

## Contaminación de las Aguas/Gestión de Aguas Potables.

Master en Ingeniería y Gestión  
Medioambiental

Curso 2015/2016

**PROFESOR**  
David Casero Rodríguez



Esta publicación está bajo licencia Creative Commons Reconocimiento, Nocomercial, Compartirigual, (by-nc-sa). Usted puede usar, copiar y difundir este documento o parte del mismo siempre y cuando se mencione su origen, no se use de forma comercial y no se modifique su licencia. Más información:

<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/3.0/>

## Índice

<b>1. Legislación.....</b>	<b>5</b>
1.1. Introducción.....	5
1.2. Legislación.....	8
1.3. Contaminación del agua.....	11
<b>2. Captaciones y Pretratamientos.....</b>	<b>17</b>
2.1. El origen del agua de consumo humano.....	17
2.2. Captaciones superficiales.....	18
2.3. Captaciones subterráneas.....	31
2.4. Limnología.....	44
2.5. Pretratamientos del agua potable.....	48
<b>3. Filtración.....</b>	<b>60</b>
3.1. Introducción.....	60
3.2. Teoría de la filtración.....	60
3.3. Funcionamiento de una instalación de filtración.....	66
3.4. Medio filtrante.....	67
3.5. Medios filtrantes mixtos.....	69
3.6. Filtros a presión.....	70
3.7. Nuevas técnicas de filtración.....	72
<b>4. Desinfección.....</b>	<b>76</b>
4.1. Introducción.....	76
4.2. El cloro en el agua.....	78
4.3. El ozono en el tratamiento del agua.....	84
4.4. Otras técnicas de desinfección.....	89
4.5. Subproductos de la desinfección.....	91

<b>5. Plantas de tratamiento de aguas.....</b>	<b>98</b>
5.1. Introducción.....	98
5.2. Características de una ETAP.....	98
5.3. ETAP de pequeño tamaño.....	99
5.4. ETAP de mediano y gran tamaño.....	101
5.5. Acondicionamiento.....	103
<b>6. Desalación.....</b>	<b>108</b>
6.1. Introducción.....	108
6.2. Origen de las aguas para desalación.....	109
6.3. Pretratamiento.....	114
6.4. Técnicas de desalación.....	125
6.5. Postratamiento.....	141
6.6. Sustancias y materiales.....	147
<b>7. Distribución de aguas.....</b>	<b>153</b>
7.1. Definición.....	153
7.2. Estructura Jerárquica.....	153
7.3. Tipologías.....	154
7.4. Elementos que integran una red.....	154
7.5. Criterios de diseño.....	158
7.6. Cálculos hidráulicos.....	163
<b>Bibliografía.....</b>	<b>169</b>

## 1. Legislación

### 1.1. Introducción

A pesar de nuestra absoluta necesidad de respirar aire puro, nada es más importante para nosotros que la calidad del agua que bebemos, aunque desde luego, necesitamos agua limpia también para otros usos.

Todas las poblaciones más importantes del mundo moderno se desarrollaron a orillas del agua. Pero no se debe a que la gente necesite gran cantidad de agua para sobrevivir. Mientras que las personas no necesitan más de 5 litros de agua para preparar medio kilo de carne, para hacer medio kilo de papel se requieren 125 litros de agua, y 300 litros para producir medio kilo de fertilizante.

Las ciudades crecieron cerca del agua fundamentalmente por las necesidades de agua que tiene la industria. En Estados Unidos la industria usa 100 millones de metros cúbicos por año de agua para enfriar, lavar y distribuir sus materiales, cantidad que equivale al 30% del agua de los ríos de todo el mundo. Sólo una pequeña parte del agua que se usa permanece limpia ya que, a medida que circula, va reflejando la historia de dónde ha estado y para qué ha sido usada.

Esta Materia, que vamos a tratar, centra su atención en asegurar la calidad del agua usada como bebida y el primer objetivo es debatir los problemas actuales del agua potable y la tecnología disponible para mitigarlos. No trata tanto de soluciones y de tecnología aproximada para tranquilizar y «sentirse bien», sino de ciencia y tecnología básicas.

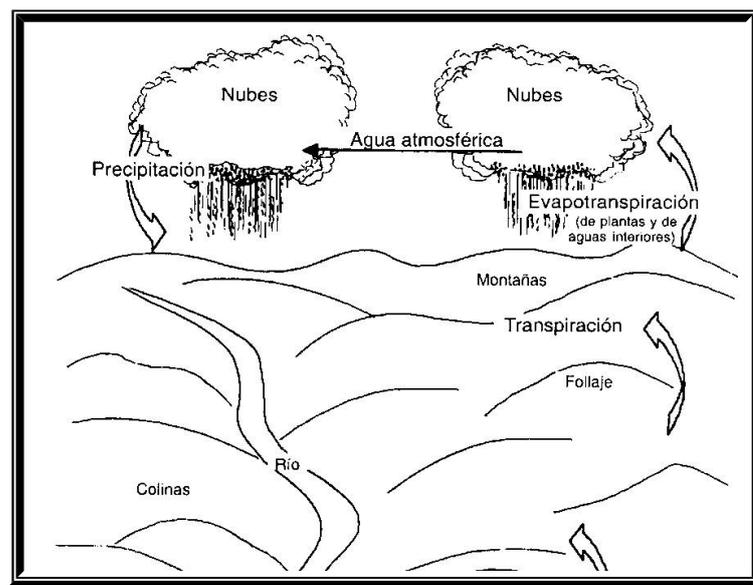
El interés por la calidad del agua no es nuevo. A través de la historia de la civilización, la preocupación por la disponibilidad de agua potable ha jugado un papel importante en el asentamiento de la población y en el modo en que esos asentamientos se convirtieron en las ciudades de hoy. Los que residimos en la mayoría de ciudades de España tenemos la fortuna de contar con un suministro abundante de agua dulce.

La tecnología ha permitido llevar el agua a nuestras zonas áridas. Pero incluso con esta abundancia, el desarrollo económico y el crecimiento de la población están restringiendo en cantidad y calidad el agua potable disponible.

Billones de metros cúbicos de lluvia caen en España (de manera desigual) llenando arroyos, ríos, lagos y ciénagas. El agua pasa a través del filtro natural del suelo para recargar los acuíferos. Y cada día los agricultores de regadío, los usuarios de la industria, y los usuarios domésticos extraen cientos de millones de metros cúbicos de un volumen finito de agua.

Usamos esta agua para todo, desde el lavado de los platos y el riego del jardín, hasta el enfriamiento de la maquinaria de los complejos industriales.

Cuando acabamos con esto, el agua (materia siempre y para siempre en movimiento) sigue su camino en el ciclo hidrológico -llega a un arroyo, río, embalse, lago o pantano- incorporando todos los contaminantes recogidos en su curso.



Cuando abrimos el grifo para llenar el vaso con agua afirmamos la creencia de que tenemos derecho al agua de buena calidad. Lo que a la mayoría nos preocupa es que el agua que salga del grifo esté en buen estado, sea una sustancia que no nos cause daño. ¿Es este realmente el caso? ¿El agua de nuestros grifos está en buen estado? Hemos oído decir que en casi todos los abastecimientos públicos de agua en España hay sustancias químicas que podrían producir cáncer (Trihalometanos).

Otro aspecto de interés es cómo sale el agua del grifo. ¿Ha sido comprobada de acuerdo con la normativa y los requisitos aplicables? ¿Son fiables las comprobaciones? Los funcionarios de sanidad opinan que el agua es segura ¿saben realmente si es o no segura? ¿Son las normativas estatales adecuadas o no?

El agua, una sustancia que se usa y rehúsa constantemente, es reciclada por el ciclo hidrológico. Para los usuarios del agua directamente afectados por la calidad de la misma uno de los pasos más importantes para proteger la salud es asegurarnos de que el agua disponible para beber es potable, un paso no tan fácil de alcanzar. No podemos decir cómo es la calidad del agua simplemente

mirándola, ya que sabemos que puede aparecer clara en un vaso y contener tóxicos químicos, o patógenos víricos o bacterianos, causantes de enfermedades.

Para potabilizar el agua, las poblaciones utilizan plantas de tratamiento y una amplia variedad de tecnologías que van desde el simple desbaste o filtración gruesa, los filtros de arena y la desinfección, hasta procesos químicos y mecánicos de gran complejidad.

Sin embargo, estos sistemas no son infalibles. Cuando fallan, los usuarios quedan vulnerables a múltiples riesgos químicos y biológicos.

En 1993, un organismo microscópico del género *Cryptosporidium* enfermó a más de 400.000 personas en Milwaukee, Wisconsin y dejó 100 muertos. En 1994, dos brotes del mismo protozoo mataron a 19 personas y enfermaron a 100 más en Las Vegas. El pánico sobre *Cryptosporidium* y *Giardia* causó una conmoción social durante dos meses en Sidney, Australia entre julio y septiembre de 1998, que acabó costando millones de dólares, aunque no hubo enfermos. Como resultado final, el servicio de tratamiento paga enormes multas por controles incompetentes y por no seguir la máxima «es mejor prevenir que lamentar».

Muchos usuarios del agua y muchos tecnólogos no son ignorantes sobre la crisis que actualmente padece el agua potable. La publicidad generada por los sucesos de Milwaukee, Las Vegas y Sidney, Australia han puesto de manifiesto ese punto flaco. El brote de *Cryptosporidium* tuvo el efecto de un tornado. Los controles de los parámetros microbiológicos volvieron a la actualidad después de haber sido desplazados en los años 70; volvió la desinfección, frente a otros métodos de tratamiento de agua más sofisticados.

De la noche a la mañana, *Cryptosporidium* y *Giardia* se convirtieron en objetivos urgentes de interés y el miedo a los carcinógenos (del radón, plomo y arsénico) desaparecieron de la cima de la agenda reguladora.

A finales de 1998, a los dos nuevos objetivos de interés, *Cryptosporidium* y *Giardia*, se unió otro, no necesariamente nuevo, pero esta vez con mayor énfasis: los subproductos aparecidos al aplicar desinfectantes, esto es, los componentes orgánicos halogenados, principalmente los trihalometanos (THM). Un resultado parcial de esta preocupación, cada vez mayor, es el resurgimiento de un proceso nuevo «tipo paquete» en la industria del agua, que se ha desarrollado a una velocidad tremenda, y es que los consumidores quieren garantías de que el agua que consumen es segura.

En un pasado no muy lejano, la determinación de si una fuente de agua para beber estaba contaminada (por ej., en Inglaterra) se hacía con un pez. Si el pez moría, el agua estaba contaminada y por tanto debía ser depurada. Las discusiones y comparaciones sobre el grado de

contaminación se definían con una fórmula calculada como 100 dividido entre el tiempo de supervivencia del pez tomado en minutos. Ahora las pruebas son más complejas, pero algunas veces no son más fiables.

## 1.2. Legislación

La calidad del agua, es un estado de ésta, caracterizado por su composición físico-química y biológica. Este estado deberá permitir su empleo sin causar daño, para lo cual deberá reunir dos características:

- 1.- Estar exenta de sustancias y microorganismos que sean peligrosos para los consumidores.
- 2.- Estar exenta de sustancias que le comuniquen sensaciones sensoriales desagradables para el consumo (color, turbiedad, olor, sabor).

El criterio de potabilidad del agua depende fundamentalmente del uso al que se la destina (humano, industrial, agrícola, etc).

Agua potable es el agua, ya sea de superficie o subterránea, tratada y el agua no tratada por no estar contaminada. La definición de agua potable se ha ido adaptando al avance del conocimiento científico y a las nuevas técnicas, en especial a las relacionadas con el análisis de contaminantes.

La mala calidad del agua afecta a infinidad de actividades vitales, es un bien tan preciado que en la exposición de la Carta Europea del Agua comienza con “Sin agua no hay comida, no hay bebida, ni luz, ni calor, ni lluvia. ¡Sin agua no hay vida posible...”

Hasta hace unas decenas de años la calidad de un agua destinada a un abastecimiento se centraba principalmente en que el agua estuviera exenta de sabores, olores, no fuera muy dura y no contuviera bacterias patógenas, confiándose en gran medida en que el poder autodepurador de los embalses o ríos, y la protección de las zonas de captación eran suficientes para lograr una aceptable calidad que se completaría con un tratamiento simple de decantación, filtración y desinfección, así como hacer determinadas comprobaciones generalmente bacteriológicas del agua en la red, ausencias de sabores y olores y presencia de ligeras concentraciones del desinfectante empleado.

Hoy día y más aún de cara al futuro, y como consecuencia de la polución creciente y los mayores avances de la técnica y la ciencia hay que considerar además otros caracteres que inciden de forma perjudicial en la salud del consumidor (pesticidas, detergentes, subproductos de la desinfección y otras sustancias orgánicas e inorgánicas así como protozoos, virus, bacterias, etc).

La consideración legal sobre la potabilidad de un agua se apoya o se basa en fijar una serie de compuestos o sustancias y asociarlas con unos contenidos aceptables.

Actualmente el concepto legal que regula la calidad de las aguas destinadas al consumo humano en España se basa en la **Directiva 98/83/CE del Consejo de 3 de Noviembre de 1998**, relativa a la calidad de las aguas destinadas al consumo humano, que revisa la Directiva de 1.980 a la que se adaptó la reglamentación española mediante el Real Decreto 1138/1990 por el que se aprobó la Reglamentación Técnico-Sanitaria para el abastecimiento y control de calidad de las aguas potables de consumo público, hoy ya derogado.

En general las normativas entienden como agua potable aquella que cumple una serie de caracteres organolépticos, físico-químicos, relativos a sustancias no deseables, relativos a sustancias tóxicas, microbiológicas y de radiactividad. Estableciéndose unos valores máximos admisibles para una serie de parámetros.

Estos valores máximos corresponden a la mínima calidad admisible en el agua potable.

La Directiva europea, se centra en el cumplimiento de unos parámetros de calidad y salubridad y ofrece a la vez la posibilidad a los Estados Miembros de añadir otros parámetros, si lo consideran oportuno. Esta Directiva, tiene por objeto (art.1) proteger la salud de las personas de los efectos adversos derivados de cualquier tipo de contaminación de las aguas destinadas al consumo humano, garantizando su salubridad y limpieza.

En otro de los artículos de la Directiva se establece que las aguas destinadas al consumo humano deben ser "salubres y limpias". Se deduce por tanto que el "agua salubre y limpia" es el nuevo concepto de agua potable.

Para la Directiva las aguas son salubres y limpias, cuando no contienen ningún tipo de microorganismo, parásito o sustancia, en una cantidad o concentración que pueda suponer un peligro para la salud humana, y cumple con unas requisitos mínimos en cuanto a parámetros microbiológicos y químicos que especifica.

Los principales puntos de vista seguidos por la Comisión Directiva han sido:

- Revisar los valores paramétricos de acuerdo con los últimos conocimientos científicos.
- Aumentar la transparencia en cuanto a información hacia los consumidores.
- Eliminar algunos parámetros de la anterior Directiva y crear otros nuevos.

Los Estados Miembros tienen dos años (hasta diciembre de 2000) para trasladar la Directiva a su legislación nacional y cinco años (hasta diciembre de 2003) para asegurar que el agua potable cumple con los estándares fijados, excepto para los bromatos (10 años), plomo (15 años) y trihalometanos (10 años). La transposición de la Directiva 98/83/CE a la reglamentación española se recoge en el "Real Decreto 140/2003 por el que se establecen los criterios sanitarios de la calidad del agua de consumo humano". (VER ANEXO AL FINAL).

El agua del grifo no cae simplemente del cielo, hasta llegar a él es necesario disponer de todo un sistema de abastecimiento en el que juegan un papel fundamental las instalaciones de tratamiento, es decir, recorren un camino lleno de controles, vigilancia, procesos y análisis.

El análisis del agua en su origen, nos proporciona los primeros datos respecto a su calidad, orientándonos en la selección de su captación y facilitando el tratamiento que hemos de aplicarle posteriormente.

Un agua potable destinada al consumo humano, debe cumplir ante todo con una calidad sanitaria apta, tanto inmediatamente después de su proceso de tratamiento, como presentar una estabilidad biológica en la red de distribución.

Relación de reglamentación existente:

- Real Decreto 140/2003 por el que se establecen los criterios sanitarios de la calidad del agua de consumo humano
- Corrección de erratas del Real Decreto 140/2003
- Orden de 11 de Mayo de 1988 sobre características básicas de calidad que deben tener las aguas superficiales cuando sean destinadas a la producción de agua potable
- Orden SAS/1915/2009, de 8 de julio, sobre sustancias para el tratamiento del agua destinada a la producción de agua de consumo humano.
- Orden SCO/778/2009, de 17 de marzo, sobre métodos alternativos para el análisis microbiológico del agua de consumo humano.
- Orden SCO/1591/2005, de 30 de mayo, sobre el Sistema de Información Nacional de Agua de Consumo.

### 1.3. Contaminación del agua

Desde que el agua surge de las nubes, hasta que finalmente vuelve otra vez a ellas por evaporación, el agua condiciona la vida de todos los seres vivos. Es el mejor regalo que nos da la naturaleza.

La estructura molecular del agua es dipolar, con una constante dieléctrica muy alta, superior a cualquier otro líquido, es por esto que tiene la propiedad de disolver cualquier sustancia, aunque sea en cantidades infinitamente pequeñas, esto es la causa de que el agua no sea casi nunca químicamente pura, suele llevar siempre sustancias disueltas (sales, gases).

En general el agua contiene siempre algunos iones hidrógeno, lo que le confiere un pH ligeramente inferior a 7.

Dado su gran poder disolvente, comienza a degradarse al ir disolviendo y arrastrando, ya en su camino en la atmósfera, sustancias en ella presentes, y continúa posteriormente su contaminación al discurrir por la superficie terrestre e infiltrarse en el terreno, formando las aguas subterráneas, continuando la incorporación de sustancias que le confieren unas características típicas (en algunos casos positivas), dependientes de estos terrenos, constituyendo lo que podemos llamar el agua natural (si en la atmósfera no hubiese disuelto nada).

Las características de este agua natural, generalmente aguas superficiales, pueden llegar a ser tales por problemas de contaminación artificial o inducida, que el tratamiento convencional de potabilización no pueda devolverla a las condiciones necesarias para el consumo humano.

Si bien las grandes epidemias de épocas pasadas, tales como el cólera y las fiebres tifoideas, motivadas por el consumo de agua en no buenas condiciones sanitarias, quedan ya bastante lejanas y olvidadas y fueron dominadas al mejorar las condiciones de suministro de agua, no lo es así en todas las áreas pobladas de nuestro planeta. Hay lugares donde aún hoy, abrir un grifo y obtener agua es impensable.

Más de 1.200 millones de personas consumen agua sin garantías sanitarias. Cada año mueren en nuestro planeta (en los países subdesarrollados), cinco millones de personas (tres millones de niños) por culpa del agua contaminada y no tener acceso a agua sanitariamente limpia.

Sin llegar a estos extremos, sigue siendo desgraciadamente posible en países desarrollados, que el agua destinada a la potabilización, contenga algunas otras sustancias ciertamente perjudiciales, como pueden ser: elevados contenidos de materias orgánicas e inorgánicas, micropoluentes minerales, constituidos por elementos tóxicos como metales pesados, procedentes de desechos industriales, u orgánicos procedentes de la utilización de detergentes, pesticidas, insecticidas, hidrocarburos, tanto de desechos industriales, como arrastrados por las aguas pluviales sobre

terrenos agrícolas y urbanos; microorganismos diversos, algunos de ellos desarrollados en las propias redes de abastecimiento, que no cuentan con un contenido eficaz de desinfectante residual, o cistos y oocistos de ciertos protozoos no destruidos por los productos de desinfección de las plantas de tratamiento, siendo a la vez tan pequeños que pueden llegar a escaparse de los procesos de coagulación, decantación, filtración (por ejemplo oocistos y cistos de *Cryptosporidium* y *Giardia*), e incluso contaminantes, como los subproductos originados como consecuencia de la propia desinfección del agua, cada vez más cuestionados.

Ante toda esta amenaza, la lucha se centra en varias direcciones:

- 1) Evitar vertidos agrícolas, urbanos e industriales a cauces públicos sin la depuración y tratamiento específico apropiado.
- 2) Estudiar y seleccionar las captaciones de aguas destinadas al consumo humano.
- 3) Someter, en todos los casos, al proceso de tratamiento más idóneo y eficaz, el agua de abastecimiento público, antes de llegar a la red.
- 4) Evitar recontaminaciones en la propia red.

El crecimiento urbano e industrial y sus vertidos están contaminando e influyendo negativamente en la calidad del agua de las diferentes cuencas hidrográficas y otras fuentes, mientras que otras se están secando al extraerse y utilizarse más agua de la que repone la naturaleza.

Todas las aguas superficiales y subterráneas constituyen ecosistemas no cerrados que contienen sustancias en disolución, en suspensión y organismos vivos y a su vez estos ecosistemas están recibiendo aportaciones naturales y otras no tan naturales, derivadas de actividades humanas y productivas diversas.

Las causas fundamentales de contaminación pueden quedar abarcadas en los siguientes puntos:

- 1) Aporte de nutrientes como fósforo, nitrógeno, carbono, etc procedentes de aguas residuales urbanas y escorrentías agrícolas que provocan la eutrofización de los embalses con el consiguiente incremento del plancton, bacterias, en algunos casos cianobacterias y eliminación del oxígeno disuelto y aparición de olores y sabores diversos.
- 2) El agua caliente vertida por industrias e instalaciones de refrigeración que reduce el oxígeno causando daños a la propia vida acuática.

- 3) Materias orgánicas procedentes de residuos industriales y domésticos que se reducen por bacterias aeróbicas, que consumen oxígeno.
- 4) Los compuestos inorgánicos generalmente procedentes de la industria y minería originan efectos más o menos tóxicos además de causar malos sabores y corrosión de equipos.
- 5) Los compuestos orgánicos como detergentes, aceites, pesticidas, fertilizantes, plagicidas etc.
- 6) Los residuos humanos y animales pueden introducir bacterias, virus y otros protozoos que pueden causar graves trastornos, y obligar a tratamientos muy intensos y específicos de esta agua.
- 7) Los sólidos en suspensión procedentes de arrastres de suelos y otros vertidos industriales.

