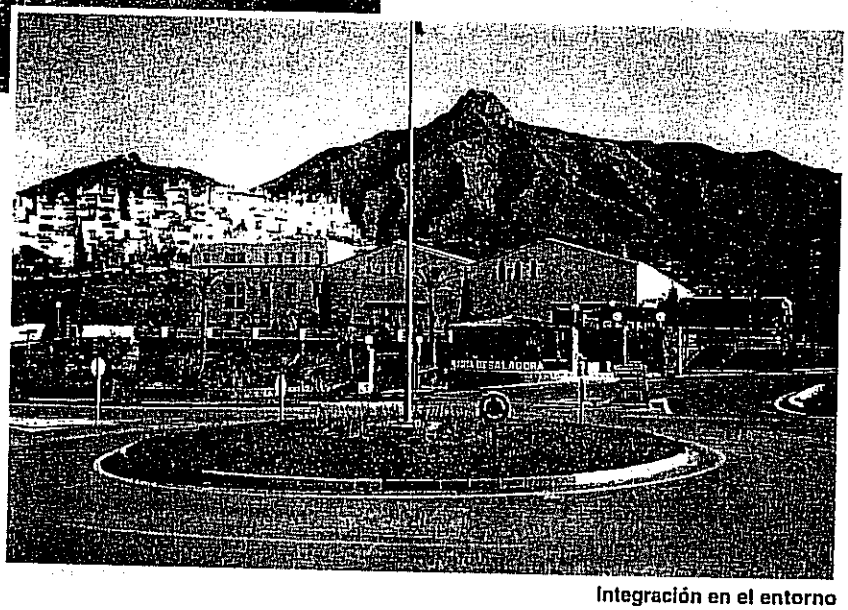
Calder Iberia
Gobelas, 19 (La Florida)
28023 MADRID
Tel. +34-91 372 97 52
Fax +34-91 372 80 58



Captación de agua de mar. Toma abierta



Estructura tipo puente



Integración en el entorno

DATOS BÁSICOS DE DISEÑO

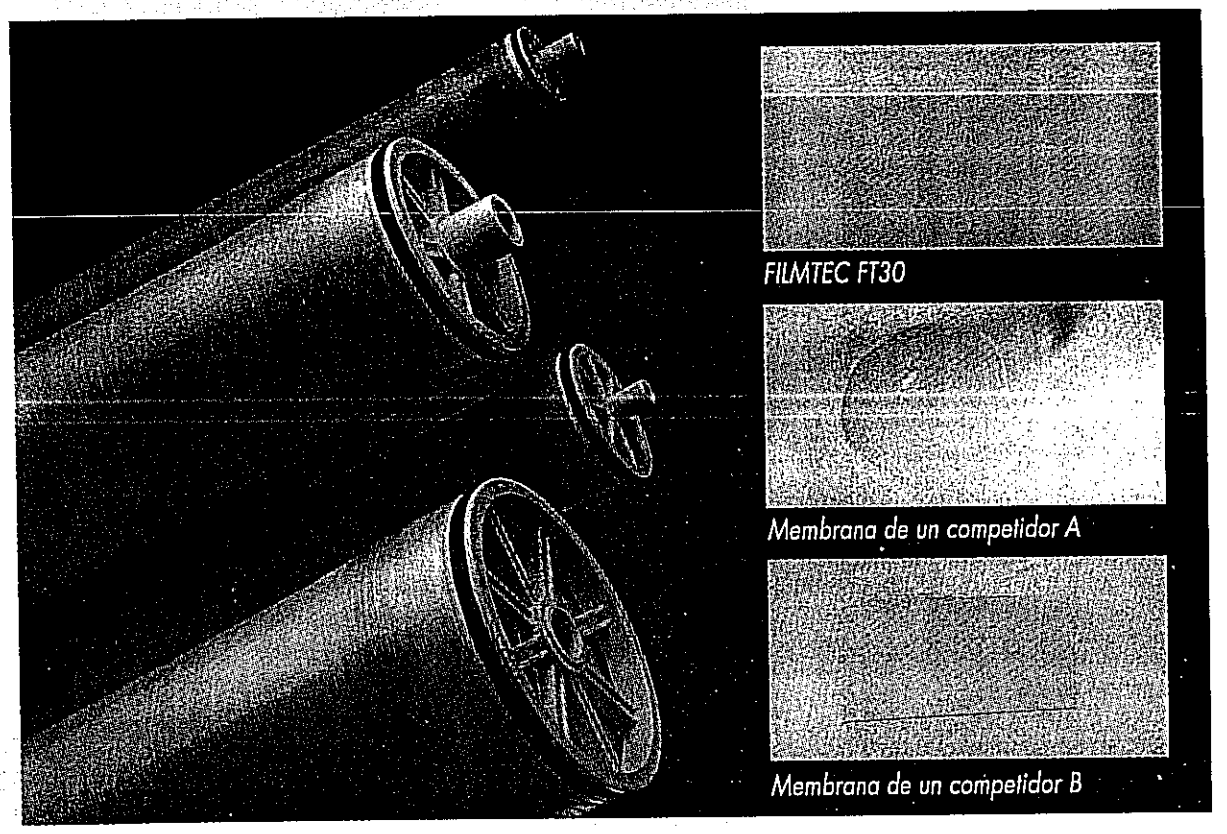
PRODUCCIÓN DE AGUA DESALADA	56.000 m³/día
CAUDAL DE AGUA DE MAR	5.092 m³/hora
CALIDAD DE AGUA DESALADA	<400 ppm
PRODUCCIÓN POR LÍNEA	7.050 m³/día
CONVERSIÓN DEL PROCESO	45%
PRESIÓN DEL TRABAJO	<70 kg/cm²
TEMPERATURA DE TRABAJO	17 - 22 °C
TIPO DE MEMBRANA	Fibra hueca
POTENCIA ELÉCTRICA INSTALADA	20 MVA