Estos nos lleva a resaltar la importancia que tiene el control de la calidad del agua en origen, en especial en lo que respecta a los posibles contaminantes que se acaban de describir, tanto como en centrarse en el abastecimiento y en la propia red de distribución, a este respecto las diferentes legislaciones de distintos países establecen las características que deben tener las aguas que se destinan al abastecimiento de agua potable.

La calidad de las aguas superficiales destinadas a abastecimientos públicos está regulada por Orden del 11-5-1988, que establece las características básicas de calidad que deben respetarse en aquellos lugares de los ríos en los que sus aguas se deriven para ser destinadas al consumo humano, en función del grado de tratamiento al que se sometan antes de su distribución. A este respecto, en esta Orden, en cuanto al tratamiento que deben recibir para su potabilización, se establece que las aguas superficiales se clasifican en los tres grupos siguientes:

Tipo A1.- Tratamiento físico simple

Tipo A2.- Tratamiento físico normal, tratamiento químico y desinfección

Tipo A3.- Tratamiento físico y químico intensivo, afino y desinfección.

A cada tipo le corresponde una calidad diferente, con unas características físicas, químicas y biológicas que se pueden revisar en la orden que se incluye en el Anexo de documentación.

Los abastecimientos son la pieza clave de la gestión del agua de consumo, por esta razón, es preciso respetar una serie de criterios sanitarios básicos. En este apartado se describen de forma esquemática los más importantes.

### Objetivo General de un Abastecimiento

Los abastecimientos deben distribuir agua a la población en cantidad suficiente y con la calidad establecida conforme a la legislación vigente.

Las instalaciones no transmitirán al agua sustancias o propiedades que contaminen o empeoren la calidad o supongan un alejamiento de los criterios de calidad.

- El agua puede proceder de cualquier origen, siempre que no entrañe un riesgo para salud de la población abastecida.
- Las captaciones deben estar suficientemente protegidas y con carteles visibles de señalización.
- La calidad del agua bruta para la producción de agua destinada a consumo humano, debe tener una calidad de partida tal que pueda ser potabilizada adecuadamente mediante los tratamientos previstos en cada abastecimiento.

En este sentido, puede consultarse la legislación medioambiental vigente sobre “aguas superficiales destinadas a la producción de agua potable” (prepotables), en el índice de legislación del Ministerio de Medio Ambiente. En ella se establecen los tratamientos mínimos de potabilización que son precisos en función de la calidad del agua de la captación. En los Planes Hidrológicos de cada Demarcación Hidrográfica pueden existir requisitos adicionales. En el caso de las cuencas intracomunitarias, es preciso dirigirse para ampliar esta información a las autoridades sanitarias y ambientales de cada Comunidad Autónoma.

### Potabilización del agua

- El tratamiento mínimo obligatorio del agua antes de distribuirla a la población es una filtración y desinfección.
- Cualquier sustancia o preparado que se agregue al agua o sea empleado en su potabilización o mejora del agua de consumo humano deberá cumplir con lo que establece la legislación vigente.
- Una vez las aguas han sido desinfectadas, los subproductos derivados deberán tener los niveles más bajos posible, sin comprometer en ningún momento la eficacia de la desinfección.

- Los procesos de tratamiento de potabilización no transmitirán al agua sustancias o propiedades que contaminen o degraden su calidad, y supongan el alejamiento de los criterios de calidad del agua y un riesgo para la salud.

#### Depósitos

- Los depósitos deberán estar bien protegidos, tapados y señalizados.
- Las estructuras, elementos de cierre, valvulería y canalizaciones deberán mantenerse en buenas condiciones.
- Se recomienda que todo depósito tenga al menos dos vasos para facilitar su limpieza.
- Debe efectuarse una limpieza periódica, con desincrustación y desinfección seguida de aclarado con agua apta para el consumo.
- Los materiales y el revestimiento deben ser adecuados y conforme a la legislación vigente.

#### Redes de distribución

- Las redes de distribución deberán estar diseñadas de tal modo que no existan puntos o situaciones que puedan dar lugar a contaminación o deterioro del agua (Por ejemplo: zonas de estancamiento prolongado, o “fondos de saco”).
- En caso de red mallada, debe disponer de mecanismos de cierre por sectores y posibilidad de realizar purgas selectivas.
- Es necesario un lavado y/o desinfección de las tuberías antes de la puesta en marcha de un tramo nuevo o reparado.
- Los materiales y revestimientos deben ser adecuados y conforme a la legislación vigente.

#### Cisternas

- Sólo se usarán para el transporte de agua.
- Deben portar carteles visibles de señalización: grifo blanco sobre fondo azul.

#### Instalación interior

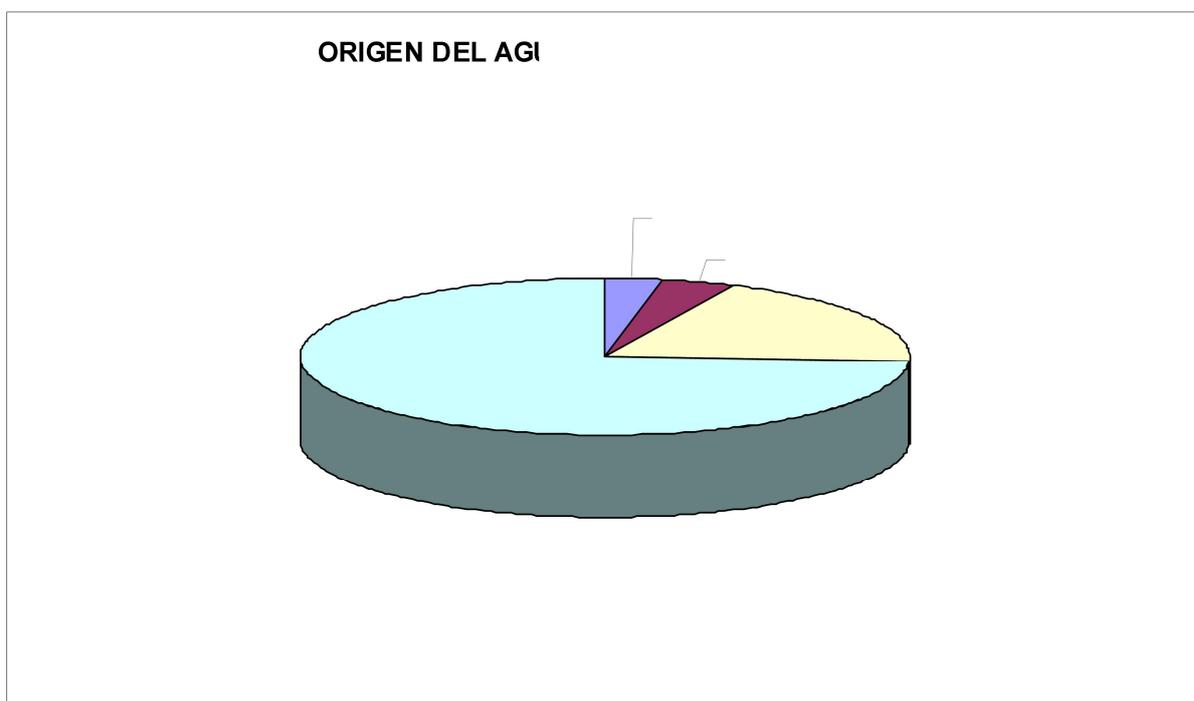
- El diseño de las instalaciones interiores y su funcionamiento no deberá facilitar la contaminación o empeoramiento de la calidad del agua.
- Los materiales y el revestimiento serán adecuados y conforme a la legislación vigente, así como las técnicas de instalación.
- El depósito de la instalación interior deberá estar tapado, dotado de un desagüe, y con medidas de protección.
- Se realizará una limpieza periódica del depósito con desincrustación, desinfección y aclarado, al menos una vez al año.
- Los aparatos empleados en las instalaciones interiores, como por ejemplo los grupos de presión, sistemas unitarios de tratamiento, filtración, ósmosis inversa, etc; deben estar homologados para tal uso por el Ministerio de Industria y Turismo y Comercio.

## 2. Captaciones y Pretratamientos

### 2.1. El origen del agua de consumo humano

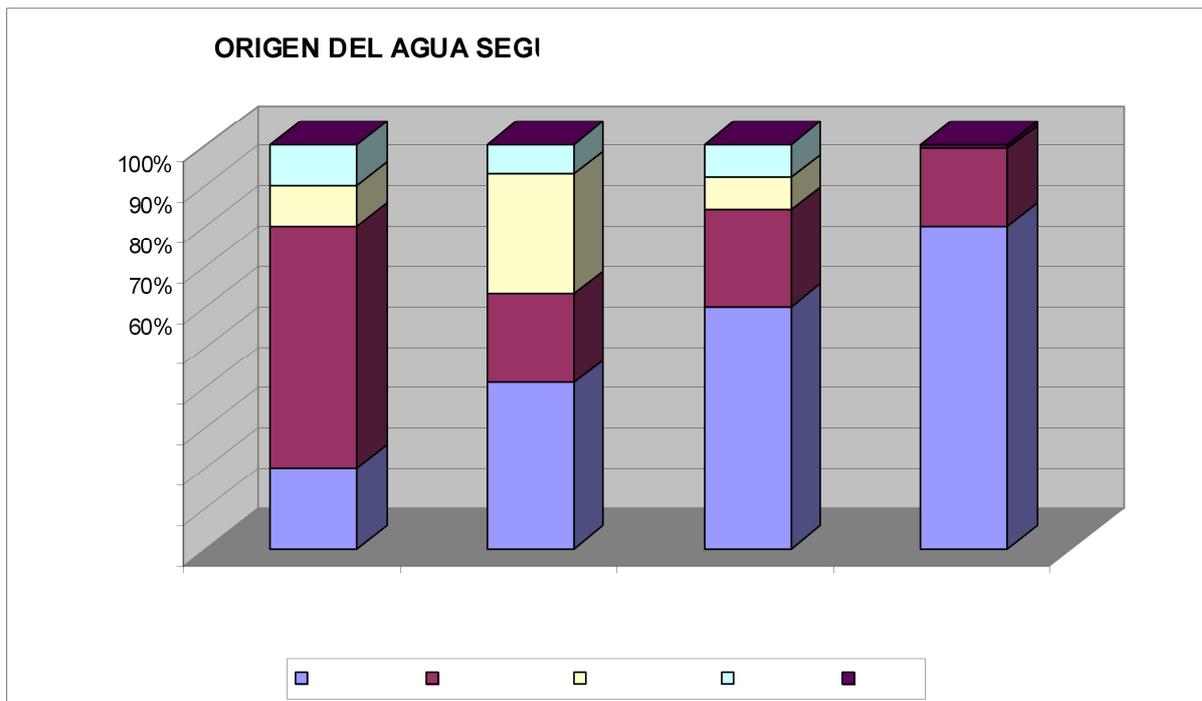
El agua para consumo urbano presenta cuatro grandes grupos de origen, tal como se presenta en el gráfico siguiente, estos son:

- El origen superficial, que supone el 74% del total del agua dispuesta
- El origen subterráneo, es el segundo a bastante distancia, supone el 19%
- El agua procedente de desalación, ya ocupa el tercer lugar con un 4%
- El agua procedente de manantiales, sólo representa el 3% del total.



Las cuencas hidrográficas donde el agua de origen superficial presenta mayor proporción sobre el total se corresponden con las de mayor superávit hídrico. La excepción se encuentra en la cuenca del Segura debido a que el trasvase Tajo-Segura la alimenta de agua superficial. También se destaca la prácticamente nula aportación del agua de origen superficial en Canarias.

Al analizar la importancia del agua superficial en función del tamaño de la población, se aprecia que las poblaciones menores de 50.000 habitantes se abastecen principalmente de agua subterránea (el 54%) y sólo un 27% de agua superficial, si bien la proporción de este origen aumenta conforme se incrementa el tamaño de la población. Así en grandes poblaciones el agua superficial supone el 89% del consumo total.



Un último aspecto a señalar se refiere a que un 84% del agua procede de captaciones propias de los servicios de abastecimiento, mientras que en el 16% restante el agua es adquirida a otras entidades. Se observa que los abastecimientos de las grandes áreas metropolitanas tienden a proveerse en exclusiva de captaciones propias.

## 2.2. Captaciones superficiales

Una vez estimados los caudales necesarios para cubrir las necesidades de agua potable de una comunidad, el siguiente paso es la localización y selección de los recursos que ofrezcan, no solo dicha cantidad, sino economía de construcción y explotación, según los siguientes criterios:

- Cercanía al punto de destino lo que será favorable en la economía de transporte del agua.

- Calidad del agua en origen que incidirá de forma determinante, sobre los costos de potabilización y tratamiento (p.e., para una ciudad costera el recurso más próximo será el agua de mar, pero su costo de potabilización hará, en general, preferible otra alternativa).
- Seguridad en el suministro relacionada con las fluctuaciones estacionales, tanto de la cantidad de recurso como de su calidad, así como la influencia de condicionantes meteorológicos, geológicos, etc. Frecuentemente, puede ser necesario almacenar parte del recurso excedente en ciertas épocas del año, para compensar la escasez en otras (regulación).
- Facilidad de extracción y/o captación que influirá, lógicamente, en los costos del proyecto.
- Topografía de la zona que permitirá o no conducirla por gravedad a su punto de consumo, así como que esto se realice mediante obras más o menos sencillas.
- Posibilidades de ampliación que permitirán o no, resolver el problema a más largo plazo del previsto inicialmente por el estudio.

Solucionado este punto, es necesario pensar en su captación sea esta: superficial, cuando el recurso utilizado se encuentra por encima de la corteza terrestre (ríos, lagos de agua dulce, embalses, etc.) o subterránea, cuando el recurso se encuentra profundo.

Las captaciones superficiales cada una de las cuales tiene sus propios problemas asociados y su propia tipología se clasifican en:

### **2.2.1. Captaciones de agua de lluvia**

El captar el agua de la lluvia es una “solución” extrema, que tan solo se emplea en aquellos casos justificados por circunstancias especiales. Se aplican casi siempre a edificaciones aisladas, caseríos o pequeños pueblos y puede constituir una solución aceptable como reserva de estiaje en las regiones de lluvias escasas y desiguales, resolviéndose de esta forma la escasez estacional de otros recursos más fácilmente captables.

Una captación de agua pluvial consta de las siguientes partes:

Una superficie de recogida de agua, que debe estar limpia y ser lo suficientemente impermeable como para no permitir que cierta parte importante del agua precipitada se pierda por infiltración en el terreno. Puede ser un tejado, (que no sea de paja, cartón o metal), un patio empedrado o de hormigón, una ladera no cultivada o en general, cualquier superficie preparada con tal fin.

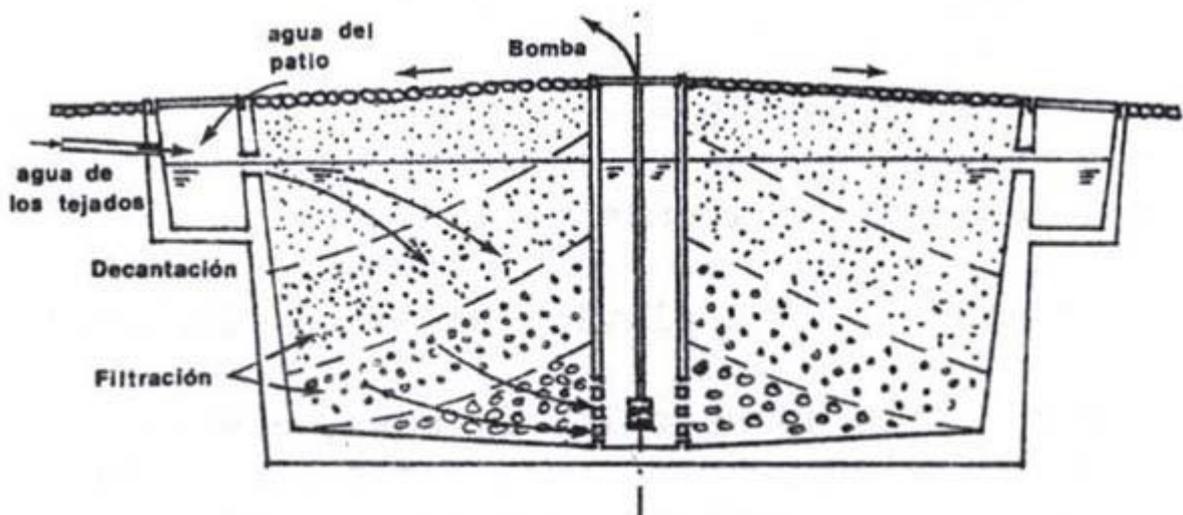
Un depósito en el que se almacene el agua, denominado aljibe, que se construye subterráneo para minimizar las pérdidas por evaporación y preservar la temperatura del agua.

Un tratamiento del agua recogida que generalmente se reduce a una simple filtración sobre lecho de arena y se realiza en el interior del propio aljibe. En ocasiones, se añade un depósito de decantación.

Los aljibes deben estar dotados de un desagüe de fondo que permita su vaciado y de un aliviadero que permita evacuar las cantidades sobrantes. Se usan, normalmente tres tipos de aljibes:

a) El aljibe veneciano, se denomina así por haber sido usado de forma intensiva en la ciudad de Venecia, bajo los patios de sus casas. Consta de un volumen revestido, relleno de material filtrante, con un pozo central de toma y canales laterales de entrada donde se produce una decantación elemental.

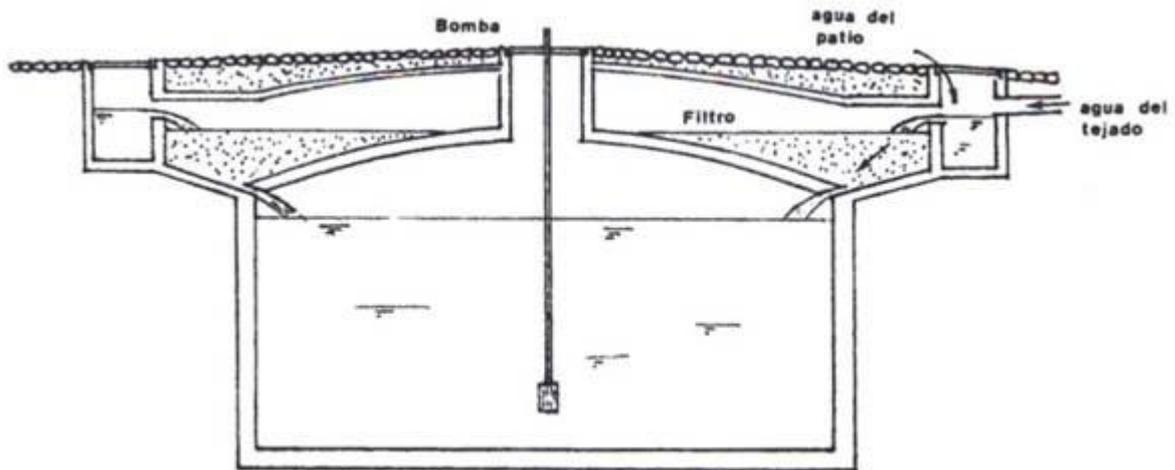
El agua pasa de los canales al interior de la masa filtrante, recorriéndola de arriba hacia abajo y entrando en el pozo por su parte inferior. El material filtro se subdivide en tres o en cuatro capas de granulometría diferente. Tiene la ventaja de que su bóveda se apoya directamente sobre el material filtro y el inconveniente de que su capacidad útil es de 30 al 40 % de su volumen total.



Aljibe Veneciano

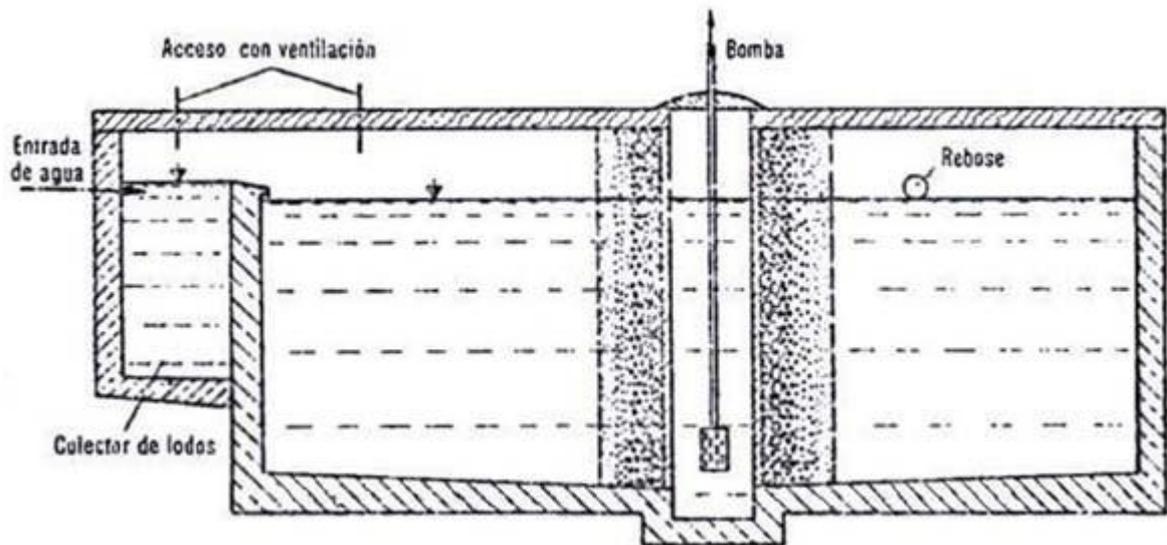
b) El aljibe de filtro superior recoge el agua y esta pasa por un filtro situado en su parte más alta que desemboca en el aljibe propiamente dicho, de esta forma el agua no permanece en el filtro

más tiempo del necesario para su filtración. Su bóveda es ahora autosoportada, pero su capacidad es casi del 100% de su volumen.