Decosol

Desaladora de la Costa del Sol, S.A.

Ctra. de Istán, Km. 1,85
29600 MARBELLA
Teléf.: 952 77 23 51
Fax: 952 77 98 12

Los elementos de ósmosis inversa líderes mundiales parten de una membrana mejor.



Sin retocar

Algunos pueden hacerle creer que todas las membranas de ósmosis inversa son iguales. Estas fotos sin retocar de membranas procedentes de elementos de ósmosis inversa reales muestran que no es así.

Las membranas de los competidores están afectadas por defectos que los fabricantes han retocado con pegamento o parcheado con cinta, lo que puede reducir la productividad, atraer bloqueantes, reducir la capacidad de limpieza e, incluso, dar lugar al fallo de la membrana.

Por el contrario, la membrana de film delgado FILMTEC® FT30 está fabricada correctamente desde el principio, y no presenta parches o retoques, garantizando la máxima productividad y un servicio más prolongado y sin problemas. La membrana FILMTEC FT30 de hoy es el resultado de más de 20 años de mejora continua. Fabricada con arreglo a un proceso estrictamente controlado en nuestra planta ISO 9002, continúa estableciendo el estándar del sector de rendimiento uniforme y fiable.

Cuando elige un elemento de ósmosis inversa, lo que cuenta es lo de dentro. La membrana FILMTEC FT30 original contribuye a que los elementos FILMTEC sean la respuesta más segura a sus requisitos de tratamiento de aguas.

Para obtener información adicional, visítenos en:
www.filmtec.com

O bien llame al 1-800-447-4369 (EE.UU. y Canadá), o al +31-20-691-6268 en el resto de las áreas del mundo.