Aljibe de filtro superior.

c) El aljibe americano recoge y almacena el agua directamente, para el momento de su salida esta pasa por un filtro de arena de granulometría creciente, constituido por cilindricos concéntricos en torno al tubo de aspiración.



Aljibe Americano.

### 2.2.2. Captaciones de agua en ríos

Las tomas fluviales y en ellas la selección del punto de extracción, son sin duda, las más delicadas de todas las obras de captación, puesto que el agua de los ríos presenta problemas de calidad,

variaciones estacionales de la temperatura, contaminación “aguas arriba” por efluentes urbanos e industriales, fuertes puntas de turbiedad (riadas) además de factores hidrológicos que condicionan la obra de captación como: la inestabilidad del fondo, las variaciones del nivel del agua, la navegación y la flora acuática entre otros.

Así mismo las variaciones estacionales de caudal pueden ocasionar serios problemas a la hora de conseguir el caudal durante el verano, sin perjudicar a terceros, (pesca, riegos, navegación, etc.), en alguno de estos casos puede ser necesario regular el río por medio de un embalse. Sin embargo en el momento analizaremos las captaciones fluviales sin regulación, en las que debe bastar con el caudal de estiaje para abastecimiento, sin que el curso del agua resulte perjudicado por esta toma. Así las captaciones fluviales pueden clasificarse en:

a) Captaciones de fondo: La solución de captación en el lecho de un río tiene la ventaja de captar un agua de mejor calidad, ya que se desechan las aguas de la superficie, lógicamente más contaminadas. En estas se coloca el punto de toma (que deberá ir dotado con una alcachofa que impida el paso de impurezas de gran tamaño) apoyado sobre el lecho del río. Esta solución se ve afectada por los siguientes factores:

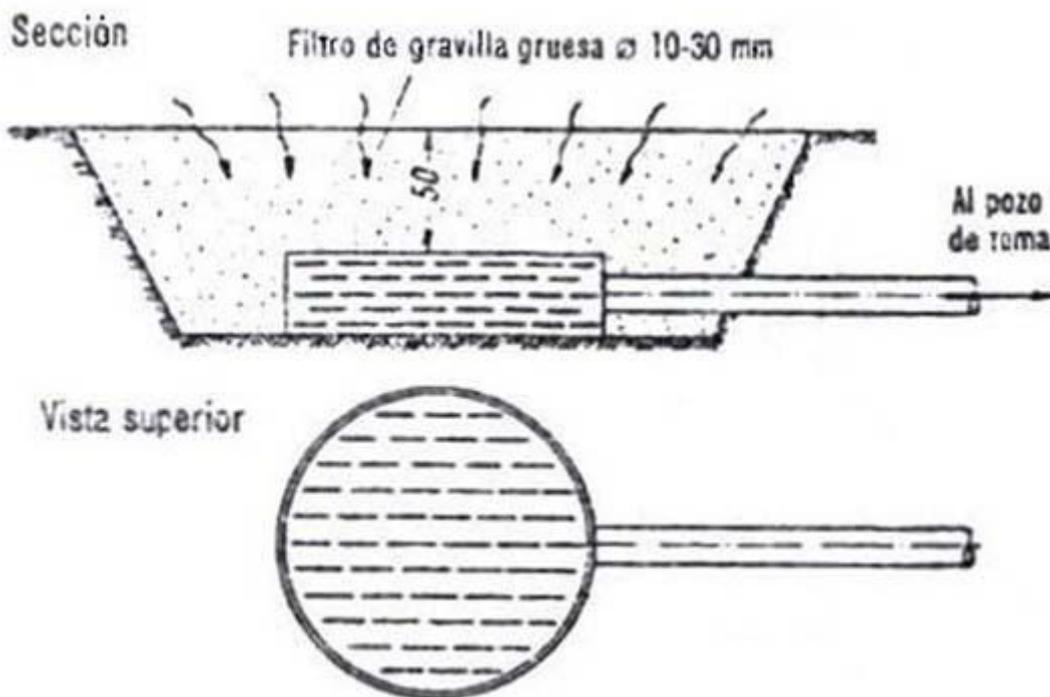
La estabilidad del lecho del río ya que deben prevenirse las sedimentaciones o el arrastre de la tubería de toma. Esta solución será más recomendable cuanto más estable sea el lecho fluvial.

El nivel mínimo en verano ya que es conveniente que el punto de toma quede sumergido, al menos 1 m., por debajo del nivel de agua. Por ende esta solución será más recomendable cuanto mayor sea el nivel mínimo de estiaje.

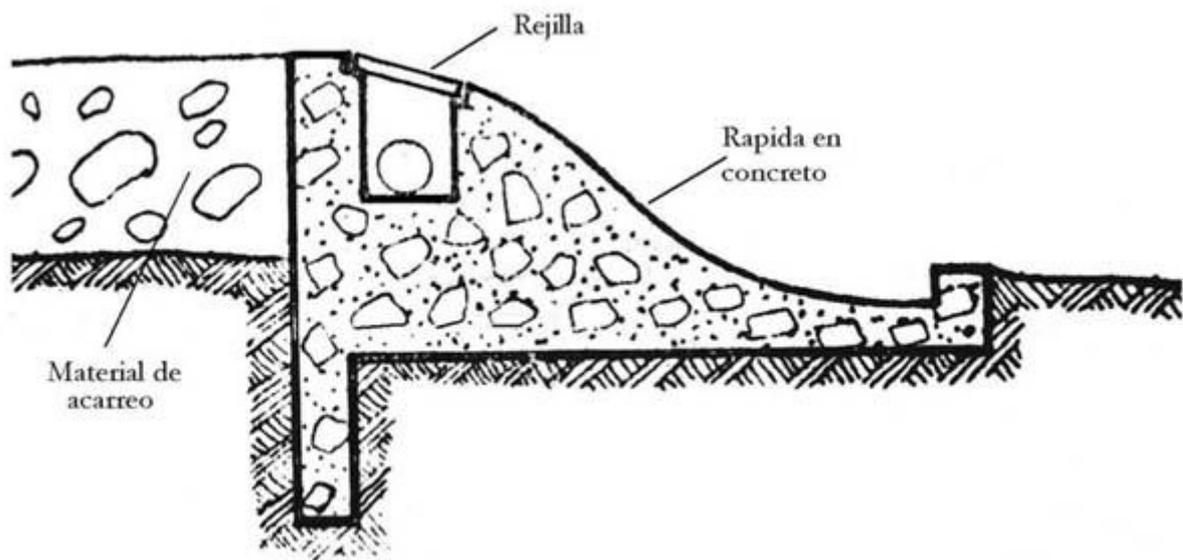
El nivel máximo de avenidas ya que es necesario situar los elementos más delicados de la captación (caseta de compuertas, estación elevadora, etc.) fuera del alcance de las riadas. A este respecto es también de gran importancia la topografía de las riberas, escogiéndose con preferencia las orillas escarpadas y demás lugares donde el agua sea profunda y fluya con rapidez.

La navegación existente, puesto que no debe poner el peligro la captación. Este tipo de solución debe rechazarse si no es posible realizarla sin que existan interferencias entre ella y la navegación.

La toma de agua puede realizarse directamente sobre el fondo del río. La alcachofa, coladera o filtro de toma, se coloca cubierta con una capa de 50 cm. de gravilla y la tubería de salida enterrada en el fondo. La aplicación de este tipo de solución requiere un lecho estable y la no existencia de riesgo alguno de obstrucción por arenas o limos.



Toma fluvial de fondo.



Toma fluvial de fondo con rejilla.

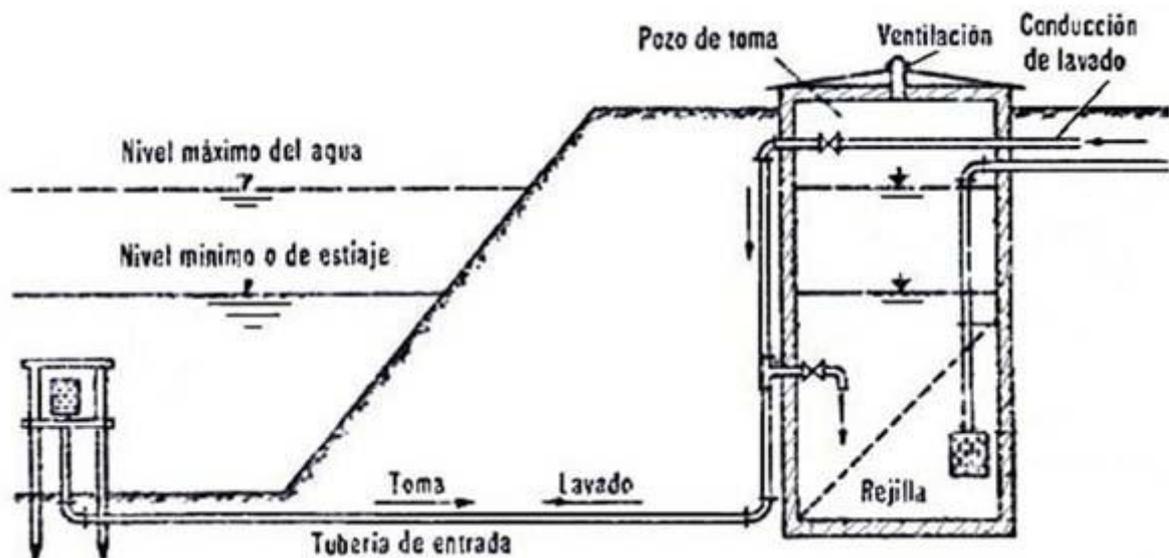
Este tipo de toma con un pequeño muro transversal a la corriente suele utilizarse en el caso de ríos de zonas montañosas, cuando se cuente con una buena cimentación o terrenos rocosos y en el caso de pequeños cursos de agua, cuando existan variaciones sustanciales del caudal entre los periodos de estiaje y los de crecientes máximas. Consiste en una estructura estable de variadas formas, la más común es la rectangular y en los casos en que la conformación de la sección transversal del río lo requiera, se proyectará un muro de encauzamiento transversal que oriente las líneas de corriente hacia la rejilla.

La estructura, ya sea en canal o con tubos perforados localizados en el fondo del cauce, debe estar localizada perpendicularmente a la dirección de la corriente y provista con una rejilla para retener materiales de acarreo de cierto tamaño, construida de barras metálicas paralelas entre sí, colocadas en el sentido de la corriente y removible para efectos de limpieza. En todo diseño de rejillas deben contemplarse los siguientes elementos: el caudal correspondiente al nivel de aguas

mínimas en el río, el caudal requerido por la población y el nivel máximo alcanzado por las aguas durante las crecientes de periodo de retorno de mínimo 20 años.

Para este tipo de tomas la rejilla debe estar inclinada entre 10 y 20 % hacia la dirección aguas abajo, con un ancho que dependerá del ancho total de la estructura y una separación de barrotes entre 75 y 150 mm en el caso de ríos con gravas gruesas o entre 20 y 40 mm para ríos caracterizados por el transporte de gravas finas. La velocidad del flujo a través de ella debe ser inferior a 0.15 m/s con el fin de evitar el arrastre de material flotante.

La toma también puede realizarse elevada sobre el fondo, apoyada sobre una pequeña estructura, esta solución requiere un lecho estable que permita cimentar el apoyo de la toma, (pero no obstante la toma debe ser protegida) que los niveles mínimos de estiaje sean suficientes y que el río no sea navegable. Tiene la gran ventaja de estar mucho más protegida de la sedimentación que la solución anterior. Además, suele preverse una inversión en el sentido de la circulación del agua, lo que permite la fácil limpieza del filtro de toma, mediante una bomba y una tubería de limpieza a través del tubo de entrada, es más el diámetro mínimo debe ser de 8 pulgadas para evitar obstrucciones y se aconseja que el número de tuberías sea dos para evitar posibles interrupciones del servicio.



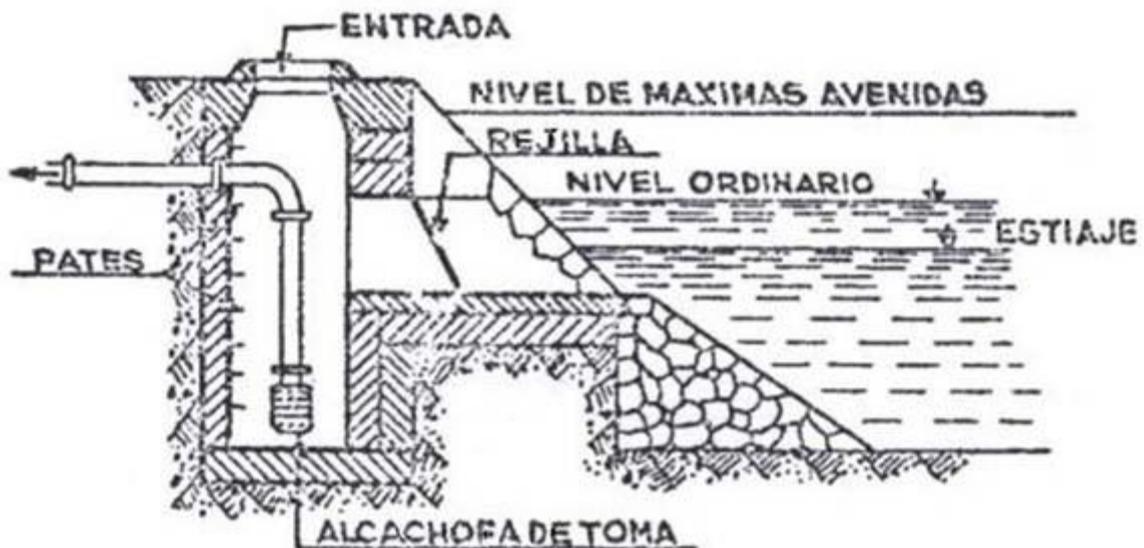
Toma de fondo, en un río no navegable y con peligro de sedimentación.

b) Captaciones de orilla: Este tipo de captaciones suele utilizarse en ríos navegables o de fondo inestable, en estas la toma se coloca sobre una de las márgenes del río, para ello se realiza una protección con escollera, gaviones o muros, sobre la que se abre la boca de entrada al pozo de

toma, donde se encuentra la alcachofa y la tubería de salida. La boca de entrada debe quedar protegida por una rejilla con inclinación de 70 a 80° con la horizontal y espaciamiento entre 20 y 25 mm cuya finalidad sea impedir el paso de elementos gruesos o flotantes y una segunda rejilla o malla de 3 mm aproximadamente para impedir el paso de elementos de arrastre y peces.

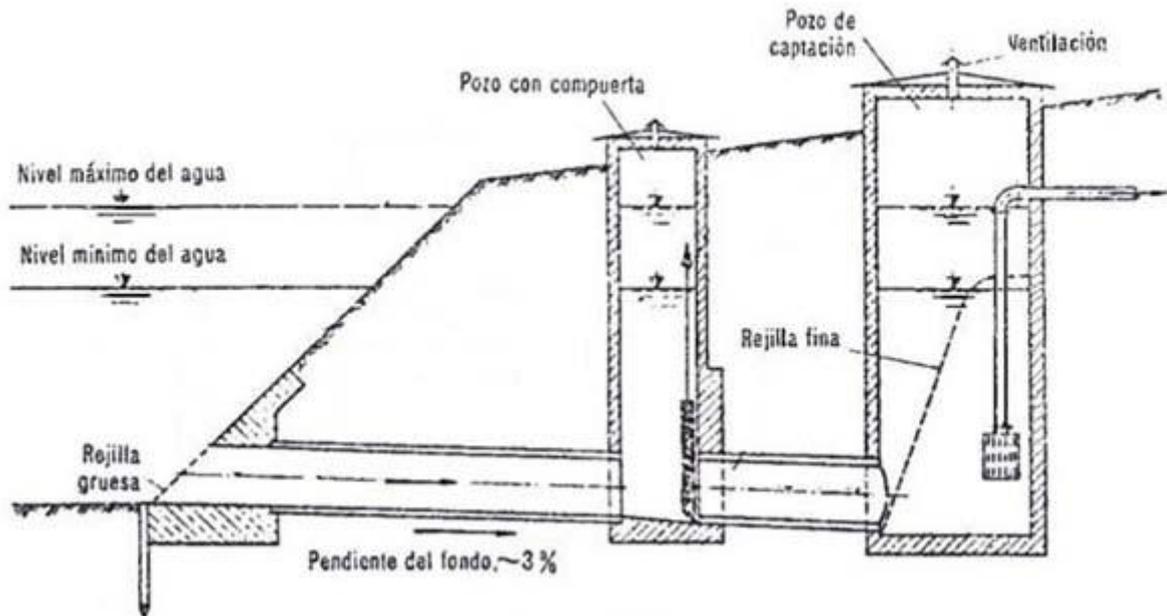
Esta solución no se ve tan influenciada como la anterior por los niveles mínimos del río y se interfiere mucho menos con la navegación (salvo en la formación de remolinos). Tampoco se ve influenciada por la estabilidad del fondo, salvo socavaciones importantes. Sin embargo, sigue manteniéndose el problema de los niveles máximos de avenida y salvaguarda de las obras e instalaciones de la toma. Las captaciones de orilla pueden ser directas o en galería, esta última se utiliza frecuentemente cuando se pretende que los remolinos de toma no interfieran la navegación.

En este tipo de captación, es frecuente instalar un proceso de predecantación a continuación de la boca de entrada, sobre todo cuando se utilizan bombas de elevación, a fin de preservarlas del desgaste, además de compuertas que permitan realizar operaciones de limpieza y mantenimiento y que a su vez con ella se puedan realizar aforo de caudales.



Toma directa sencilla de un río normal.

Si la fuente tiene variaciones considerables de caudal y además el cauce presenta cambios frecuentes de curso o es inestable, debe estudiarse y analizarse la conveniencia de una captación mixta que opere a la vez como captación sumergida y captación lateral.



Toma con galerías.

Si la altura mínima del agua en el río es pequeña y sobre todo si la oscilación es grande, es conveniente recurrir a pequeños azudes, que garanticen una cierta profundidad mínima y reduzcan las oscilaciones del nivel del río, la presa tiene como objetivo elevar el nivel del agua de modo que se garantice una altura adecuada y constante sobre la boca de captación.

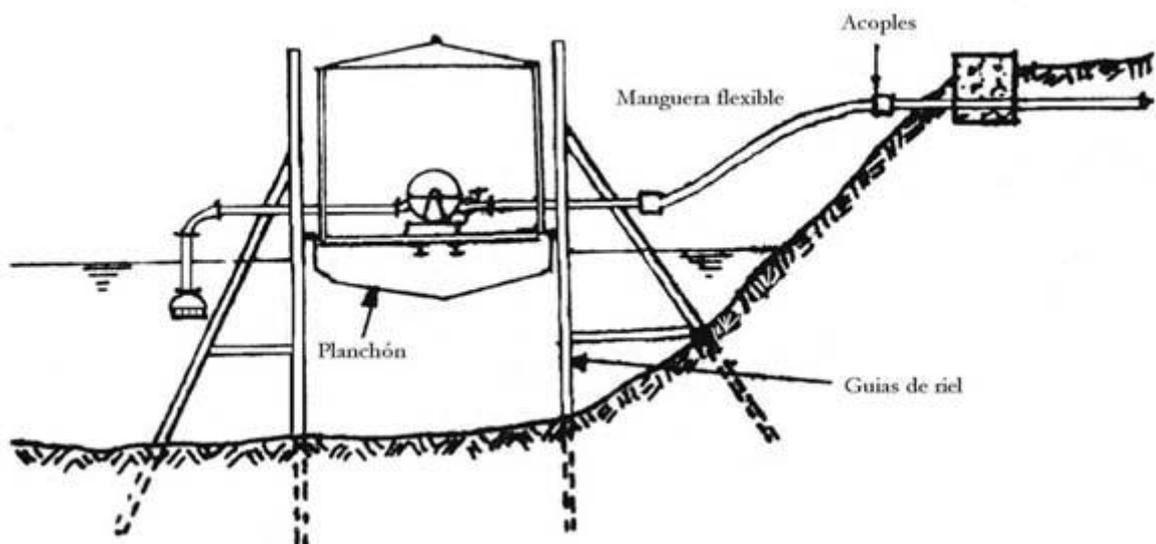
c) Captaciones en canal derivado: Esta solución consiste en derivar un canal del río, sobre este canal se sitúa, suficientemente alejada, la toma de agua, de esta forma es posible independizarse de todos los problemas que origina el propio río: niveles máximos y mínimos, navegación, inestabilidad del lecho y de las riberas, etc. Esta solución se usa frecuentemente cuando no es posible encontrar sobre la orilla un lugar a salvo de las avenidas, ya que de esta forma es posible situar las instalaciones en puntos más alejados.

d) Captaciones en torre de toma: Este tipo de captaciones consiste en una torre cimentada sobre el fondo del río con entradas a diversas profundidades; de tipología muy similar a las usadas en los embalses, tienen la gran ventaja de poderse seleccionar la profundidad óptima de calidad del agua en cada momento, pero exigen un buen fondo para la cimentación y grandes profundidades de agua.

e) Captación flotante o móvil con elevación mecánica: Si la fuente de agua superficial tiene variaciones considerables de nivel pero conserva en aguas mínimas un caudal importante; por economía puede proyectarse la captación sobre una estructura flotante anclada al fondo u orillas del río de manera tal que se eviten los desplazamientos laterales; dicha estructura debe tener un

amplio margen de flotación y unas dimensiones adaptadas al tamaño y peso de los equipos. Para similares condiciones de caudal, pero orillas estables y con pendientes bajas a moderadas, puede proyectarse la captación sobre una plataforma móvil apoyada en rieles inclinados sobre la orilla y accionada por poleas diferenciales fijas.

En ambos casos, la impulsión debe ser flexible con el fin de absorber todos los alargamientos debidos a las variaciones de nivel del agua del río y la sumergencia del filtro debe adecuarse de modo que se evite la captación de elementos flotantes, algas u otros elementos que se encuentren en la superficie del agua, así como la posibilidad de aspirar agua turbia o con algun contenido de materia orgánica en descomposición desde el fondo.



Toma flotante en planchón.

f) Muelles de toma: este tipo de captación se recomienda en los casos de los ríos con variaciones substanciales del nivel del agua y cuando se puedan aprovechar obras costaneras ya existentes como: muelles, puentes, etc. que sirvan como elemento de soporte a la tubería y que se encuentren en una zona no afectada por erosiones o depositos de material aluvial, convenientemente anclado y estable en caso de ríos navegables o crecientes. La obra de toma debe estar protegida mediante rejas perimetrales a través de las cuales la velocidad de flujo evite los elementos gruesos flotantes o un "encamisado" perforado con mecanismos de elevación para limpieza, pero con una sumergencia adecuada del filtro de toma

Es importante anotar, que en este como en todos los demás casos, el equipo de succión y/o impulsión del agua y todo la demás maquinaria, debe quedar por encima del nivel de la máxima creciente con periodo de retorno igual al periodo de proyecto.

g) Pozos subalveos: En este caso las aguas del río se captan mediante uno o varios pozos realizados en el subalveo del río, de esta forma se independiza la captación de los problemas propios de este y se consigue un agua de mejor calidad debido a la filtración natural a través del terreno, dependiendo, como es lógico de la granulometría del suelo y la distancia de filtración.

### **2.2.3. Captaciones del agua en embalses**

El embalse es una solución que presenta algunas notables ventajas, como pueden ser:

La regulación de caudales a lo largo del año, lo que permite un mejor aprovechamiento de las aguas superficiales.

Al disminuir la velocidad del agua en el embalse se produce una decantación de las materias en suspensión lo que contribuye a mejorar la calidad del agua y en concreto a clarificarla.

Las aguas fluyentes al mezclarse con las aguas embalsadas contribuyen a una mejora de la calidad.

La autodepuración propia del ecosistema que constituye el embalse, contribuye a la mejora de la calidad de sus aguas siempre y cuando este no entre en fase de eutrofización.

Los gérmenes patógenos se encuentran en un medio inadecuado (alimento, temperatura, pH, radiación solar, etc.) y mueren rápidamente atacados por los protozoos.

Sin embargo, un crecimiento excesivo de algas puede dar inconvenientes, pues, al morir, caen al fondo donde se descomponen anaerobiamente, lo que puede llegar a hacer impotable el agua de allí.

La principal características de las aguas es su calidad variable según la profundidad a que se encuentren. Las aguas de la superficie presentan una importante vida acuática, pueden estar contaminadas por sustancias flotantes y presentan variaciones de temperatura, las aguas del fondo en cambio pueden estar contaminadas por los productos de la descomposición anaerobia de las materias orgánicas sedimentadas. Habitualmente el agua de un embalse se toma unos pocos metros por debajo de la superficie.



La tipología de las captaciones de agua en los embalses es siempre de tomas múltiples a diferentes alturas, ya que de esta forma es posible seleccionar el punto mas adecuado, siguiendo las variaciones de nivel del embalse. El número de tomas es muy variable pero generalmente oscila entre 3 y 8.

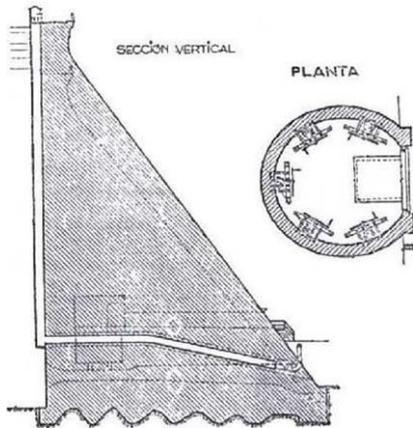


Se distinguen dos tipos principales: los adosados al trasdós de la presa y los de torre, (Ver figuras 17 y 18). Ambos tienen una tipología muy similar, puesto que constan de un conducto vertical de forma aproximadamente cilíndrica en el que se sitúan las distintas tomas, dotadas de válvulas que se manejan desde la parte superior, fuera del nivel máximo del embalse. Este conducto cilíndrico se consigue bien realizado sobre el trasdós de la presa, cuando la tipología de esta lo permita (es inviable en presas de materiales sueltos, por ejemplo) o mediante la construcción de una torre cilíndrica que se une a la coronación de la presa o a una de las laderas por medio de una pasarela.

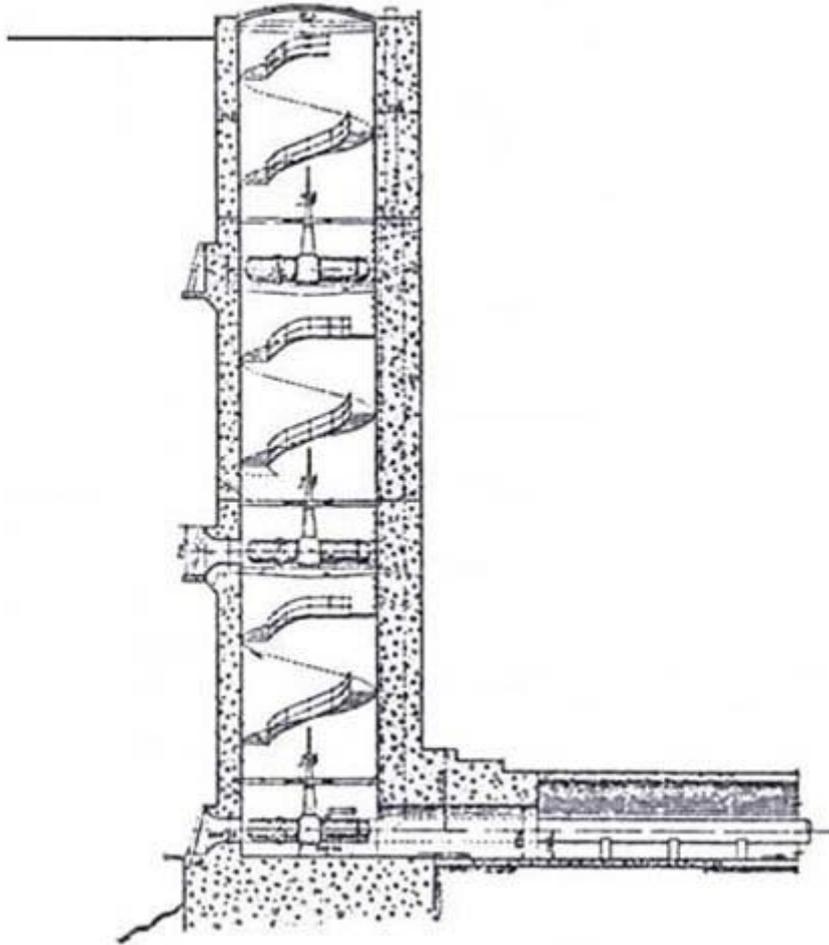
#### 2.2.4. Captaciones del agua de mar

Este tipo de captación debe utilizarse únicamente en sitios sin otra fuente de abastecimiento más convencional y ya sea que se de por evaporación normal, al vacío, destilación u ósmosis inversa, se debe asegurar la dotación mínima exigida.

En el caso de evaporación normal, los estanques deben tener poca profundidad y el área de las cubiertas transparentes debe ser lo más amplia posible, recogerse eficientemente el vapor, aislar pérdidas y al agua captada añadirse sales que la hagan aceptable para consumo humano. Los otros métodos por su costo y uso intensivo de energía, requieren de estudios económicos detallados.



Toma adosada al trasdós de una presa.



Torre de toma.

### 2.3. Captaciones subterráneas

Las aguas subterráneas son una importante fuente de abastecimiento de agua potable y prometen serlo aún más en el futuro, puesto que con el progresivo agotamiento de las aguas superficiales y el desarrollo de nuevas técnicas de perforación, estas irán cubriendo, en un porcentaje cada vez mayor, las necesidades humanas.

El origen de las aguas subterráneas es la infiltración en el terreno de las aguas de lluvia, deshielo y corrientes superficiales. Históricamente se han barajado teorías con grandes concomitancias míticas para explicar el origen de las aguas subterráneas, ya que se suponía que las cantidades precipitadas eran insuficientes para abastecer los grandes caudales de las aguas subterráneas. Sin embargo, hoy día se acepta sin reservas la teoría de que las aguas subterráneas proceden de la infiltración

(producida por la fuerza de la gravedad y las fuerzas de atracción molecular) de las precipitaciones atmosféricas en cualquiera de sus modalidades.

Así el suelo terrestre puede considerarse dividido en dos grandes partes:

- La zona de aireación en la cual las cavidades del terreno contienen agua, pero en menor cantidad de su capacidad potencial. A su vez se subdivide en el manto vegetal o zona superficial que está bajo la influencia directa de las plantas y sus raíces y la zona restante, o manto capilar, también bajo una influencia de las plantas aunque menos directa. En estas zonas predominan las fuerzas de atracción molecular sobre las fuerzas de la gravedad.
- La zona de saturación o zona en la cual el agua se encuentra en cantidad muy cercana a la capacidad potencial del terreno y donde las fuerzas predominantes son de gravedad, esta agua es la llamada subterránea.

La separación entre ambas zonas se llama superficie de saturación o nivel freático.

Así pues, una partícula de agua, para llegar a ser subterránea debe atravesar la zona de aireación, lo cual requiere que la cantidad de agua sea lo suficientemente grande como para que predominen las fuerzas de gravedad sobre las fuerzas de atracción molecular. Así, si el fenómeno generador es atmosférico este deberá tener una intensidad y una duración suficiente para que el agua no se pierda en su totalidad en escorrentía superficial y evapotranspiración. Si la zona de aireación está seca y el agua de lluvia cae con poca intensidad, esta agua se alojará primero en el manto vegetal y luego en el capilar; Si al llegar a la zona de saturación cesa la lluvia, esta agua quedará para uso de las plantas y no se habrá generado nueva agua subterránea.

La infiltración de las corrientes superficiales (ríos, lagos, etc.) se produce tan sólo en casos concretos, en cuyo caso a esta corriente se le llama influente. Por el contrario, sí, como es el caso más frecuente, la corriente superficial recibe aportación de las aguas subterráneas se la denomina efluente.

Los terrenos se clasifican frente a las aguas subterráneas por sus características, por ejemplo:

Acuífero se le llama a aquella formación geológica que contiene agua y es capaz de transmitirla, como, por ejemplo: un aluvión fluvial, gravas y arenas. Son en general adecuados para situar una captación de agua en ellos.

Acluido, por el contrario se define como aquella formación geológica que conteniendo agua en su interior, incluso hasta la saturación, no la trasmite y por tanto no es posible su explotación, como por ejemplo las arcillas.

Acuitardo se llama aquella formación geológica que conteniendo apreciables cantidades de agua las transmiten muy lentamente, como por ejemplo unas arcillas limosas o arenosas. Estas formaciones son inadecuadas para situar captaciones en ellas, pero pueden jugar un papel muy importante en la recarga vertical de otros acuíferos.

Acuífugo es llamada aquella formación geológica que ni contienen agua ni la pueden transmitir, como, por ejemplo, un macizo granítico no alterado.

Los acuíferos que se presentan con mayor frecuencia están formados por depósitos no consolidados de materiales sueltos, tales como arenas, gravas, mezclas de ambos, etc. Debido, en general, a sus buenas condiciones de recarga y poca profundidad de su nivel piezométrico, suelen dar buenos caudales de agua si se los explota convenientemente.

De entre las rocas sedimentarias consolidadas (que encierran el 95% de las aguas subterráneas del planeta), la más importante es la caliza, estas rocas son de por sí poco permeables pero su disolución por el agua provoca el desarrollo de zonas permeables, fenómeno conocido con el nombre de karstificación. Las aguas en su movimiento van agrandando las grietas, diaclasas y fisuras, formando una auténtica red de canales y ríos subterráneos gracias a la solubilidad de la caliza y a la acción del CO<sub>2</sub> agresivo a las aguas. Las areniscas cementadas son bastante impermeables debido al ligante que une los materiales granulares y son, por tanto malos acuíferos; sin embargo, si la cementación es parcial o ha desaparecido en parte, pueden ser objeto de explotación como acuíferos.

Las margas y arcillas, en cambio, deben considerarse como acuíferos y por tanto inexplotables. Las rocas volcánicas presentan una gran variedad de posibilidades, dependientes de sus características físicas y químicas, de las propias rocas y de la erupción que las originó, edad, etc. Si son escoriáceas, con grandes intersticios, pueden constituir excelentes acuíferos, por el contrario, si son densas y compactas como algunas riolitas y basaltos, tendrán unas características hidrológicas muy pobres.

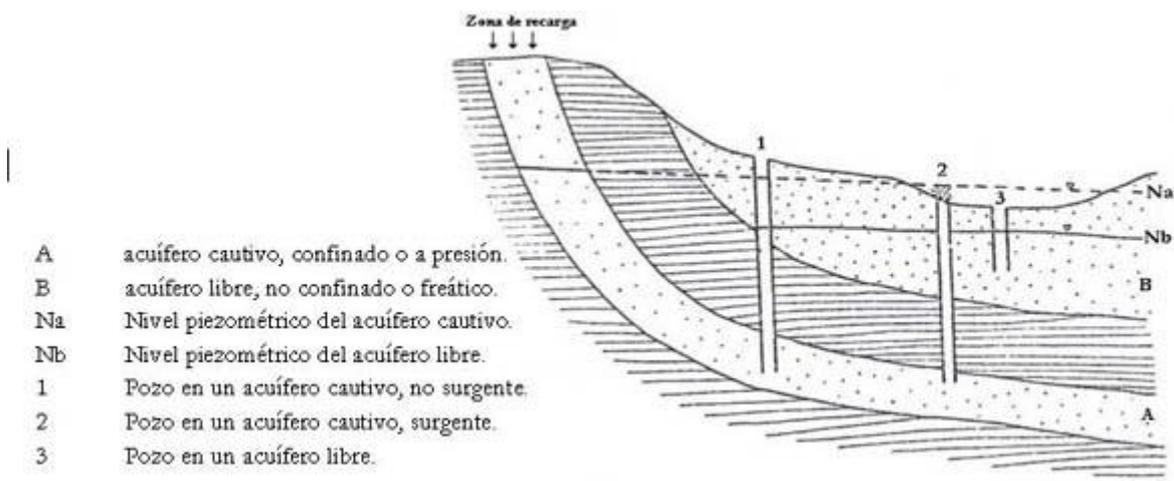
Finalmente en las rocas ígneas y metamórficas (granitos, dioritas, gabros, pizarras y esquistos) las únicas posibilidades de dar buenos acuíferos residen en la zona alterada superficial o en las regiones muy fracturadas por fallas y diaclasas, de todos modos constituyen los peores acuíferos, en cuanto a rendimiento de caudal.

Los acuíferos pueden clasificarse atendiendo a varias de sus características. Las clasificaciones principales que pueden establecerse son: atendiendo al estado energético del agua o por la variación de la calidad de sus aguas.

De los primeros los acuíferos libres no confinados o freáticos son aquellos en los cuales existe una superficie libre del agua que contienen, que está en contacto con el aire y por tanto a presión atmosférica.

Acuíferos cautivos confinados o a presión son aquellos en los que la superficie superior del agua se encuentra sometida a una presión superior a la atmosférica, por ello durante la perforación de pozos en acuíferos de este tipo, al atravesar el techo del mismo se observa un ascenso rápido del nivel del agua hasta establecerse en una determinada posición o nivel piezométrico. Si el nivel piezométrico se sitúa por encima de la boca del pozo, a esto último se le denomina surgente.

Acuíferos semicautivos o semiconfinados, son aquellos en los que la pared superior o inferior no es totalmente impermeable, sino que se trata de un acuitardo, es decir un material que permite la filtración del agua, pero de forma muy lenta, lo que sirve de alimentación al acuífero principal. En realidad, se trata de un caso particular del tipo anterior.



#### Tipos de acuíferos.

Por la variación de calidad de sus aguas pueden ser uniformes, cuando la calidad de agua es sensiblemente igual en cualquier punto del acuífero o estratificado cuando en el acuífero coexisten aguas de muy distinta calidad, que por sus diferentes características de densidad, viscosidad, etc. forman capas (no forzosamente horizontales), y se aprecian claramente interfases o puntos de brusca variación de la calidad. Un ejemplo importante de este último tipo son los acuíferos litorales, donde coexisten las aguas dulces y saladas, formando una interfase, cuya forma depende de la dinámica de ambas.

## **Evaluación y estudios sobre las aguas subterráneas**

Las características de los acuíferos sólo pueden conocerse con cierta aproximación después de costosos trabajos de reconocimiento y sobre todo, después de la explotación. Así los estudios de explotación de las aguas se pueden clasificar en tres grandes grupos:

Estudios preliminares que tienen como motivo fundamental la localización de los embalses subterráneos más importantes y una primera estimación de sus dimensiones, parámetros, zonas de recarga y descarga y de la calidad de sus aguas. Sus resultados se sintetizan en mapas hidrogeológicos cuya escala suele estar comprendida entre 1:100.000 y 1:200.000, sobre un área de estudio de varios miles de kilómetros cuadrados. Este tipo de estudios no exigen, en general, de prospecciones geofísicas o sondeos, ya que su fundamento básico es la geología analizada con criterio hidrogeológico, lo que requiere buena experiencia de parte de los técnicos que la realizan.

Estudios hidrológicos generales que conducen a una cuantificación más aproximada de los embalses subterráneos localizados en los estudios de reconocimiento. Sus resultados suelen presentarse en mapas hidrogeológicos cuya escala varía entre 1:25.000 y 1:100.000, en los cuales suelen representarse las curvas isopiezas (puntos de igual nivel piezométrico) y, en ocasiones, las isotransmisibilidades (oscilaciones del nivel piezométrico), profundidades de la zona saturada, concentraciones iónicas, etc. Habitualmente, estos estudios suelen extenderse a una cuenca hidrográfica de centenares a miles de kilómetros cuadrados. En esta etapa, es siempre necesario realizar un inventario detallado de pozos y fuentes y frecuentemente prospección geofísica, sondeos mecánicos, ensayos de bombeo y análisis químicos.

Estudios de detalle que tienen por objeto llegar a un conocimiento pormenorizado de las características de un acuífero concreto. En este tipo de estudios tienen una especial importancia los datos hidrológicos y técnicos de las captaciones existentes. Los resultados suelen presentarse en mapas hidrogeológicos a escala comprendida entre 1:10.000 y 1:25.000. En este tipo de estudios es necesario, la realización de estudios geofísicos, sondeos mecánicos, ensayos de bombeo, análisis químicos y la realización de algunos pozos experimentales. Empleando métodos geológicos, geofísicos, climatológicos, de hidrología de superficie, de hidrología subterránea, etc.

Al hablar de captaciones para la explotación de aguas subterráneas suele entenderse implícitamente que se alude a pozos verticales. Sin embargo, existen otros sistemas constructivos que permiten alcanzar el mismo fin, tales como las galerías filtrantes y zanjas de drenaje. Aún dentro de pozos verticales es necesario distinguir entre los pozos “excavados”, de construcción manual o ligeramente mecanizada y diámetros relativamente grandes, los “perforados” de diámetros

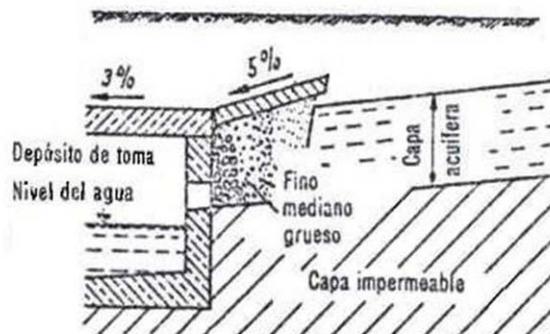
reducidos y construcción totalmente mecanizada y los “radiales” o pozos de drenes horizontales. Es evidente que las condiciones hidrogeológicas del área donde vaya a establecerse la captación serán las que condicionen en gran manera el tipo de la misma. Aún con todo, son ciertamente los pozos verticales el sistema de captación de aguas subterráneas más extendido.

### 2.3.1. Captación de manantiales

Cuando se pretenda captar el caudal de un manantial, es necesario realizar una investigación sobre sus caudales y sobre la calidad de sus aguas. Si el manantial constituye la única fuente de abastecimiento de la comunidad, el caudal mínimo de estiaje deberá cubrir la demanda diaria máxima de agua. Las variaciones en la calidad son otro punto importante y deberá hacerse un estudio periódico de ello, así mismo la oscilación de temperatura no debe exceder de 2 a 4 °C.

Si el manantial se enturbia inmediatamente después de una lluvia fuerte, es señal inconfundible de que el efecto filtrante del terreno es insuficiente. Si el manantial se alimenta con aguas procedentes de una grieta o de aguas subterráneas de una cuenca pequeña, sus condiciones higiénicas pueden ser dudosas. La tipología de la captación de un manantial varía según el tipo de afloramiento, generalmente se conducen a un pequeño depósito enterrado que da al agua un tiempo de permanencia de 5 a 30 minutos para pasar seguidamente a la aducción que la llevará al tratamiento. Los principales tipos de afloramiento de un manantial, son:

a) Salida horizontal en un punto, suele presentarse en los manantiales de capas sedimentarias de aluvión o de rebose y eventualmente, en los de agua remansada. Se realiza por medio de un depósito de acumulación que se adosa a la salida del manantial, el cual entra en el depósito por unos orificios que se practican en la parte posterior del depósito. Entre éste y el manantial se disponen varias capas de material filtrante con una disposición de granulometría creciente en el sentido de la filtración del agua. Las granulometrías de estas capas deberán estar estudiadas de forma que cumplan las condiciones filtro.