DOW*

*Marca registrada–The Dow Chemical Company

FILMTEC® MEMBRANES | DOWEX* ION EXCHANGE RESINS

FILMTEC® es una marca registrada de FilmTec Corporation, una filial participada al 100% de The Dow Chemical Company

Nosotros somos membranes.com

HYDRANAUTICS

Productos

Centro de Información Técnica

Diseñe su Sistema de Osmosis Inversa

Oficinas Alrededor del Mundo

Reseña Corporativa

Indice

Bienvenidos a membranes.com

Líderes en Tecnología de Membranas

• Osmosis Inversa • Ultrafiltración • Nanofiltración

Novedades

Si Ud. busca membranas de la más alta calidad y rendimiento, nosotros debemos de ser su elección. Hydranautics es líder indiscutible en tecnología de membranas e innovación. Nuestra página en Internet es un banco de información para la industria, con la última información en productos con tecnología puntera, diseño de sistemas y aplicaciones. ¡Pónganos a trabajar para Ud.!

Visítenos en Internet - Nosotros ***somos*** membranes.com

ISO 9001

HYDRANAUTICS
High Performance Membrane Products
A Nitto Denko Corporation

Hydranautics Corporate: 401 Jones Road, Oceanside, CA 92054 • **15 Sales Offices Worldwide** • www.membranes.com
1-800-CPA-PURE • Phone: 760-901-2500 • Fax: 760-901-2578

Inima

SERVICIOS EUROPEOS DE MEDIO AMBIENTE

Inima, procede de la primera empresa española que al final de la década de los 60, diseñó y construyó plantas de desalación con tecnología propia. En la actualidad ***Inima*** posee tecnología y referencias de desalación en los procesos de:

- Osmosis Inversa (O.I.)
- Evaporación Instantánea Multietapa (M.S.F.)
- Evaporación en Multiefecto (M.E.D.)
- Compresión de Vapor (V.C.)

Entre sus referencias se encuentran la mayor planta de Osmosis Inversa de agua de mar construida en España, así como la mayor planta de desalación por Multiefecto del mundo. Las referencias de ***Inima***, están repartidas a lo largo del mundo, en países tales como Libia, Chile, Marruecos, etc.

Inima, es una empresa pionera en el campo del tratamiento de aguas en general y de la desalación en particular habiendo introducido la turbina Pelton en la recuperación de energía en plantas de Osmosis Inversa de gran tamaño y la utilización de la Microfiltración en el tratamiento terciario de efluentes de depuradoras.

La actividad de ***Inima*** abarca desde el diseño, construcción y explotación de plantas, incluyendo la financiación de la inversión con venta del agua producida. Para poder ofrecer en cada momento aquella solución más adecuada y que se adapte mejor a las necesidades del cliente, ***Inima*** dispone de un programa de I+D que le permite estar siempre en punta tecnológica en el tratamiento y solución de los problemas Medioambientales.