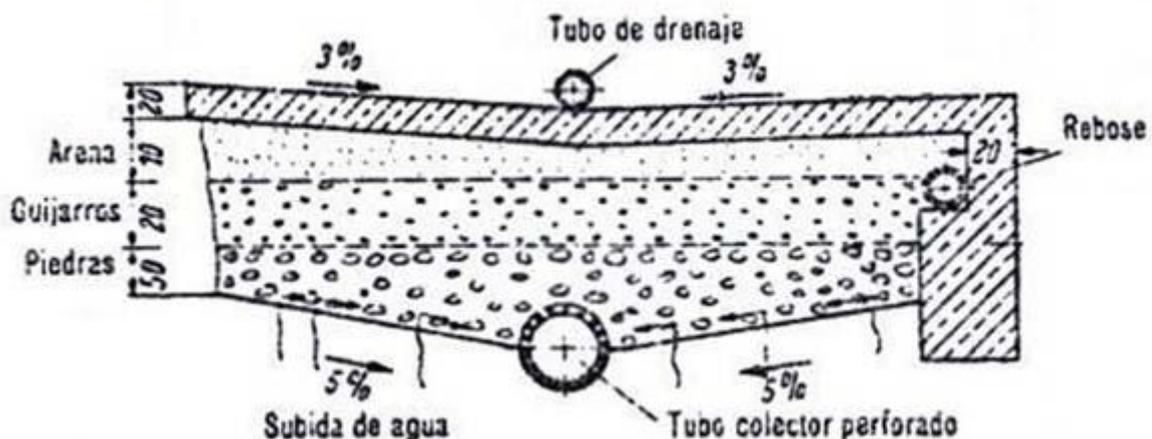


Captación de manantial con salida horizontal.

b) Salida horizontal en franja de anchura limitada suele presentarse en capas geológicas similares al caso anterior y su toma se realiza de forma análoga a éste, sin más que sustituir el deposito por una galería de filtración, de longitud ligeramente superior a la de la franja de afloramiento. Si el caudal fuera pequeño, puede sustituirse la galería de filtración por uno o varios tubos semiperforados (perforados en una semisección), que se introducen en las correspondientes capas filtro; la captación así dispuesta se protege con un panel superior y otro lateral.

c) Salida vertical en un punto, el que se presenta en manantiales de fallas, grietas o artesianos. se realiza por mediación de un pozo ordinario con acceso del agua por el fondo. Por ello es esencial determinar exactamente la altura del desague o rebose, ya que de esta forma podrán disminuirse los efectos perjudiciales del remansamiento.

d) Salida de plano vertical, se presenta, en manantiales de agua remansada. Se realiza por medio de tubos semiperforados introducidos en una masa filtrante, que recoge el agua de los diversos puntos. Para este tipo de captación se emplean filtros gruesos que favorecen la circulación del agua.



Toma de un manantial de salida vertical.

### 2.3.2. Pozos verticales

Bajo la denominación de pozos verticales pueden entenderse aquellos que se proyectan y construyen para obtener agua, por penetración vertical de la obra de captación en una capa acuífera, pudiendo disponer o no, de obras horizontales que faciliten la entrada de agua en el pozo. La extracción del agua en ellos se realiza, en general, por medio de bombas, movidas por motores eléctricos

La profundidad que deba ser alcanzada por un pozo vertical vendrá definida fundamentalmente por las características de la formación a explotar; la profundidad a prever en un pozo vertical esta condicionada por los datos obtenidos en: sondeos mecánicos, investigaciones geofísicas o en pozos anteriores.

a) Pozos perforados: se caracterizan por la mecanización casi completa de su perforación. Son de diámetros relativamente reducidos (40 - 80 cm., frecuentemente). El método de perforación será función, en general de la profundidad a alcanzar, el diámetro necesario y la naturaleza del terreno.

La naturaleza de los terrenos atravesados o condiciones de funcionamiento del pozo, pueden aconsejar o incluso exigir el revestimiento de las paredes del mismo. El entubado definitivo de un pozo desempeña, en general, dos misiones: sostener las paredes de la perforación y constituir la conducción hidráulica que pone en comunicación el acuífero con el exterior. Una operación de singular importancia en los pozos verticales es la cementación, la que tiene por objeto obtener la unión de la tubería con la pared del pozo. Con ello se consigue evitar que las aguas superficiales puedan contaminar las profundas, evitar conexiones entre acuíferos a través del hueco del pozo y aumentar la resistencia del entubado.

En un pozo vertical pueden distinguirse tres tramos, no siempre bien definidos, que son:

- El tramo en que se produce la entrada, procedente de la capa acuífera.
- El tramo que enlaza con el anterior hasta el punto de situación de la bomba, si existe.
- El tramo que comprende desde la bomba al exterior

La zona de admisión del agua al pozo constituye, sin duda la parte esencial del mismo. Aún cuando, en ocasiones, no se coloca elemento alguno en esta zona, lo más frecuente es realizar un revestimiento al que suele denominarse “rejilla”, la cual bien proyectada debe permitir que con una pérdida de carga admisible, pase al interior del pozo agua limpia de materiales sólidos. Sin embargo, en algunos casos no es suficiente con la colocación de una rejilla para garantizar el correcto funcionamiento del pozo, sino que se hace necesario colocar un relleno de grava, de características determinadas, en el espacio anular que queda entre la pared del terreno perforado y la rejilla.

Estos rellenos de grava son especialmente recomendables en los casos de:

- Acuíferos de arenas finas y uniformes.

- Formaciones estratificadas con capas alternadas de material grueso, medio y fino.
- Aguas muy incrustantes.
- Cuando el material del acuífero son areniscas pobremente cementadas.

En su estado natural, el agua subterránea es normalmente de buena calidad biológica, no obstante la protección sanitaria de un pozo debe estar presente en todas las fases del proyecto y construcción. Ya en principio, debe seleccionarse con cuidado el lugar de emplazamiento del pozo, prestando atención a la posible existencia de fosas sépticas, corrales, alcantarillados, desagües, etc. Así mismo, durante las operaciones de construcción, las propias manipulaciones inherentes a la misma pueden provocar contaminaciones. Por ello, una vez terminada la construcción debe procederse a una completa desinfección del pozo. El método más corriente de desinfección consiste en utilizar una solución concentrada de cloro.

Finalmente, durante el funcionamiento del pozo también será necesario adoptar las medidas correspondientes para evitar la entrada en el pozo de aguas contaminadas. Para ello se instala una protección superior consistente en:

- Prolongar el revestimiento hasta 50 cm. por encima del nivel del suelo.
- Cubrimiento en concreto de la entrada al pozo, con pendientes hacia la periferia.
- Protección a base de material arcilloso en un radio dependiente de las condiciones locales.
- Cierre sanitario de la boca de pozo a base de chapas atornilladas con juntas estancas de goma.
- Cementación del trasdós del revestimiento al menos en los primeros tres metros

b) Pozos excavados: La excavación de pozos a mano fue el único sistema de construcción en tiempos pasados y sigue aún utilizándose en aquellos lugares donde aún no ha llegado o no es posible la mecanización. Un pozo excavado se caracteriza, en general, por su gran diámetro (>1,50 metros) y por el hecho de que en su construcción la mecanización es escasa o nula. Los pozos excavados, pese a su carestía pueden ser una solución aceptable en los siguientes casos:

En rocas débilmente fisuradas, en las que al aumentar el diámetro se aumenta la probabilidad de cortar fisuras inclinadas y además, al ser mayor la longitud de las fisuras interceptadas, el agua entra a menor velocidad y por lo tanto con menor pérdida de carga.

En acuíferos poco permeables en los que el bombeo va a ser intermitente. En tal caso el pozo, además de actuar como captación, lo hace también como depósito regulador.

En acuíferos de muy poco espesor, en los que para conseguir una velocidad de entrada adecuada no queda otro remedio que aumentar considerablemente el diámetro.

Cuando en el interior del pozo debe instalarse maquinaria o han de realizarse trabajos que requieran intervención humana, lo que exige un diámetro de unas ciertas dimensiones mínimas.

En los casos en los que se han de perforar drenes horizontales en el interior del pozo (pozos radiales) y por tanto es necesario permitir el descenso de la maquinaria de perforación.

En los lugares y circunstancias en los que resulte más económico que un pozo perforado.

Este tipo de pozo suele penetrar tan sólo ligeramente en la capa acuífera, debido a su carestía y gran diámetro. Sin embargo, puede decirse que a partir de unas pocas decenas de metros, este tipo de pozos es difícilmente rentable, aun cuando en el pasado hayan sido excavados incluso de varios centenares de metros

Los métodos constructivos más empleados en los pozos excavados son: el tradicionalmente conocido de “a pico y pala”, si bien pueden adoptarse ciertas mecanizaciones: uso de explosivos, extracción de materiales con torno eléctrico, etc. Los problemas básicos de este tipo de excavación lo constituyen el achique del agua y la seguridad del personal; en este último aspecto debe considerarse la posibilidad de sifonamiento del fondo y la problemática de desprendimientos, solucionable mediante zunchos o entibaciones provisionales que pueden irse introduciéndose a medida que se va excavando el pozo o de revestimientos definitivos que aunque tradicionalmente fueron la piedra y el ladrillo, recientemente se están utilizando anillos vaciados en concreto.

No suele utilizarse rejilla como tal, sino que la entrada del agua se realiza a través de aberturas en el revestimiento (ladrillos u hormigón con perforaciones, juntas abiertas, etc.) y así dentro de la tipología de pozos excavados, estos pueden ser:

- Pozos de bomba sumergida.
- Pozos de bomba superior al nivel de agua.
- Pozos con cámara estanca para alojamiento de bombas.
- Pozos para construcción de drenes radiales.

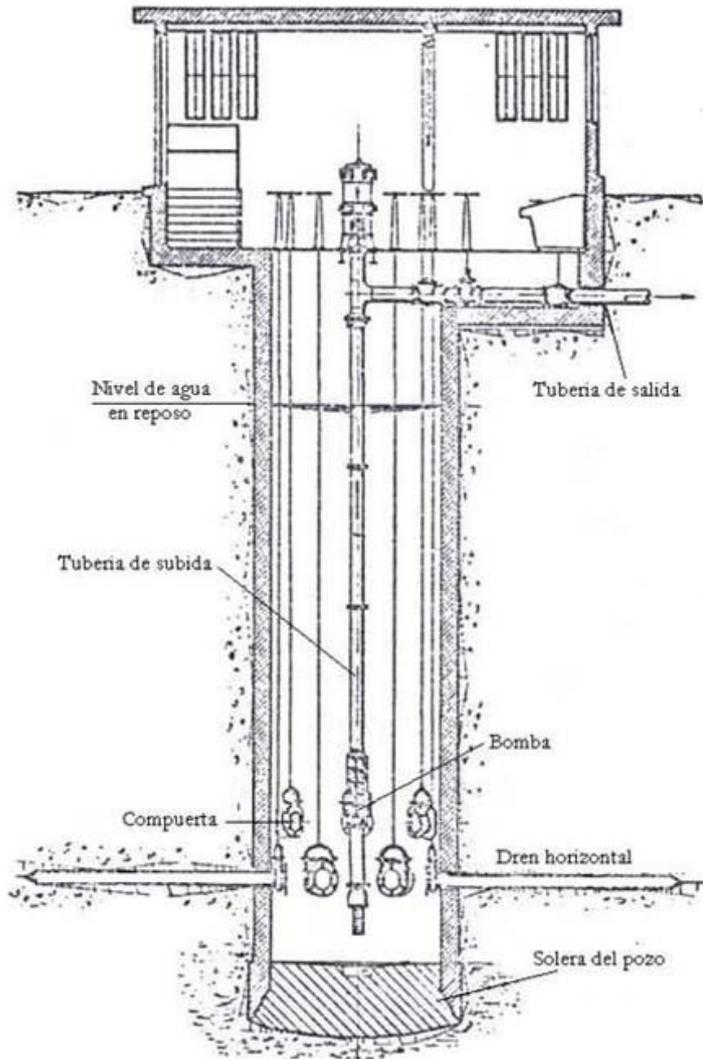
c) Pozos radiales: Los pozos de drenes horizontales, según los métodos constructivos actualmente en uso, fueron concebidos en 1934 por un ingeniero americano apellidado Ranney. Constan de dos partes fundamentales:

- Un pozo vertical con pared de concreto reforzado y fondo de concreto en masa de diámetro comprendido entre 1,60 y 6,00 m.
- Un conjunto de drenes horizontales, situados en uno o más niveles y conectados con el pozo vertical, en el que desaguan a través de válvulas de compuerta.

En comparación con los pozos verticales, los descensos dinámicos en los pozos radiales son notablemente inferiores. Esto hace que sean recomendables de modo especial cuando se quieren extraer grandes caudales y/o cuando el acuífero saturado presenta un espesor pequeño. Sin embargo, el coste de un pozo radial es elevado, por lo que suele aceptarse que solamente son económicamente viables a partir de apreciables caudales de bombeo.

La construcción de pozos radiales se realiza, principalmente por dos métodos diferentes:

- En el sistema Ranney las perforaciones radiales se realizan con los mismos tubos filtrantes definitivos. Por tal razón dichos tubos han de ser de acero y con paredes gruesas. Las ranuras en ellos son de forma alargada en el sentido longitudinal de los mismos.
- El sistema Fehlmann utiliza tubos de perforación de 267 mm. de diámetro, que se retiran después de la colocación de los filtros. Con ello se consigue que el material y la abertura de las ranuras de los tubos filtrantes puedan ser elegidos de acuerdo con las características químicas del agua y con la granulometría y permeabilidad del acuífero.

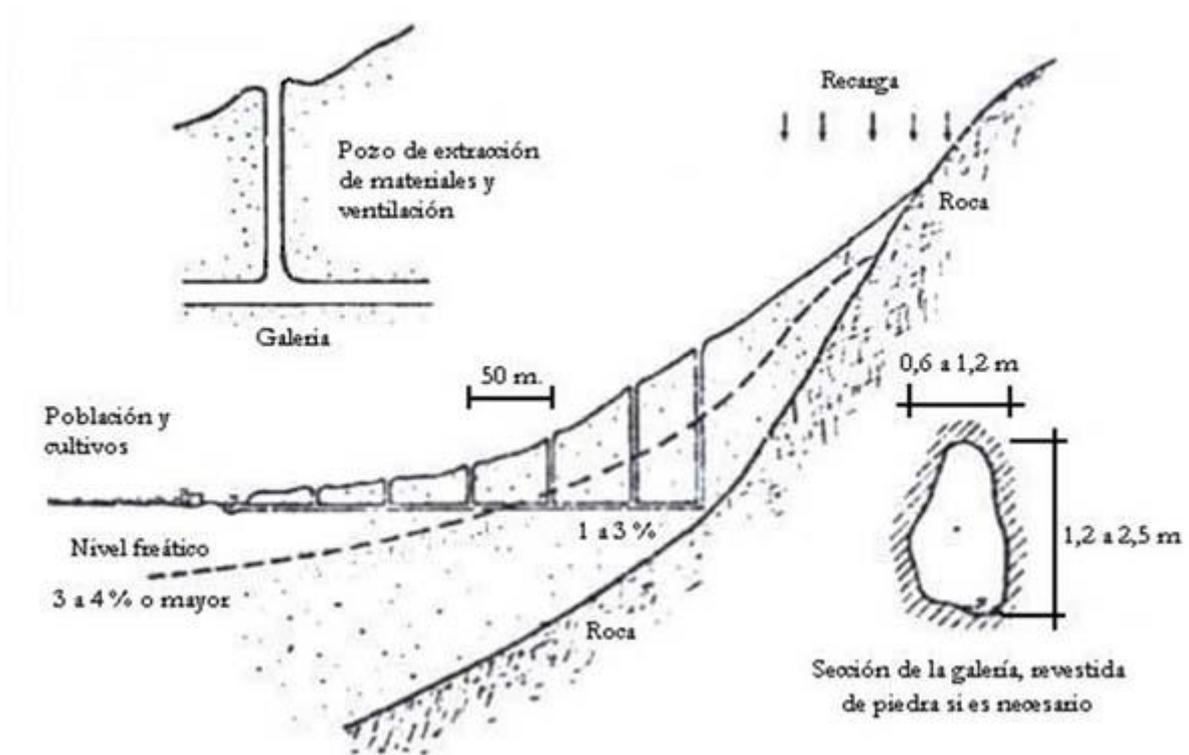


#### Pozo de drenes horizontales.

En ambos sistemas es posible construir los drenes con una cierta inclinación hacia arriba, lo que posibilita penetrar más adecuadamente en el acuífero a explotar. Los drenes horizontales suelen tener de 33 a 50 m. de longitud y se construyen mediante la hincada de un equipo de empuje, instalado sobre una plataforma. Para conocer con precisión el caudal de un pozo horizontal, es preciso hacer un ensayo de producción en cada dren por separado y un aforo del pozo completo. De modo similar a los pozos verticales el aumento de diámetro más allá de ciertos límites no influye de forma notoria sobre su caudal específico.

#### Galerías filtrantes

Las galerías filtrantes son túneles de sección reducida y ligera pendiente ascendente que se internan en el interior de una montaña en busca de puntos inferiores al nivel freático que permitan un cierto caudal de agua de procedencia subterránea. La ejecución de estas galerías es muy costosa por lo que su empleo ha quedado reducido a casos muy concretos.



Galería filtrante.

Las galerías filtrantes tienen su origen en los denominados kanats que se desarrollaron hace 2700 años en América, Persia, Pakistán, Egipto, etc. Los kanats están constituidos por una galería conectada a pozos de ventilación cada 50 - 100 m hasta encontrar un punto donde aflora el agua que era conducirla por la propia galería hacia el exterior. Algunos kanats tienen casi 50 Km. de longitud y alcanzan una profundidad de hasta 120 m.

### Zanjas drenantes

En materiales no consolidados, cuando el nivel freático es poco profundo, la captación del agua subterránea puede hacerse mediante zanjas que son simplemente excavaciones lineales que llegan hasta el nivel de saturación. El agua se puede evacuar por gravedad si el terreno tiene suficiente pendiente o por bombeo de la propia zanja.

## 2.4. Limnología

La Limnología es la ciencia que estudia los fenómenos físicos y biológicos relativos a los lagos. La etimología de Limnología permite traducirla como ciencia de los lagos; pero la raíz griega limne hace referencia a una divinidad asociada a las aguas en general, y por tanto, resulta aplicable lo mismo a lagos que a fuentes, o a otro tipo de aguas. En los estatutos de la Sociedad Internacional de Limnología (1922) se la considera como el estudio del conjunto de aguas dulces o epicontinentales.

Como la mayor parte de las aguas dedicadas a la producción de agua potable, provienen de embalses, en ellos se dan los fenómenos que se van a describir a continuación.

La Eutrofización es el desarrollo excesivo de algas en el interior de un embalse como consecuencia del aporte de sustancias favorables para su desarrollo.

Las algas microscópicas, como vegetales que son, obtienen la energía necesaria para su vida de la luz solar. Para su desarrollo necesitan sustancias orgánicas, además de CO<sub>2</sub>, compuestos de nitrógeno y fósforo que obtienen del agua. Estas sustancias, que llamamos nutrientes son las que regulan su crecimiento. El límite para su desarrollo es fundamentalmente el fósforo.

El carbono y el nitrógeno, lo pueden obtener del aire (si se acabara el N de los compuestos inorgánicos nitrogenados disueltos que llegan a un embalse, algunas algas son capaces de obtener N del aire) por el contrario el fósforo que es imprescindible para su desarrollo, como sucede en los seres vivos solo lo pueden obtener del que haya disuelto en el agua y que a su vez proviene de los contaminantes vertidos de diverso origen.

Si en un embalse existen nutrientes, el desarrollo de las algas es bastante probable, ya que el otro factor necesario que es la luz, se da por supuesto hasta determinadas profundidades.

El fenómeno de crecimiento de las algas en un embalse es en cierto modo el inverso de la depuración biológica de un agua residual. En esta depuración se tiende a que la materia orgánica pase a ser inorgánica, en el caso de las algas, para su desarrollo, parten de sustancias inorgánicas dando lugar a la formación de masas orgánicas, que son sus propios cuerpos. Por tanto si a un agua residual que va posteriormente a un embalse no se ha eliminado el fósforo, nos exponemos a que parte de la materia orgánica que se eliminó con la depuración sea formada de nuevo por las algas, por otra parte cuando las algas agotan los nutrientes de las capas superficiales, detienen su crecimiento, llegando a precipitarse hacia el fondo donde se descomponen y agotan el oxígeno de las capas más profundas.

Las algas pueden originar en el mejor de los casos atascamiento de los filtros y en el peor malos olores y sabores y determinadas especies como las cianobacterias, pueden originar toxinas perjudiciales para la salud humana.

#### **2.4.1 Ciclos Térmicos de un Embalse (Estratificación y mezcla)**

La composición de las aguas en cuanto a características físico-químicas y biológicas en los embalses y lagos no es homogénea, es decir, no están perfectamente mezclados sino que existen gradientes horizontales y sobre todo verticales (estratificación) motivadas por las diferentes temperaturas del agua, según las estaciones del año, de forma que unas veces está estratificado térmicamente y otras está en circulación. Las diferentes temperaturas ocasionan distintas densidades (máxima a 4° C).

La capa superior o epilimnión, fría en invierno y caliente en verano, protege o cubre a una capa más profunda, el hipolimnión, cuya temperatura es casi constante todo el año. En el intermedio de ambas zonas, existe una capa más estrecha, la termoclina, que está sometida a unos importantes cambios térmicos, correspondiéndole por tanto un importante gradiente de densidad motivado por el gradiente vertical de temperaturas y es esta capa la que aísla o dificulta la interacción entre las capas superficial y profunda.

El ciclo térmico que tiene lugar es un embalse o lago templado, puede empezar al considerarse la época fría, en la que el agua a temperaturas próxima a 4° C (densidad máxima) tiende a hundirse removiendo a la masa de agua, favorecido por la acción del viento.

En los embalses y lagos templados durante el invierno, las diferencias de temperatura que existen entre la aguas profundas y las de la superficie no suelen ser suficientes para impedir su mezcla, por lo que en estas condiciones la distribución vertical de diferentes características o propiedades del agua se hacen más uniformes, por ejemplo las concentraciones de oxígeno y otros elementos nutrientes.

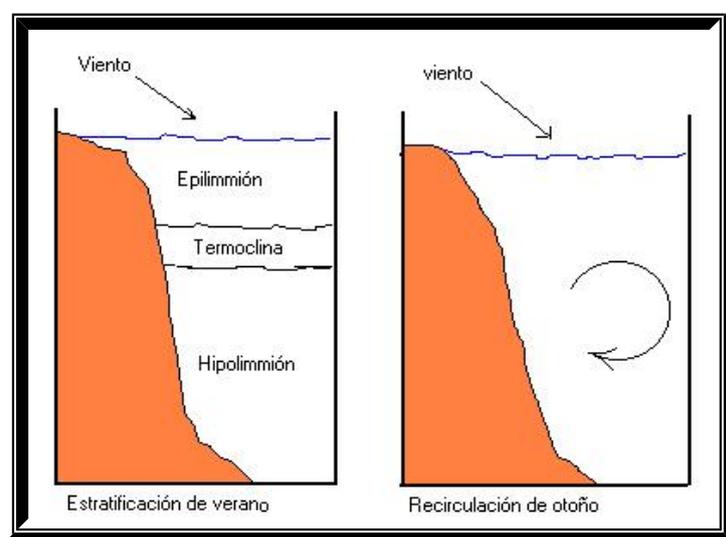
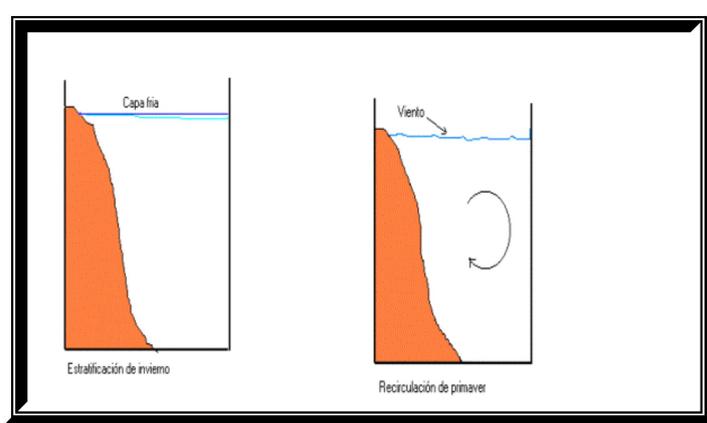
Al ir aumentando las temperaturas por avance de la época del año, las capas superiores se calientan, disminuyen su densidad y flotan sobre la masa de agua más profunda y fría, lo que ocasiona cierta estabilidad. El calor ambiente va calentando la capa superficial y a su vez se va propagando hacia el interior y el agua se mezcla en superficie, ayudada por el viento, uniformizándose las propiedades del agua en un determinado espesor de la capa superior (epilimnión).

A medida que el espesor de esta capa se va haciendo mayor, el gradiente térmico de la parte inferior de esta capa va aumentando por incorporarse a esta parte inferior capas más profundas y frías; este aumento del espesor del epilimnión origina que la distancia hasta la superficie (por

donde entra la energía) sea cada vez mayor, provocando que el proceso de crecimiento del espesor de la capa sea cada vez más lento e incluso llega a detenerse, quedando la termoclina a una distancia que dependerá de la intensidad de la radiación solar y del viento.

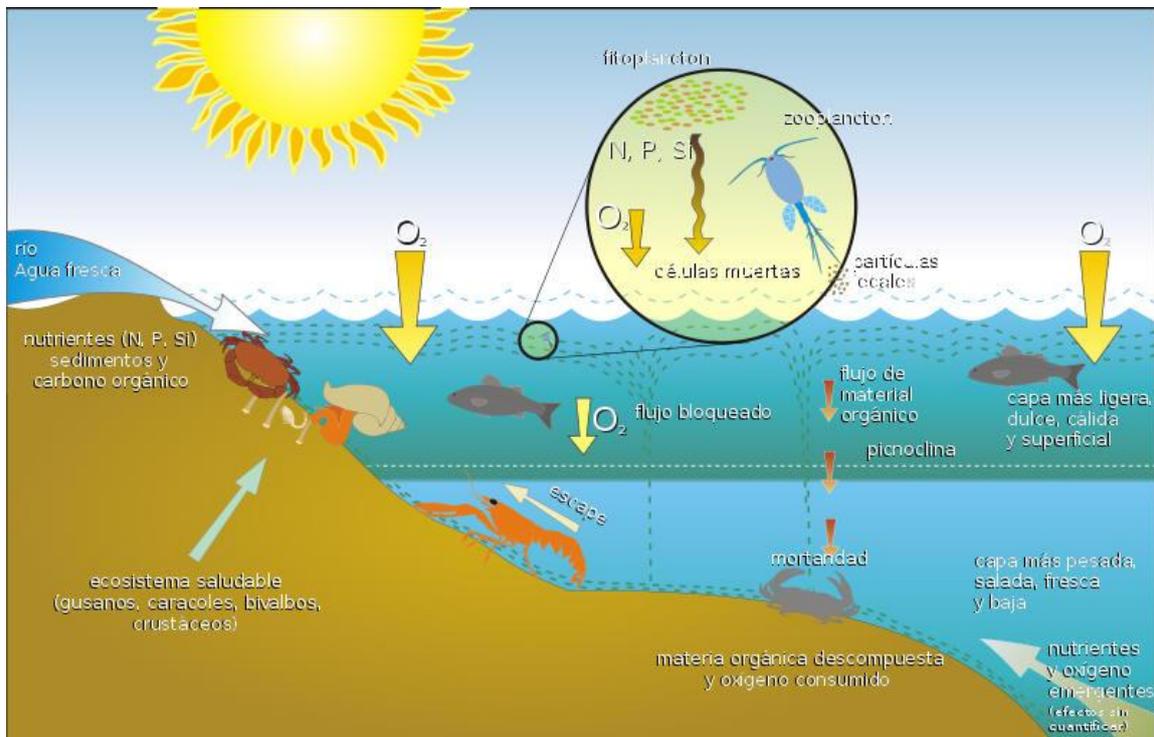
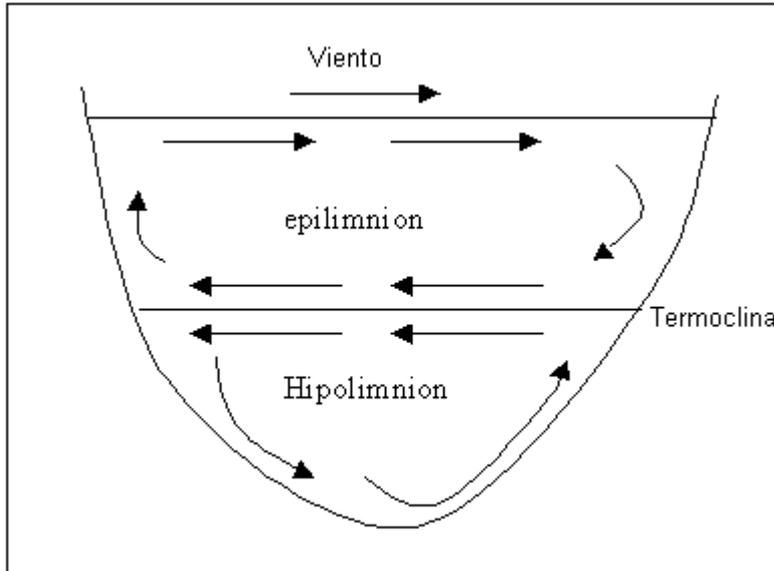
Al llegar el otoño e ir enfriándose las capas superiores, la densidad de esta agua aumenta y se hundirá hasta la zona que le corresponda por densidad, pudiendo destruirse en pocos días la capa intermedia, (termoclina), que había tardado meses en formarse.

En los esquemas siguientes se muestran estos ciclos:



Hay que señalar que este ciclo anual de mezcla y estratificación térmica, va acompañado por cambios en la concentración de nutrientes, lo que provoca el aumento del fitoplancton durante la primavera y a veces en las aguas templadas, también en otoño. Las bajas temperaturas e intensidad de la luz, limita este crecimiento en invierno. Como casos extremos, en los lagos polares, no existe termoclina, siendo en verano cuando el crecimiento de fitoplancton es mayor, y en los lugares

tropicales la termoclina existe casi permanentemente, aunque en general en estos lagos suelen existir varios patrones de estratificación.



## 2.5. Pretratamientos del agua potable

Antes de proceder al tratamiento de las aguas brutas, en busca de una calidad ajustada a las necesidades del usuario, estas aguas se someten, en general, a un pretratamiento que comprende un cierto número de operaciones físicas y mecánicas. Los pretratamientos tienen por objeto separar del agua la mayor cantidad posible de las materias que, por su naturaleza o tamaño, son motivo de problemas en los tratamientos posteriores.

Las operaciones de pretratamiento pueden incluir una o varias de las operaciones siguientes:

- Desbaste
- Tamizado
- Dilaceración
- Desarenado
- Desaceitado y desengrase

De entre estas operaciones algunas son propias del tratamiento de aguas residuales y raramente se emplean en el tratamiento de aguas potables. Este es el caso de la dilaceración o del desengrasado, y por ello no serán descritas con detalle. Otras, en cambio, aún siendo más frecuentes en aguas residuales, también se emplean con cierta frecuencia en aguas potables, como es el caso del desarenado.

Se hace omisión expresa del tratamiento de los residuos de estas operaciones, puesto que el problema se plantea en un orden de dimensión mucho más elevado en las plantas de tratamiento de aguas residuales, donde se tratará este problema con la amplitud necesaria.

### **2.5.1. Desbaste**

Las operaciones de desbaste tienen como objetivo:

Proteger a la planta de tratamiento de la posible llegada intempestiva de grandes objetos capaces de provocar obstrucciones en las distintas unidades de la instalación.

Separar y evacuar fácilmente las materias voluminosas arrastradas por el agua bruta, que podrían disminuir la eficacia de los tratamientos siguientes, o complicar la realización de los mismos.

La operación de desbaste se lleva a cabo exclusivamente a base de rejillas, que retienen estos objetos, generalmente flotantes, cuya presencia se desea evitar. Pueden distinguirse:

Desbaste fino, de separación entre barrotes de la reja comprendida entre 3 y 10 mm.

Desbaste medio, de separación entre barrotes de la reja comprendida entre 10 y 25 mm.

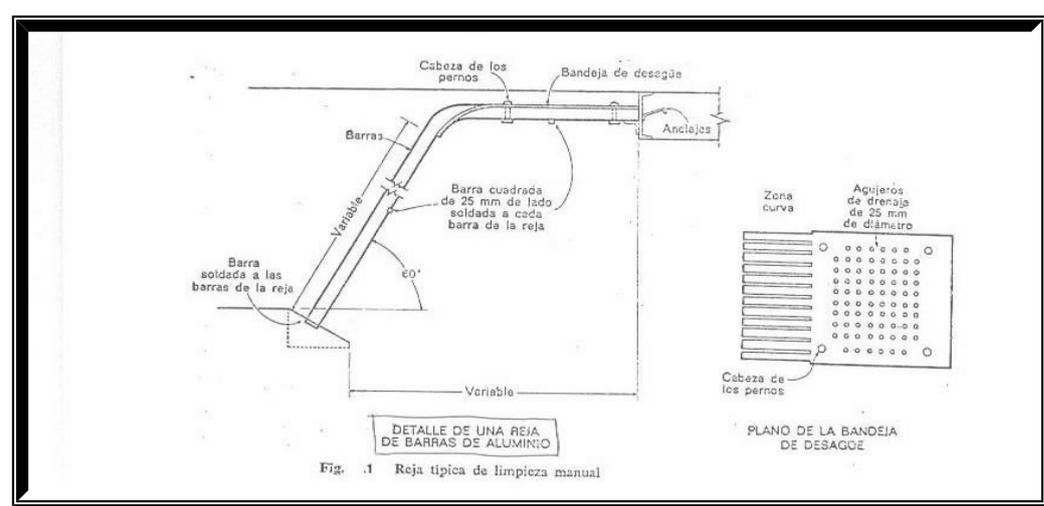
Predesbaste, con una separación entre barrotes de 50 a 100 mm.

Las rejas utilizadas en las operaciones de desbaste, al ir reteniendo los objetos de grandes dimensiones, se atascan progresivamente. Por ello, es necesario proceder de forma periódica a su limpieza. Esta limpieza puede ser manual o automática. Una reja de limpieza automática (rejas mecánicas) se protege normalmente con una reja de predesbaste.

### Rejas manuales

Las rejas manuales están constituidas por acero, en ocasiones verticales, pero más frecuentemente con una inclinación sobre la vertical de 15 a 40°.

La longitud de una reja manual no debe exceder de la que pueda rastrillarse fácilmente a mano. Los barrotes de la reja no serán menores de 1 cm. de anchura por 5 cm. de profundidad y van soldados a unas barras de separación situadas en la cara posterior, fuera de recorrido de las púas del rastrillo de limpieza manual. Encima de la reja suele colocarse una placa perforada para que los objetos rastrillados puedan almacenarse temporalmente hasta su evacuación. En la figura se muestra una reja de limpieza manual típica.



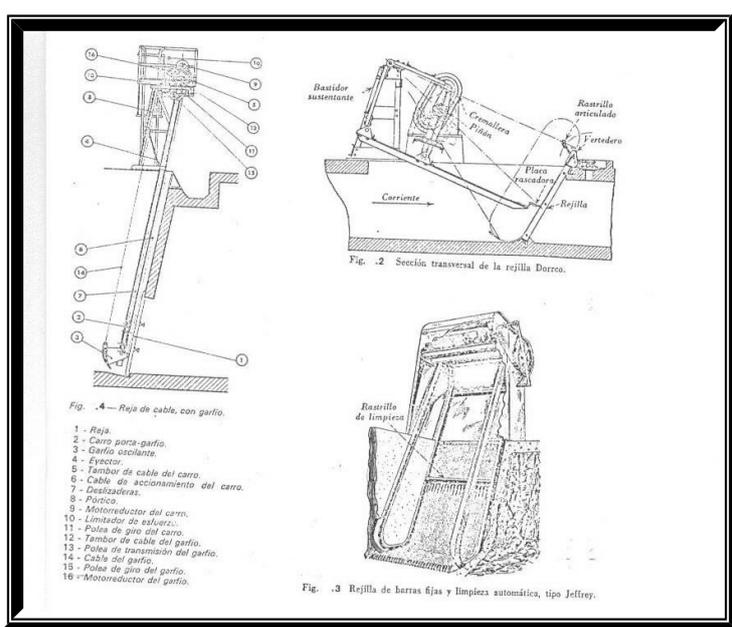
El canal donde se ubica la reja debe proyectarse de modo que se evite la acumulación de arena y otros materiales pesados en sus cercanías. La velocidad de aproximación del agua a la reja, es recomendable, se aproxime a unas velocidades medias de 0,45 m/s.

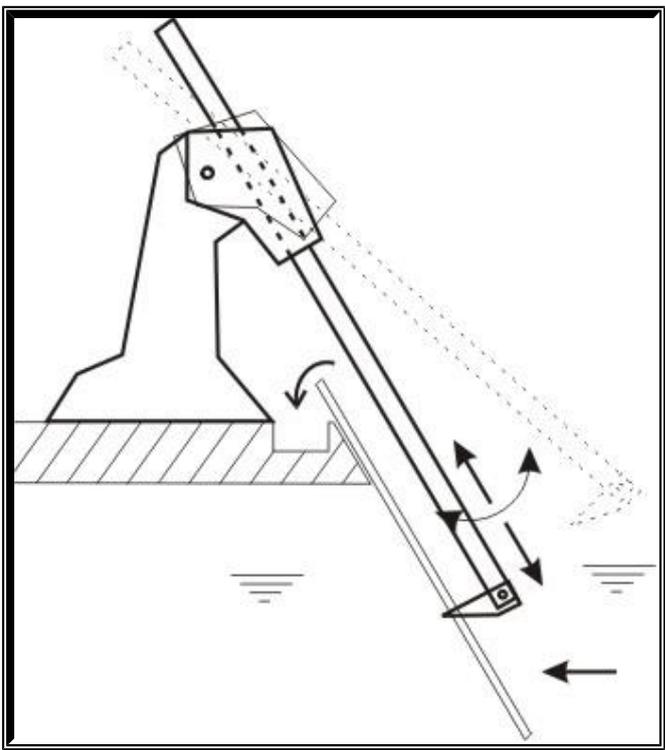


### Rejas de limpieza automática

En las rejas mecánicas, la limpieza se realiza mediante un elemento movido por un motor que tras desbrozar la rejilla deposita los residuos en un lugar previsto para este fin, tal como recipientes, vagonetas, cintas transportadoras, etc.

El mecanismo de limpieza de las rejas mecánicas puede actuar de forma continua o intermitente. El sistema de funcionamiento intermitente puede realizarse mediante temporizador, que ordena una limpieza cada cierto periodo de tiempo (por ejemplo, cada 15 min.) o mediante un automatismo que se ponga en marcha cuando la pérdida de carga, a través de la reja, alcanza un valor predeterminado.





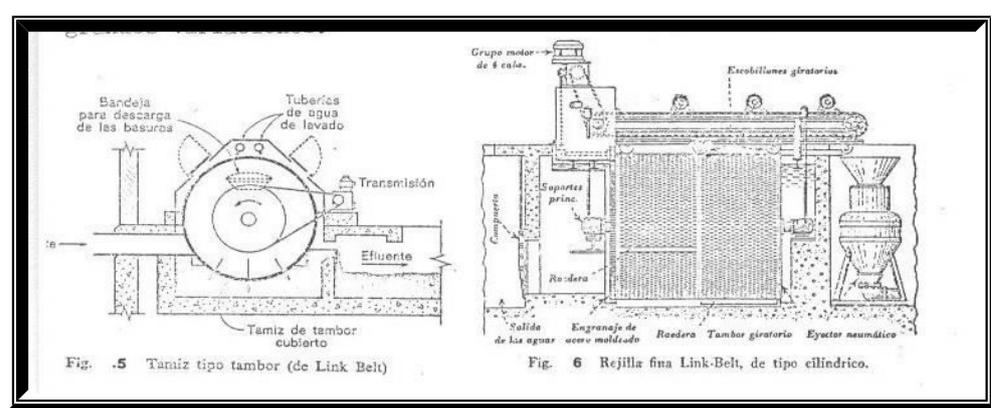
### 2.5.2. Tamizado

El tamizado puede considerarse como una filtración sobre soporte delgado, que se utiliza en numerosos campos del tratamiento del agua. Según la dimensión de los orificios de paso se distinguen dos variantes:

El macrotamizado, con orificios superiores a 0,3 mm., se emplea para retener ciertas materias en suspensión, flotantes o semiflotantes, residuos vegetales o animales, insectos, ramas, algas, hierbas, etc., de tamaño comprendido entre 0,2 mm y algunos milímetros.

El microtamizado, con malla inferior a 100 micras, que se utiliza para retener materias en suspensión de muy pequeñas dimensiones, contenidas en el agua de abastecimiento (plancton) o en aguas residuales pretratadas.

### Tamices rotatorios



### Tamices fijos con rasquetas

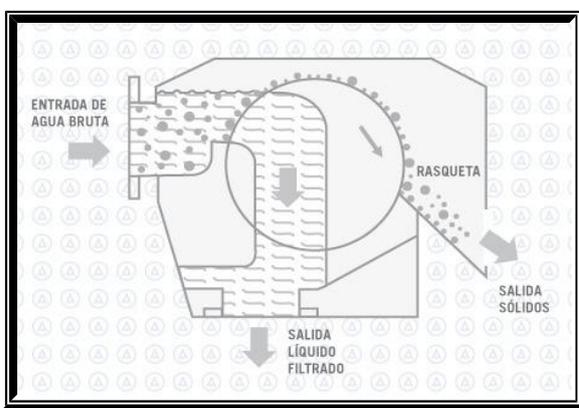
En estos tamices la limpieza se realiza en forma análoga a las rejillas sin más que sustituir el rastrillo de éstas por un cepillo.



### Tamices de autolimpieza

Los tamices de autolimpieza denominados estáticos, llevan una reja constituida por barras horizontales, rectas o curvadas, de sección triangular. El agua se distribuye en la parte superior de la reja, cuya inclinación sobre la horizontal disminuye progresivamente de arriba a abajo, entre 65° y 45°, aproximadamente. Se tienen así, sucesivamente, los efectos de separación, escurrido y evacuación de las materias sólidas.

Los tamices de autolimpieza denominados rotatorios llevan una reja cilíndrica de eje horizontal, constituida por barras de acero inoxidable de sección trapezoidal la cual gira lentamente. Las materias retenidas en la reja se recuperan por medio de un rascador fijo y se evacuan. Estos tamices tratan caudales entre 10 y 1000 m<sup>3</sup>/hora y la pérdida de carga es elevada (del orden de 2m).



## 2.5. Desarenado

El desarenado tiene por objeto extraer del agua bruta la grava, arena y partículas minerales más o menos finas, con el fin de evitar que se produzcan sedimentos en los canales y conducciones, para proteger las bombas y otros aparatos de la abrasión, así como para evitar sobrecargas en las siguientes fases de tratamiento.