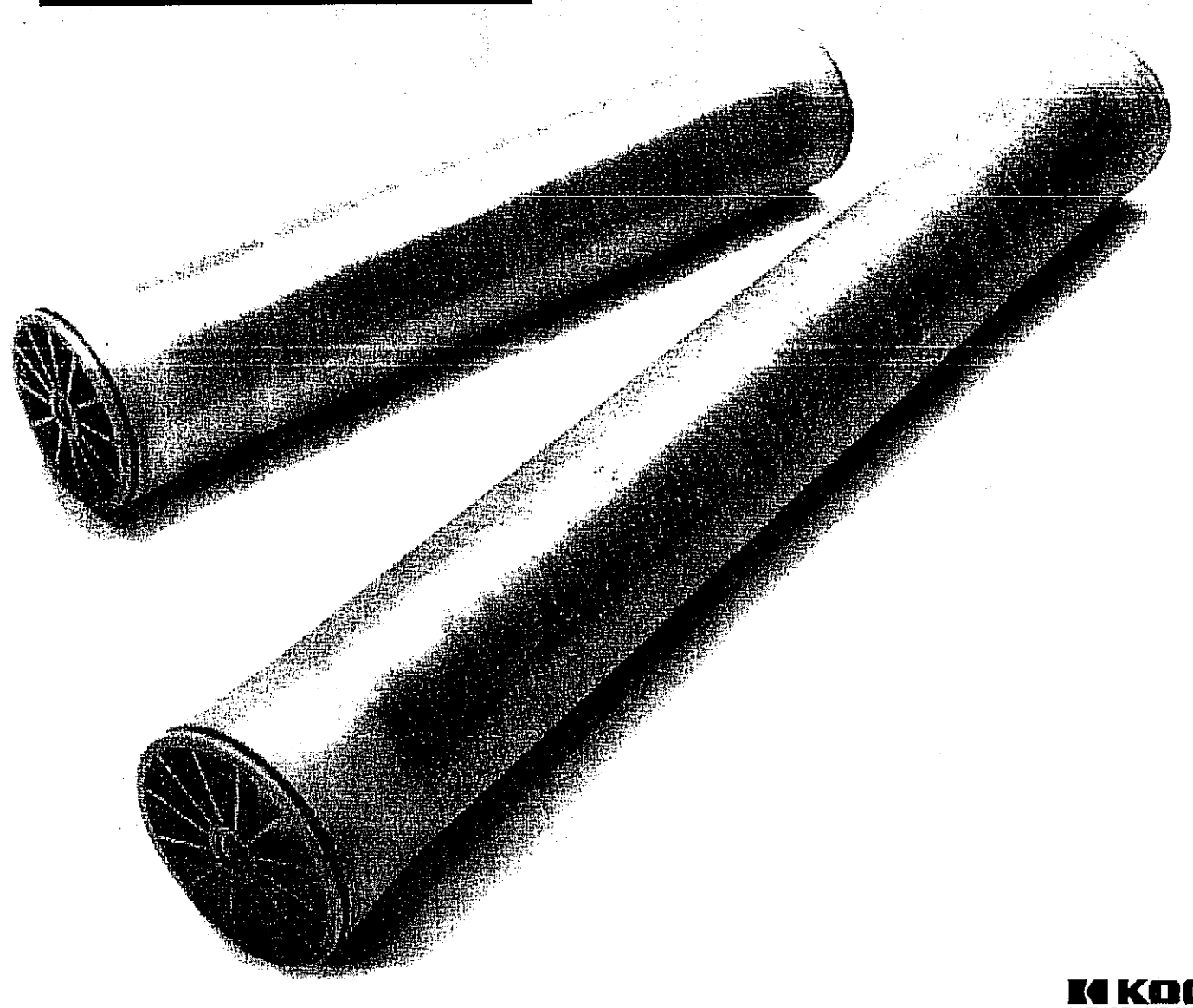
Otros productos de ***Inima*** son:

- ✓ **Consultoría Medioambiental**
- ✓ **Tratamiento de R.S.U. e Industriales**
- ✓ **Gestión de plantas y servicios municipales**
- ✓ **Depuración de Aguas Residuales Urbanas e Industriales**

Dirección:
Arturo Soria, 336
28033-Madrid (Spain)

Telf. : + 34 913 847 600
Fax: + 34 913 831511
Email: inima@inima.com

¡Agua!