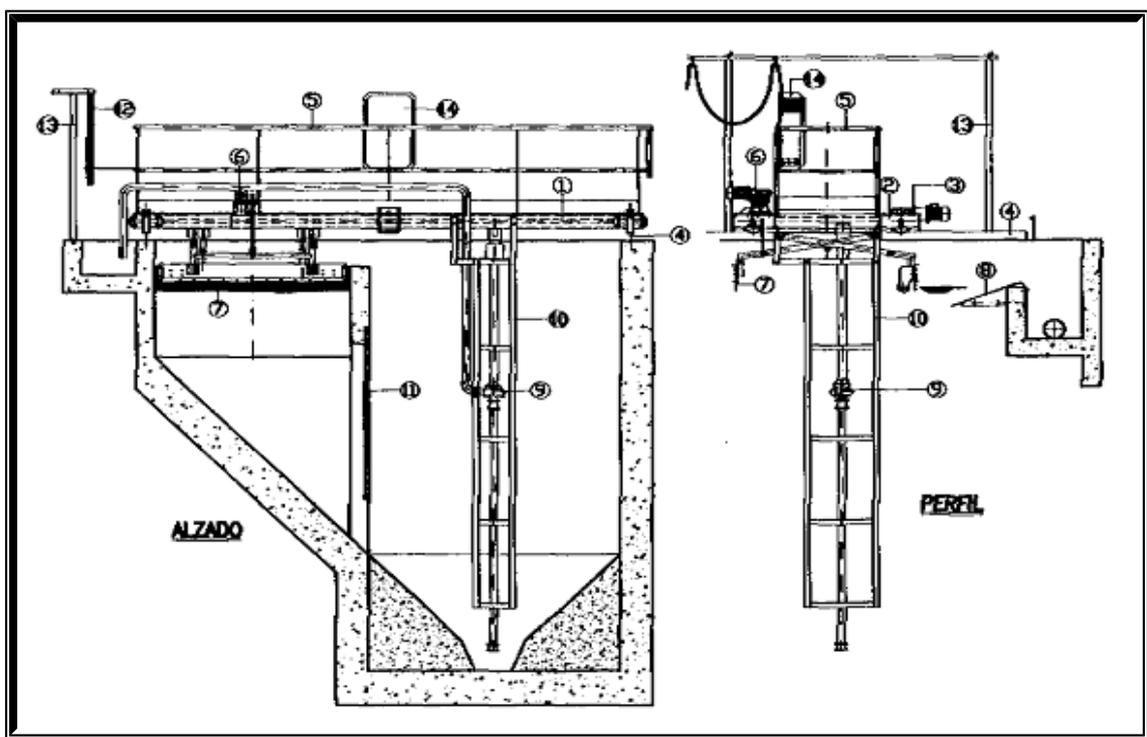
En el desarenado se pretende eliminar las partículas superiores a 200 micras. Las granulometrías inferiores corresponden a los procesos de pre-decantación y decantación.

Los desarenadores empleados en tratamientos de agua potable son generalmente rectangulares de tipo canal. Se trata simplemente de un canal donde la velocidad del agua se reduce, propiciando de esta forma la sedimentación de las partículas granulares.

La arena puede separarse también mediante un ciclón pero hay peligro de desgaste de las bombas por abrasión. Con los hidrociclones se obtiene un excelente desarenado con arenas de 100 a 500 micras, pero crean una pérdida de carga bastante fuerte ( $> 0,50m.$ ).

En aguas residuales, además del tipo canal comentado, se emplean desarenadores circulares, con alimentación tangencial y agitación mecánica y desarenadores rectangulares aireados, ya que el problema fundamental de éstas consiste en separar la arena con un contenido mínimo de materias orgánicas.

El proceso de desarenado, en aguas potables, se sitúa, frecuentemente, en la captación, siendo poco frecuente que se sitúe en la estación de tratamiento. La extracción de la arena se efectúa, por regla general, de forma automática, de alguna de las siguientes formas:



- Por un conjunto de emulsores de aire
- Por barrido, con cadenas sin fin o puente de rasquetas
- Directamente por una bomba aspirante, montada sobre un puente móvil.



## 2.6. Desaceitado y desengrase

El desaceitado es una operación de separación líquido-líquido, en tanto que el desengrase es una operación de separación sólido-líquido (siempre que la temperatura del agua sea lo suficientemente baja como para permitir la coagulación de las grasas).

Los aceites y grasas, generalmente más ligeros que el agua, tienden a subir a la superficie. Por ello, todo dispositivo en el que se reduzca la velocidad del flujo, y que ofrezca una superficie tranquila, actúa como separador de grasa y aceite.

Sin embargo, es frecuente acelerar el proceso natural de flotación insuflando aire que, en su ascensión, arrastra las partículas de grasa hacia la superficie.

La recogida en superficie puede efectuarse por vertido, arrastre con cinta sin fin y rascado, entre otros.



## Ejercicios prácticos de dosificación de reactivos

- 1.- En 35 gramos de agua se disuelven 5 gramos de Cloruro de Hidrógeno (ClH). La densidad de la disolución resultante es de 1,06 gr/cm<sup>3</sup>. Hallar su concentración: a) e porcentaje en peso, b) en gr/l.
- 2.- Se disuelven 2,26 gramos de Carbonato Cálcico, en un volumen de 50 ml de agua. Calcular la concentración en porcentaje en peso.
- 3.- Calcular la cantidad de hidróxido sódico y agua que se necesitan para preparar 2 litros de una disolución que sea al 20% y de densidad 1,22 gr/ml.
- 4.- Tenemos una disolución de ClH de 30,5% y densidad 1,12 gr/ml. ¿Cuál es el peso del ClH por ml de disolución?
- 5.- Queremos preparar 10 litros de una disolución de cloruro sódico, donde haya 1470 gr de sólido puro. Para ello dispongo de otra disolución de 92,77% en peso y densidad 1,827 gr/ml. ¿Qué volumen de la segunda disolución necesitamos?
- 6.- Conociendo que el sulfato de aluminio tiene una densidad de 1,32 gr/ml y una riqueza en peso del 50%, calcular que volumen debo tomar para obtener 20 mg del reactivo
- 7.- Queremos dosificar 40 ppm de sulfato de aluminio cuando el caudal de agua bruta sea 1100 m<sup>3</sup>/hora. ¿ A qué caudal tenemos que poner la bomba dosificadora de sulfato?
- 8.- El mismo problema anterior pero ahora queremos 90 ppm y el caudal de entrada de agua bruta es de 900 m<sup>3</sup>/hora.
- 9.- Al 50% la bomba dosificadora de permanganato potásico tiene un caudal de 2,3 litros/minuto. Sabiendo que la densidad del permanganato es de 1,48 kg/l y que la cubeta para preparar el reactivo es de 3000 litros, ¿cuánto permanganato tendremos que añadir a la cubeta para dosificar 1,5 ppm con la bomba de permanganato al 50%, teniendo en cuenta que a la planta llegan 850 m<sup>3</sup>/h de agua bruta?
- 10.- Necesitamos dosificar 2 ppm de permanganato en el agua. La bomba dosificadora de permanganato está a 2,5 litros/min. ¿Cuántos kilos de permanganato debemos añadir a la cubeta? Si

para adicionar el permanganato sólo tenemos una probeta de 1 litro, ¿cómo añadiremos esos kilos a la cubeta? Suponemos un caudal de agua bruta de 1100 m<sup>3</sup>/hora.

11.- La densidad del carbón activo es de 0,55 gr/ml. Si queremos dosificar 20 ppm y el caudal es de 241 litros/segundo, calcular cuanto carbón activo debe dosificar el sinfín en la cuba de 1000 litros.

12.- El rotámetro de precloración marca 13 kg/h y el de postcloración 3 kg/h. Sabiendo que el caudal de agua bruta es 860 m<sup>3</sup>/hora, decir cuantos ppm estamos dosificando en precloración y en postcloración.

## 3. Filtración

### 3.1. Introducción

La sedimentación, con coagulación o sin ella, no proporciona ordinariamente un tratamiento suficientemente satisfactorio del agua. La obtención de agua clara y transparente, con la máxima garantía por lo que se refiere a la posible transmisión de enfermedades requiere el empleo de un filtro. La filtración ayuda, además, a la eliminación del hierro y manganeso, del color, de los gustos y de los olores.

Se han empleado filtros de dos tipos: el filtro de arena lento se empleó inicialmente en Gran Bretaña a principios del siglo XIX y en Estados Unidos se construyó una serie de plantas de este tipo entre 1890 y 1910. El filtro de arena rápido, conocido bajo la denominación de filtro americano o mecánico, fue desarrollado en Estados Unidos entre 1900 y 1910, y debido a su mejor adaptación a nuestras aguas más turbias, ha desplazado al filtro lento. Sin embargo, algunas grandes ciudades siguen todavía con sus filtros de arena lentos y por otra parte, éstos han encontrado una aplicación en instalaciones modernas de tratamiento de aguas residuales.

### 3.2. Teoría de la filtración

En general, se considera la filtración como el paso de un fluido a través de un medio poroso que retiene la materia que se encuentra en suspensión. En las principales instalaciones de filtración, los filtros suelen ser abiertos, mientras los filtros cerrados suelen utilizarse para instalaciones pequeñas (menor de 40m<sup>3</sup>/h).

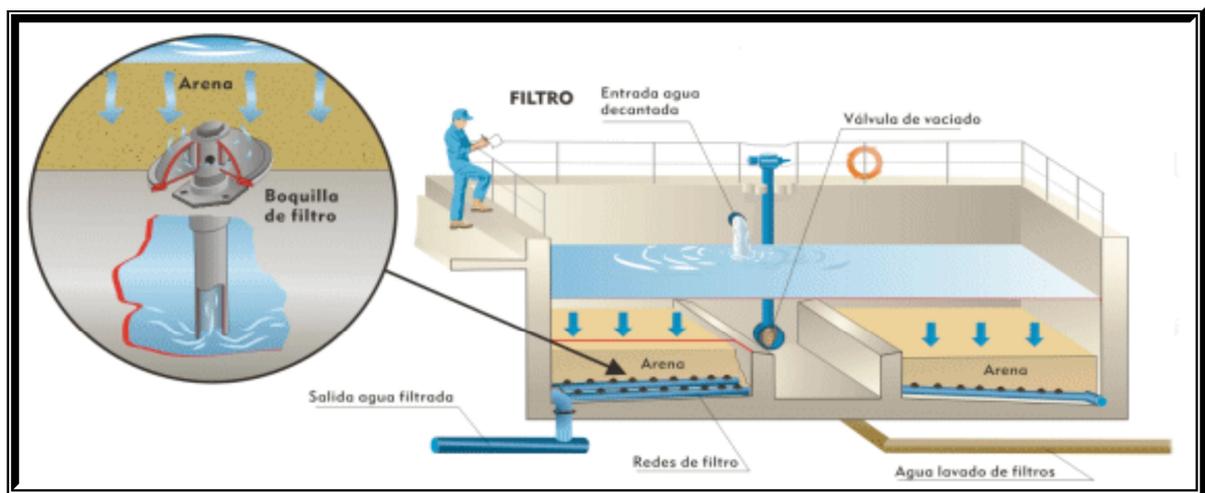
En las instalaciones de filtración de las estaciones de tratamiento de agua, el medio poroso suele ser generalmente arena, arena + antracita o bien carbón activo en grano, y la materia en suspensión está constituida por flóculos o microflóculos procedentes de la etapa anterior de decantación o bien formados expresamente cuando se sigue el proceso conocido como "microfloculación sobre filtro" o filtración directa". Los filtros de estas instalaciones, generalmente son abiertos, con velocidades de filtración entre 6 y 15 m/h, empleándose los filtros cerrados a presión en instalaciones pequeñas (menores de 50 m<sup>3</sup>/h).

El espesor de la capa de arena suele oscilar entre 0,7 y 1 m. y la talla efectiva entre 0.8 y 1mm con un coeficiente de uniformidad entre 1,5 y 1,7. En el caso de lechos bicapa, el espesor de arena es 1/3 del total y sobre ella una capa de antracita de 2/3 del espesor total y talla efectiva entre 1,2 y 2,5mm.

Realmente, el espesor y granulometría depende de la velocidad de filtración, del tamaño y naturaleza de las partículas que van a ser retenidas y de la pérdida de carga disponible.

La velocidad de filtración, para el caso de filtración rápida, suele ser del orden de 5 a 15 m/h (m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>/h).

Uno de los parámetros más indicativos del comportamiento del filtro es la turbidez del agua filtrada. Al comenzar el período de filtración, partiendo de un lecho filtrante limpio, hay un período inicial de tiempo, relativamente corto, conocido como "período de maduración" en el cual la turbidez del agua filtrada va disminuyendo hasta alcanzar un punto a partir del cual la turbidez se mantiene casi constante un período largo de tiempo, que dependerá de la altura de capa del lecho.



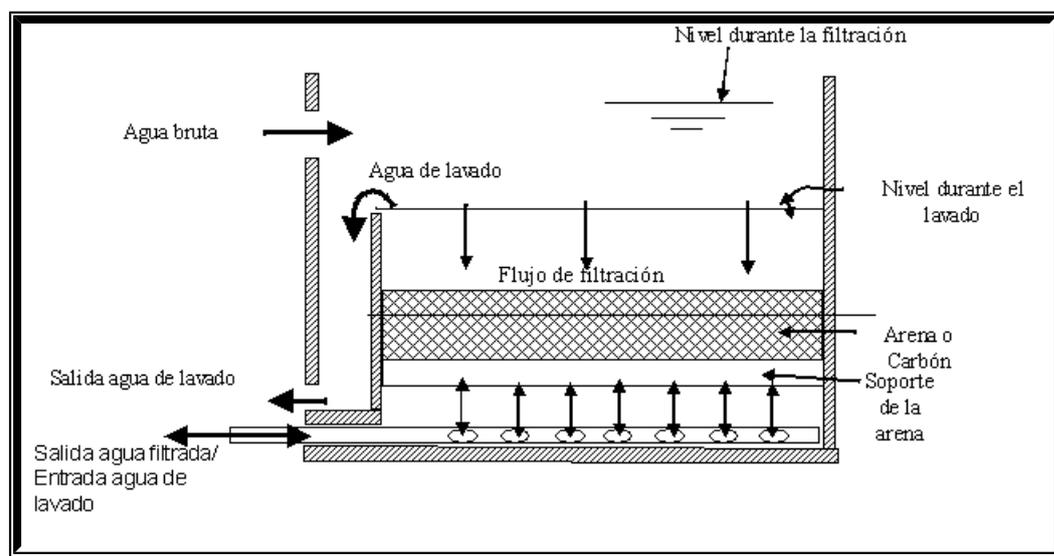
Continuando la filtración, se llegará aun punto a partir del cual la turbidez inicia un incremento, conociéndose este punto como el comienzo del "período de perforación" del filtro.

La pérdida de carga, que en el caso de un filtro, en definitiva nos indica el grado de dificultad que encuentra el agua a su paso a través de la arena, nos sirve para hacer un seguimiento del estado de atascamiento del lecho de arena con el transcurso de tiempo de filtración. Al construir los filtros, se fija la pérdida de carga máxima a la que podrá llegarse, y deberá ser tal que el tiempo que tarda en alcanzarse, sea igual o ligeramente inferior al tiempo, al cabo del cual se alcanzará la perforación del filtro, de esta forma, se aprovecha el atascamiento de la casi totalidad de la altura del lecho de arena previsto.

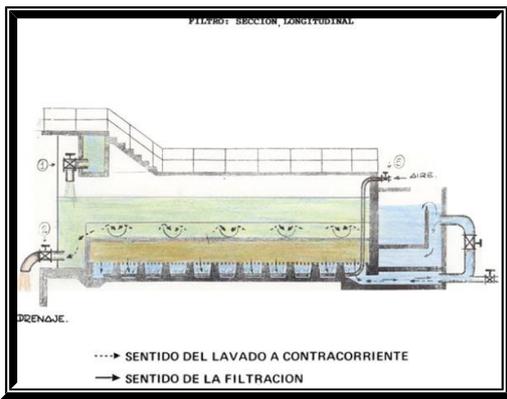
Para conseguir una tasa o velocidad de filtración constante, se pueden utilizar filtros que operan a nivel constante, con regulación aguas arriba y abajo mediante flotadores, válvulas de mariposa o sifones, o bien, emplear filtros de nivel variable, en los cuales, este nivel va aumentando a medida que aumenta la pérdida de carga como consecuencia del atascamiento o colmatación del lecho filtrante.

Llegado el momento de la máxima pérdida de carga de alguno de los filtros que forman la instalación, se interrumpe la entrada de agua a filtrar y se procede al lavado a contracorriente, que consta de tres fases: 1) Esponjamiento del lecho con aire a baja presión (entre 30 y 60 segundos). 2) Lavado con aire y agua (entre 3 y 6 minutos) y 3) Aclarado con agua (entre 12 y 7 minutos).

En la figura siguiente se representa el esquema de un filtro (de nivel constante) con indicación de los flujos de filtración y de lavado a contracorriente así como los niveles de filtración y de lavado.

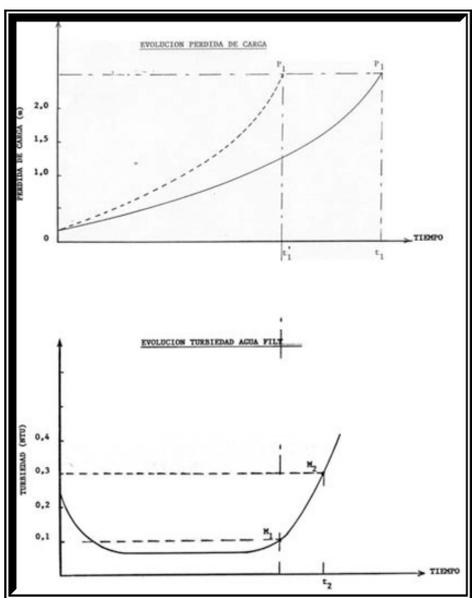


En el lavado a contracorriente, el lecho de arena se expande y el aire provoca que los granos de arena al rozar uno contra otro se desprendan de las partículas retenidas, que después serán arrastradas por el agua de lavado hacia los vertederos o canales de recogida del agua de lavado. El proceso de lavado finaliza cuando esta agua resultante del lavado no muestra apenas partículas en suspensión.



Respecto a la evolución de la pérdida de carga y la turbiedad del agua filtrada y su interrelación, consideremos, según se representa en las gráficas siguientes, un filtro con una pérdida de carga máxima, por construcción de 2,5 m. (columna de agua), tal pérdida de carga, para un espesor dado de arena, se alcanza en el punto  $P_1$ , al cabo del tiempo  $t_1$ .

Por otra parte, consideremos la evolución de la turbiedad del agua filtrada; al llegar al tiempo  $t_2$ , el filtro ha llegado a la perforación, correspondiéndole una turbiedad dada por el punto  $M_2$ , dado que  $t_2$  es menor que  $t_1$ , el filtro continúa filtrando, ya que no se ha alcanzado aún la pérdida de carga máxima. Esto nos indicará que el filtro está mal concebido y habrá que aumentar el espesor de arena, de forma que la pérdida de carga máxima se alcance antes, por ejemplo al cabo del tiempo  $t'_1$ , donde todavía no se ha llegado a la perforación del filtro y la turbiedad, punto  $M_1$ , continúa aún en valores aceptables.



### 3.2.1. Teoría de la filtración a través de un medio filtrante

Un filtro rápido consiste en un lecho de material grueso, tal como arena, de profundidad variable entre 300 mm y varios metros. La cinética de la eliminación de las partículas de tamaño inferior al de los huecos en el lecho, han sido descritos considerando dos etapas: una de transporte, y otra de fijación.

*El transporte* hasta la superficie del medio filtrante puede producirse por difusión, interceptación, sedimentación, choque o transporte hidrodinámico. El proceso de transporte está ayudado por la floculación que tiene lugar en los intersticios del filtro y por la distancia relativamente corta de recorrido necesaria para la eliminación por sedimentación.

*La fijación* de las partículas después de entrar en contacto con el medio filtrante, es de naturaleza química y está influenciada por el pH, composición iónica del agua, edad del floc, naturaleza y dosis del polímero, y la composición y condición de la superficie del medio.

Tanto el medio filtrante como las partículas suspendidas del agua a filtrar pueden tener cargas eléctricas relativamente importantes, las cuales pueden ayudar o inhibir la fijación. Estas cargas de superficie pueden verse alteradas tanto por cambios en el pH como por la adición de coagulantes de naturaleza química.

La eliminación de las partículas en un filtro de medio granular, tiene lugar de la siguiente forma:

- 1.La cantidad de partículas eliminadas por una capa de medio filtrante es proporcional a la concentración de aquellas que entra en la capa.
- 2.El rendimiento del filtro varía con el tiempo, aumentando al principio para disminuir posteriormente.
- 3.La cantidad de partículas eliminadas por una capa de medio filtrante es igual a la cantidad acumulada en los poros del filtro.
- 4.Cada capa del medio alcanza con el tiempo un punto, a partir del cual ya no se produce una clarificación de la suspensión y la concentración de partículas entrantes es igual a la de salientes.
- 5.La condición de equilibrio se alcanza, primeramente en la capa en la que se produce la alimentación del filtro, y va progresando a través de éste en la dirección del flujo.

No hay un acuerdo sobre si la condición de equilibrio se alcanza al no haber una retención de partículas entrantes o por una combinación de deposición y arrastre. Existe evidencia experimental

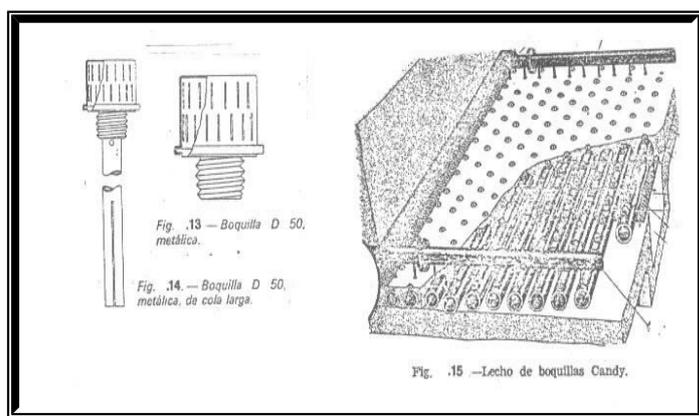
en apoyo de ambas teorías, por lo que parece posible que haya diferentes mecanismos para diferentes tipos de suspensiones.