KOCH
MEMBRANE SYSTEMS
Fluid Systems

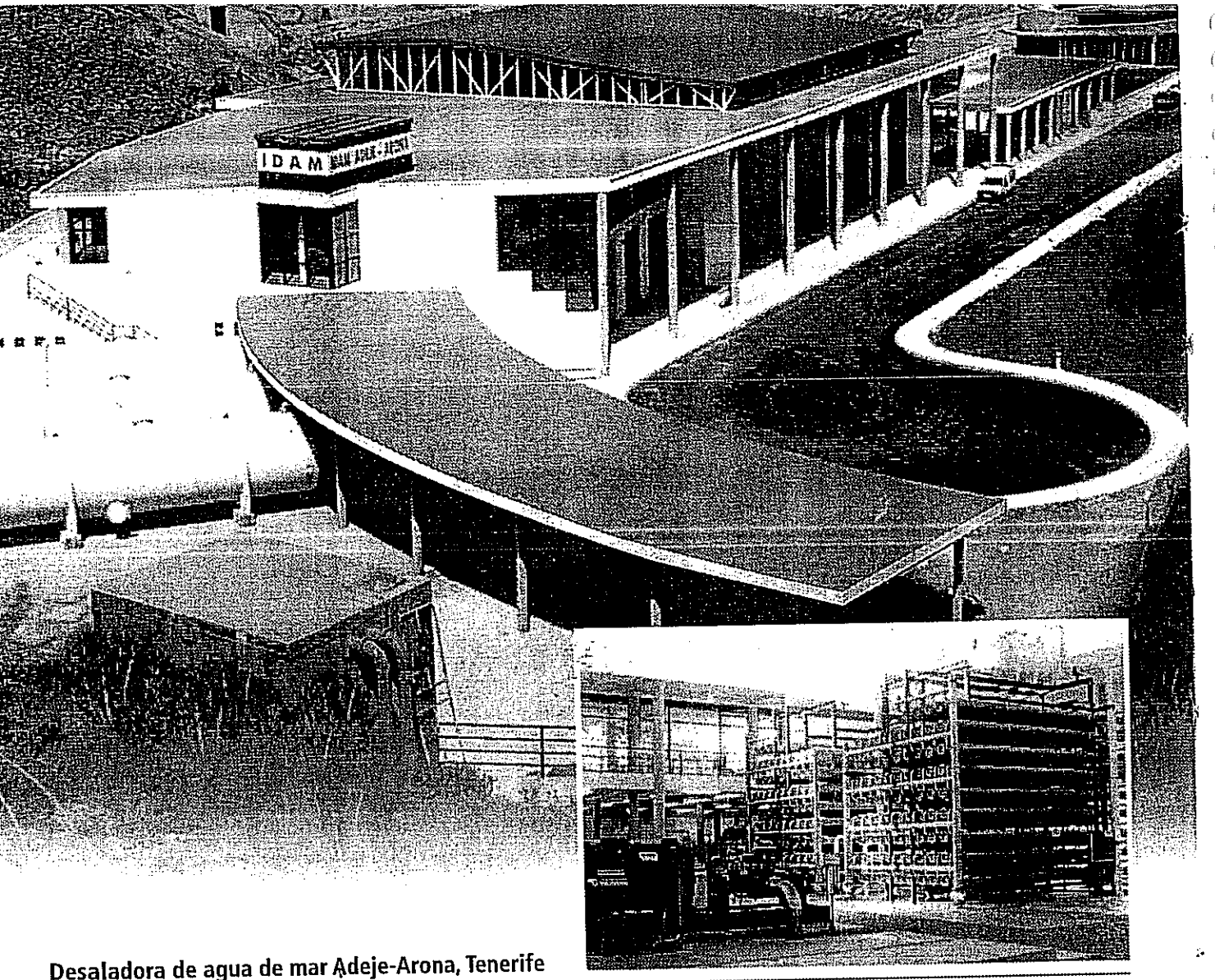
SOLUCIONES INTELIGENTES EN LA TECNOLOGÍA DE MENBRANAS

TFC Magnum, de 60" de longitud, de Koch Membrane Systems.
Esta membrana de alto rechazo combina un empaquetado de gran formato con la tecnología de película delgada TFC (*Thin Film Composite Technology*). El caudal que se obtiene con élla es un 50% superior al de las membranas estándar de 40" de longitud, sin detrimento del flujo ni del rechazo.

La Magnum proporciona ventajas tanto económicas como mecánicas. Sólo se necesitan 2 membranas Magnum para sustituir 3 membranas estándar, lo que implica un ahorro de juntas tóricas y de interconectores, así como un menor riesgo de fugas. Esto se traduce en una considerable reducción del coste del agua producida.

Koch Membrane Systems www.hochmembrane.com
850 Main Street, Wilmington, MA 01887-3388, Telephone 978-657-4250, Telephone 800-343-0499, Fax 978-657-5208
10054 Old Grove Road, San Diego, CA92131 Telephone 858-695-3840, Telephone 800-525-4369, Fax 858-695-2176


PRIDESA
LIDER EN TECNOLOGIA ESPAÑOLA
LEADER IN SPANISH TECHNOLOGY
OFICINAS GENERALES
HEAD OFFICES
Jose Luis Goyoaga, 36
Apartado 77 - 48950 ERANDIO (VIZCAYA)
Teléfono (94) 417 50 33 - Fax (94) 467 64 06
e-mail: pridesa@coiib.es



Desaladora de agua de mar Adeje-Arona, Tenerife

Especialistas en tratamiento de aguas

Los servicios de **SPA** abarcan las diferentes fases del desarrollo del proyecto: diseño, ingeniería, construcción, puesta en marcha, explotación y mantenimiento.

Estamos presentes en los siguientes campos:
- Depuración de aguas residuales.
- Tratamiento de efluentes industriales.
- Tratamiento de aguas potables.
- Desalación de aguas salobres y de mar.

Además **SPA** tiene la licencia exclusiva en España para la construcción de plantas según procesos: BIOTHANE y BIOBED (tratamientos anaerobios) y MANESMANN (desmineralización de agua).

La calidad en el diseño, desarrollo, producción y sistema de gestión medio ambiental de las actuaciones de **SPA** están avaladas por la obtención de los certificados ISO 9001 e ISO 14001.

AENOR ER Empresa Registrada ER - 14/2/95

Central Madrid:
Agustín de Foxá, 29. 8º plta. 28036 Madrid.
Tel. 91 323 14 07. Fax. 91 323 08 80.
E-mail: spafcc@mad.servicom.es

Delegación Cataluña:
Balmes, 89. 3º 4ª P. 08008 Barcelona.
Tel. 93 451 58 30. Fax. 93 451 65 53.

SPA
SERVICIOS Y PROCESOS AMBIENTALES, S.A.

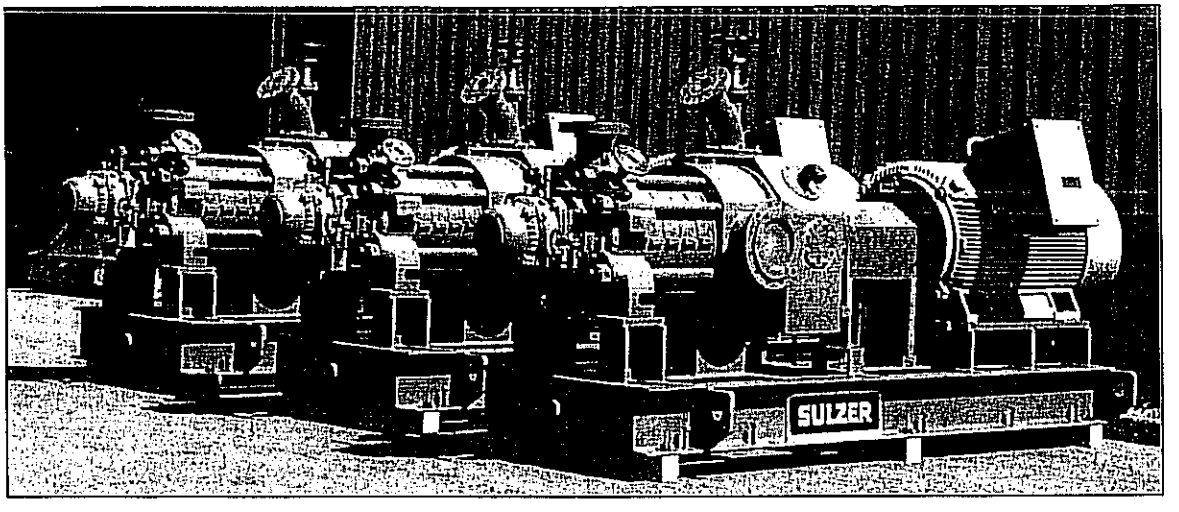
GRUPO FCC

SULZER PUMPS

Division of Sulzer Roteq

Eficiente y Compacta • Bombeo de Alta Presión y Recuperación de Energía para Plantas de Osmosis Inversa

Turbo-bombas TUP fabricadas en pequeñas series



Para la compañía LOCKWOOD & Cía. en Argentina, con destino a la planta Mastellone Hermanos, el 4 de Agosto de 1999, entregamos tres unidades de las turbo-bombas modelo TUP 100-300/5. Otras tres unidades idénticas se entregaron alrededor de la misma fecha a TERMOKIMIK CORP. con destino a la Central Térmica ENEL San Filippo de Mela (Italia).

Las turbo-bombas TUP (bomba de alta energía tipo MC con turbina Pelton montada en el mismo eje como unidad compacta) se utilizan para la desalación de agua de mar con tecnología de Osmosis Inversa. Esta moderna técnica de desalación de aguas salobres y de mar está ganando más y más importancia en el mercado. Debido al permanente incremento de la demanda de agua desalada (para consumo humano, industrial o agrícola) y el incremento en el rendimiento de esta tecnología, este segmento está creciendo muy rápidamente.

Con la posibilidad única de disponer y poder combinar las tecnologías de bombas y turbinas Pelton, SULZER presta una contribución sustancial al crecimiento de este mercado y a la divulgación del proceso de Osmosis Inversa.

OFICINAS CENTRALES

SUIZA
Sulzer Pumps Limited P.O. Box
CH-8404 Winterthur
Switzerland
Telephone +41 52 - 2 62 11 55
Telex 89 606 040 szch
Telefax +41 52 - 2 62 00 40

COMPAÑIAS DEL GRUPO

EUROPA

REINO UNIDO
Sulzer Roteq (UK) LTD.
Manor Mill Lane
GB-Leeds LS 118BR
Telephone +44 113 - 270 12 44
Telefax +44 113 - 272 12 44

FRANCIA
Sulzer Pompes France S.A.
Boîte postale 1217
F-78202 Mantes-la-Jolie
Cedex
Telephone +33 1 - 34 77 72 00
Telefax +33 1 - 34 77 72 23

ALEMANIA
Sulzer Pumpen (D) GmbH
Ernst-Blickle-Str.29

ESPAÑA
Sulzer España, S. A.
Apartado 14291
E-28080 Madrid
Teléfono: +34 91 567 57 50
Telefax: +34 91 567 57 86

NORTE AMERICA

USA
Sulzer Pumps (USA) Inc.
P.O. Box 10247
Portland, OR 97210 U.S.A.
Telephone +1503 - 226 52 00
Telefax +1503 - 226 52 86

CANADA
Sulzer Pumps CANADA Inc.
4129 Lozells Avenue
Burnaby. B. C.
Telephone +1604 - 420 53 30
Telefax + 1604 - 420 17 11

MEXICO
Sulzer (México) S. A. de C.V.
Sulzer Bingham Pumps
Apartado Postal 125 - Centro
Cuatitlán Izcalli
54700 Estado de México
Telephone + 55 5 - 328 13 00
Telefax +55 5 - 328 13 95

SUDAMERICA

BRASIL
Sulzer Brazil S.A.
Caixa Postal 84 54
01065-970 Sao Paulo/SP
Telephone + 55 11 - 752 20 00
Telefax +55 11 - 419 56 00

VENEZUELA
Sulzer Bombas C.A.
Apartado 81141
Caracas 1080-A
Telephone +58 2 - 941 33 20
Telefax +58 2 - 941 32 20

AFRICA

SUDAFRICA
Sulzer South Africa Ltd.
Pump Division
P.O. Box 8297
1406 Elandsfontein / Transvaal
Telephone +27 11 - 820 60 00
Telefax +27 11 - 820 62 05

ASIA / PACIFICO

SINGAPUR
Sulzer Pumps (PTE) LTD.
179 River Valley Road
02-05
Singapore 179033
Telephone +65 334 - 98 38
Telefax +65 334 - 98 37

INDIA
Sulzer Pumps INDIA Ltd.
9, MIDC
Thane Belapur Road (Digha)
Thane 400 701 /India
Telephone +91 22 -769 16 35
Telefax +91 22 - 769 11 20