A medida que se van saturando con el material retenido las sucesivas capas del filtro, la pérdida de carga a través del lecho irá aumentando debido a la obstrucción del flujo. Si la pérdida de carga llega a ser excesiva, puede producirse un vacío parcial en el seno del medio que dé lugar a la formación de burbujas de aire a partir de gases que abandonan la fase líquida. Esta formación de burbujas resulta en una restricción adicional del flujo, incrementando la velocidad de paso y la pérdida de carga y puede dar lugar a un arrastre de las partículas retenidas en el medio.

Las partículas de mayor tamaño y fuertemente ligadas tienen tendencia a ser retenidas en las capas superiores del filtro, dando lugar a grandes pérdidas de carga y poca penetración del floc.

Este fenómeno es especialmente pronunciado cuando el medio filtrante es fino. Las partículas suspendidas más finas tienen tendencia a penetrar más en los filtros, especialmente cuando el medio es grueso, distribuyendo de esta forma la reducción de la capacidad de circulación del flujo y dando lugar a menores pérdidas de carga para eliminaciones equivalentes durante períodos de tiempo iguales.

Puesto que cuando el material filtrante es de mayor tamaño cabe esperar mayores penetraciones, lógicamente los lechos de materiales gruesos deben tener más espesor y la experiencia así lo ha demostrado. La teoría de la filtración lleva a la conclusión de que el parámetro más importante es el área del medio filtrante, pero puesto que aquella es función del tamaño de las partículas del medio y de su profundidad, se puede concluir que un aumento del tamaño de las partículas del medio necesita de un incremento del espesor.



### 3.3. Funcionamiento de una instalación de filtración

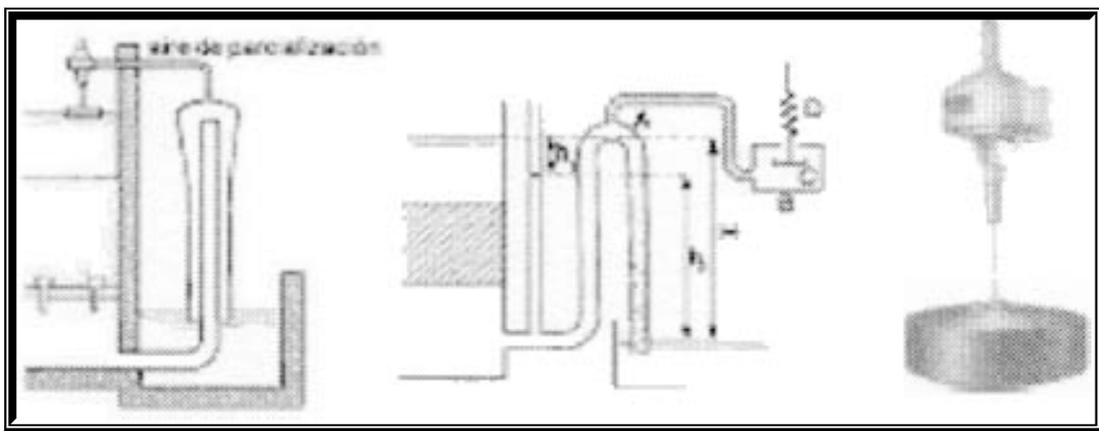
El agua clarificada procedente de los decantadores pasa a los filtros, donde las partículas (flóculos) que no han sido retenidas por los decantadores son retenidas al pasar por el medio filtrante. Los filtros suelen tener las siguientes características:

Un lecho filtrante único de arena de diámetro uniforme

Tasa de filtración constante y nivel del agua a filtrar constante o variable (en función de la pérdida de carga).

El lavado se realiza mediante la inyección de agua y aire.

El agua a filtrar que es repartida por igual a cada uno de los filtros que componen la instalación, así como la velocidad de filtración constante en cada filtro es obtenida por medio de dispositivos tales como flotadores, válvulas electroneumáticas, cajas de parcialización, y sifones.



Válvula electroneumática y rack electrónico ubicados aguas abajo del filtro.

Caja parcializadora-sifón concéntrico, ubicados dentro de la caja del filtro y aguas abajo del filtro.

Dispositivo sifón-caja parcializadora: La caja de parcialización es un sistema de detección y mando que regula el caudal de aire introducido en la parte superior del sifón. Esta caja está formada por el flotador y el sistema detector, los que se ubican en la superficie de agua dentro de la caja del filtro.

Sifón: Constituido por dos tubos concéntricos, donde el agua circula desde el tubo interior hacia el exterior, y se encuentra en la tubería de salida de agua filtrada.

Descripción del proceso de regulación

El conjunto sifón-caja parcializadora está unido por medio de un tubo de admisión de aire ubicado en la parte superior del sifón. Es por esta admisión de aire y cambio de presión que la acción del sifón es parcial o nula, con lo cual la variación de caudal es más o menos grande.

Esta entrada de aire está comandada automáticamente por la caja de parcialización, en la cual el flotador detecta el nivel de agua que se debe mantener constante sobre el filtro y deja entrar una cantidad de aire en función de ese nivel.

Si el nivel de agua sobre el filtro se eleva, bien sea porque el filtro está sucio o porque el caudal de la planta se incrementa, la caja de parcialización tiende a cerrarse, entra solo una pequeña cantidad de aire dentro del sifón y se produce un incremento en el caudal de agua filtrada. Si el nivel de agua disminuye, entonces el proceso es a la inversa. El sifón tiene un vacuómetro colocado en la parte superior que indica la pérdida de carga del filtro.

Dispositivo de regulación válvula mariposa electroneumática y rack Electrónico

El regulador válvula electroneumática y el rack de control están destinados a mantener el nivel de agua constante sobre la arena; sin regulación, este nivel es muy variable en función del grado de colmatación del filtro y de las modificaciones del caudal. La función de la regulación es crear, con la ayuda de una válvula de mariposa, una pérdida de carga auxiliar que es grande cuando el filtro está limpio, y por tanto el caudal de entrada es normal. Esta pérdida de carga disminuye a medida que el filtro se ensucia o el caudal aumenta bruscamente.

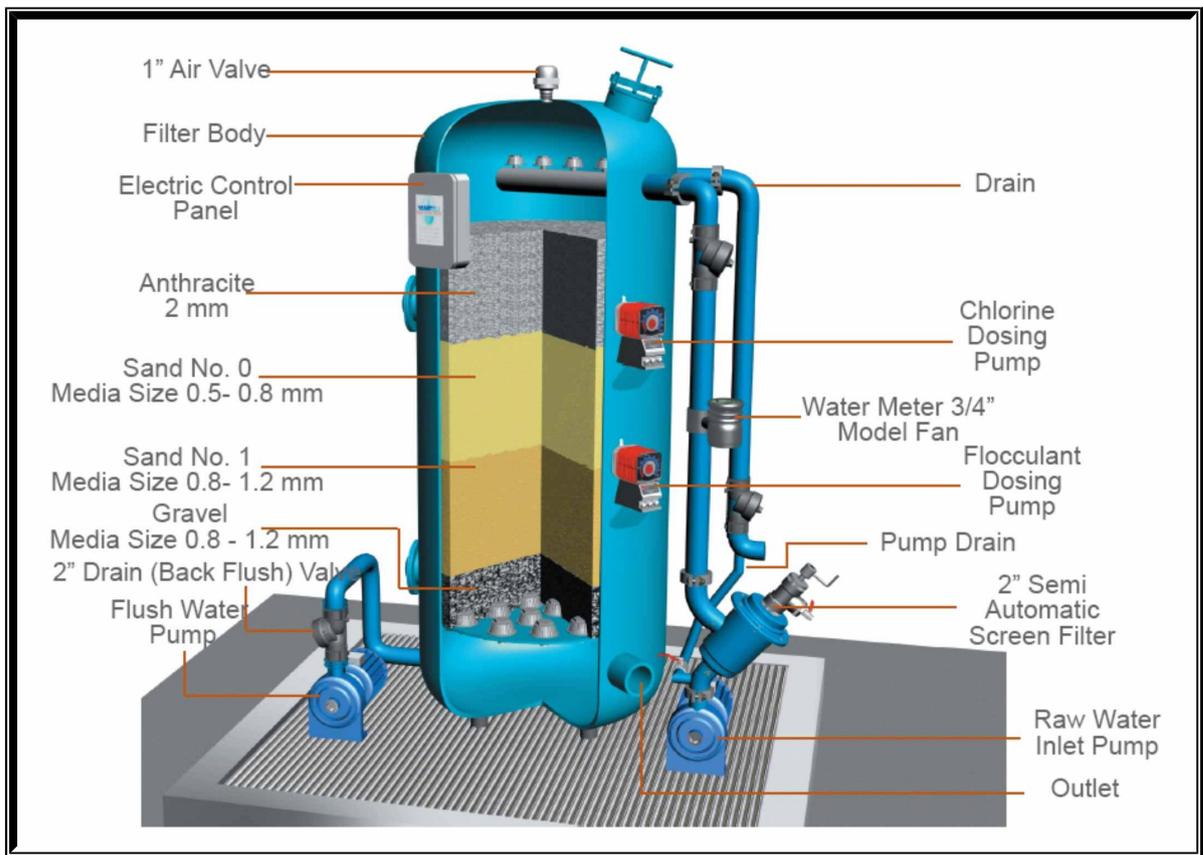
La pérdida de carga global del sistema filtro-válvula es mantenida constante por la regulación.

### 3.4. Medio filtrante

La elección de un medio filtrante debe basarse en su durabilidad, el grado de purificación deseado, la duración de los ciclos de filtración y facilidad de lavado a contracorriente. El medio ideal deberá ser de tamaño y naturaleza tales que sea capaz de producir un efluente de calidad satisfactoria, retener la máxima cantidad de sólidos y poder limpiarse con facilidad empleando la mínima cantidad de agua para lavado.

El tamaño del medio filtrante viene determinado por su *tamaño efectivo* que es el del tamiz, expresado en milímetros, que deja pasar un 10 % del peso. La uniformidad del tamaño se determina por el *coeficiente de uniformidad* que es la relación entre el tamaño del tamiz que deja pasar el 60 % del peso y el tamaño efectivo. Los materiales finos producirán mejores efluentes, pero darán lugar a mayores pérdidas de carga en las capas superiores del medio filtrante, con lo que los ciclos de filtración serán más cortos. Por el contrario, los materiales gruesos permiten una mayor

penetración del floc, mejor utilización de la capacidad de almacenamiento del filtro, mayor duración de los ciclos de filtración y lavado a contracorriente más sencillo. Se ha comprobado que los materiales finos contribuyen a la formación de bolas de fango.



La arena es el medio filtrante más barato y, por lo tanto, ha sido ampliamente utilizado. La arena a emplear en los filtros rápidos debe estar libre de suciedad, ser dura y resistente y preferiblemente estar constituida por cuarzo o cuarcita. No deberá perder más del 5 % en peso después de estar en una solución de ácido clorhídrico al 40 % durante 24 horas. El espesor del lecho de arena, cuando se emplea ésta exclusivamente, varía de 600 a 700 mm en la mayoría de los casos. En la práctica actual, se suelen emplear arenas de tamaños efectivos de 0,45 a 0,55 mm y los coeficientes de uniformidad no son superiores a 1,7, ni inferiores a 1,20.

Generalmente, se suele especificar la no aceptación de granos de arena de tamaño superior a uno preestablecido.

La *antracita* se ha empleado como sustituto de la arena en muchas plantas de tratamiento y puede utilizarse conjuntamente con aquélla y otros materiales en los filtros de medio filtrante mixto. La antracita para filtros tiene un tamaño efectivo de 0,7 < mm o superior y un coeficiente de

uniformidad igual o inferior a 1,75. Cuando se emplea sin otros materiales, los lechos de antracita suelen ser similares a los de los filtros de arena, y en estos casos puede utilizarse tamaños efectivos menores.

*La arena de granate o ilmenita* es un material especialmente denso (peso específico de 4,2) que puede utilizarse en filtros de medio mixto. Su coste relativamente elevado y su poca disponibilidad, junto con el hecho de su alta densidad, hacen impracticable la utilización de este material como único constituyente del medio filtrante.

*Otros materiales* que pueden estar disponibles en algunas áreas locales, tales como vidrio triturado, escorias, ciertos minerales metálicos e incluso cáscara de coco triturada y de arroz tostado, han sido utilizados como medio filtrante. Sin embargo, los materiales de mayor interés para el ingeniero son arena y antracita.

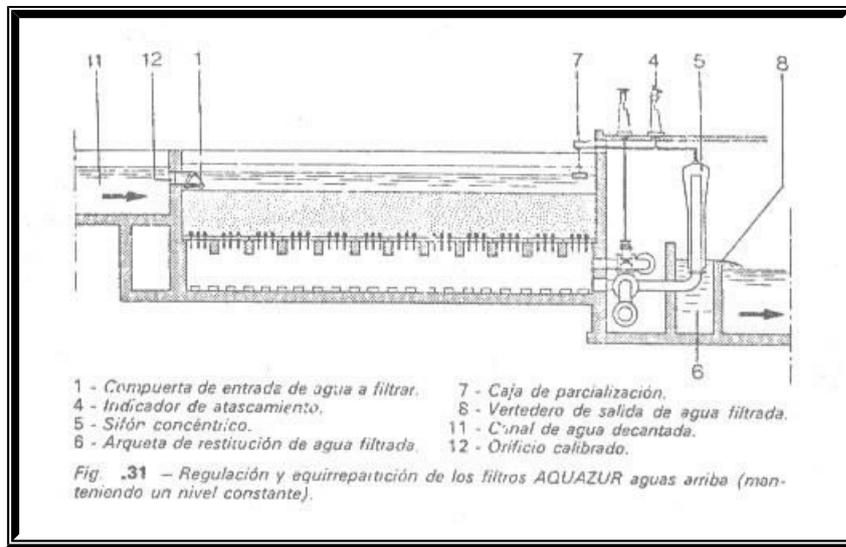
### 3.5. Medios filtrantes mixtos

Al lavar a contracorriente los filtros normales de material granular, las partículas más finas tienden a depositarse en la capa superior y las de mayor tamaño en el fondo. Esta clasificación es desfavorable ya que las partículas que no sean retenidas podrán atravesar el filtro. Con lo que la mayor parte del medio filtrante está inutilizada. La retención de sólidos en las capas superiores conduce a pérdidas de carga mayores que las que se producirían si los sólidos estuvieran distribuidos a través del filtro.

Esta clasificación desfavorable puede invertirse hasta cierto punto, por empleo de dos o más materiales de densidad distinta, seleccionados de tal forma que las partículas de mayor tamaño sedimenten más lentamente que las pequeñas. Los filtros de medio mixto suelen, generalmente emplear antracita (peso específico 1,5) y arena silíceas (peso específico 2,6) e incluso pueden tener arena de granate o ilmenita (peso específico 4,2). Puede demostrarse que los tamaños de las partículas de diferente densidad que tienen iguales velocidades de sedimentación se pueden calcular por medio de ella.

Los filtros de medio filtrante mixto no son filtros profundos verdaderos, pero procuran dos o tres superficies de filtro con huecos progresivamente menores, lo que permite un empleo efectivo de una mayor fracción de su volumen. Los ciclos de filtración son de duración proporcionalmente mayor y las pérdidas de carga menores que aquellas de los filtros de medio filtrante de un solo material. Puesto que se espera encontrar sólidos en diversos planos a través del filtro, así como en su superficie, los sistemas de lavado a contracorriente deben de ser seleccionados de manera que sean capaces de eliminar tales acumulaciones de sólidos. Los sistemas de arrastre que han

demostrado ser satisfactorios incluyen los de aire-agua y los de lavado rotativo con un segundo rotor situado unos 10 mm por encima del nivel sin expandir del medio de mayor densidad.



### 3.6. Filtros a presión

El filtro a presión es un filtro rápido de arena, dispuesto en un recipiente cerrado, a través del cual pasa el agua a presión. Estos filtros se construyen también con tanque horizontal. El lecho de arena tiene generalmente un espesor de 45 a 60 centímetros, empleándose los mismos coeficientes de uniformidad y tamaños efectivos de la arena que en los filtros abiertos de gravedad.

Para disponer las capas de grava se sigue la misma práctica que en los filtros ordinarios, y el sistema colector está formado por un enrejado de tubos o por falsos fondos.

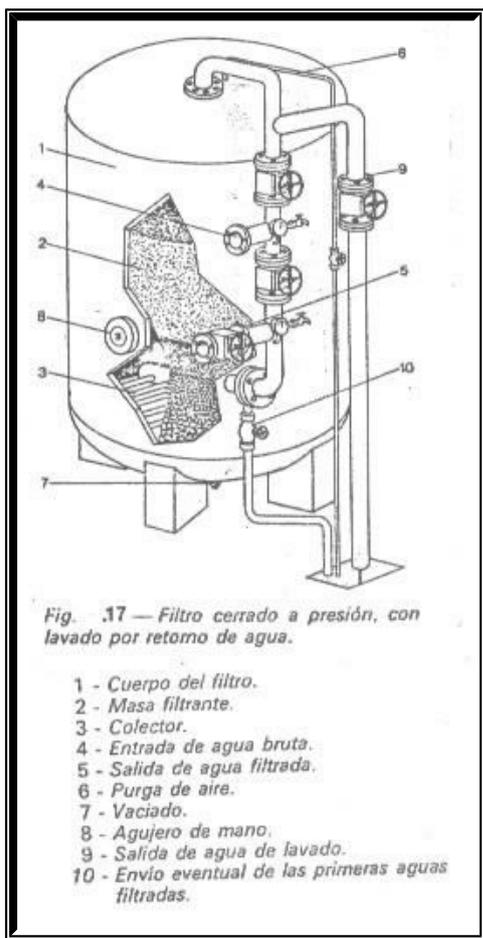
El lavado se consigue invirtiendo la dirección en que circula el agua mediante el manejo de válvulas dispuestas en la tubería. Un indicador de pérdida de carga pone de manifiesto cuándo es necesario el lavado.

El agua contiene generalmente una pequeña dosis de coagulante antes de llegar al filtro, consiguiéndose frecuentemente la dosificación mediante el paso de una pequeña parte del caudal de agua a través de recipientes de los que toma la cantidad requerida de alumbre y álcali.

Para la alimentación de estos recipientes se emplean alumbres amoniacales o potásicos troceados, y como álcali sosa comercial. Un método más eficaz consiste en inyectar una solución desde uno o varios depósitos y en este caso se pueden emplear como coagulantes la alúmina y la cal, que son más baratas. Estos filtros deben equiparse también con reguladores de caudal. Las unidades

verticales se construyen con diámetros de 0,40 a 2,40 m, y las horizontales en unidades de 2,10 a 2,40 m de diámetro y 2,40 a 7,50 m de longitud.

Una instalación puede formarse con una batería de filtros que reciben el agua cruda y descargan la filtrada en tinos conductos principales comunes.



### 3.7. Nuevas técnicas de filtración

#### 5.7.1. Sistemas de membrana

La tecnología de membrana se ha convertido en una parte importante de la tecnología de la separación en los últimos decenios. La fuerza principal de la tecnología de membrana es el hecho de que trabaja sin la adición de productos químicos, con un uso relativamente bajo de la energía y conducciones de proceso fáciles y bien dispuestas. La tecnología de la membrana es un término genérico para una serie de procesos de separación diferentes y muy característicos. Estos procesos

son del mismo tipo porque en todos ellos se utiliza una membrana. Las membranas se utilizan cada vez mas a menudo para la creación de agua tratada procedente de aguas subterráneas, superficiales o residuales. Actualmente las membranas son competitivas para las técnicas convencionales. El proceso de la separación por membrana se basa en la utilización de membranas semi- permeables.

El principio es bastante simple: la membrana actúa como un filtro muy específico que dejará pasar el agua, mientras que retiene los sólidos suspendidos y otras sustancias. Hay varios métodos para permitir que las sustancias atraviesen una membrana. Ejemplos de estos métodos son la aplicación de alta presión, el mantenimiento de un gradiente de concentración en ambos lados de la membrana y la introducción de un potencial eléctrico.

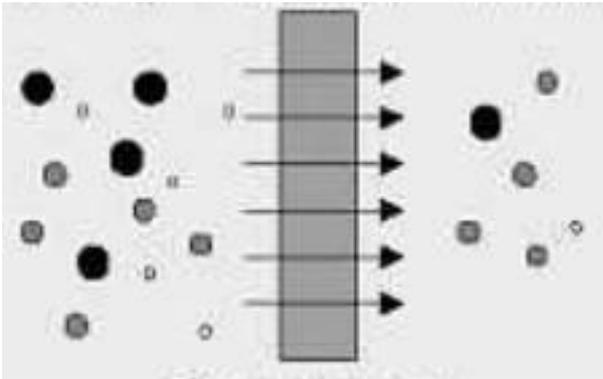


La membrana funciona como una pared de separación selectiva. Ciertas sustancias pueden atravesar la membrana, mientras que otras quedan atrapadas en ella.

La filtración de membrana se puede utilizar como una alternativa a la floculación, las técnicas de purificación de sedimentos, la adsorción, filtración de arena y filtros de carbón activado, intercambiador iónico, extracción y destilación.

Hay dos factores que determinan la efectividad de un proceso de filtración de membrana: selectividad y productividad. La selectividad se expresa mediante un parámetro llamado factor de retención o de separación (expresado en  $l/m^2 h$ ). La productividad se expresa mediante un parámetro llamado flujo (expresado en  $l/m^2 h$ ). La selectividad y la productividad dependen de la membrana.

**Feed water    Membrane    Permeate**

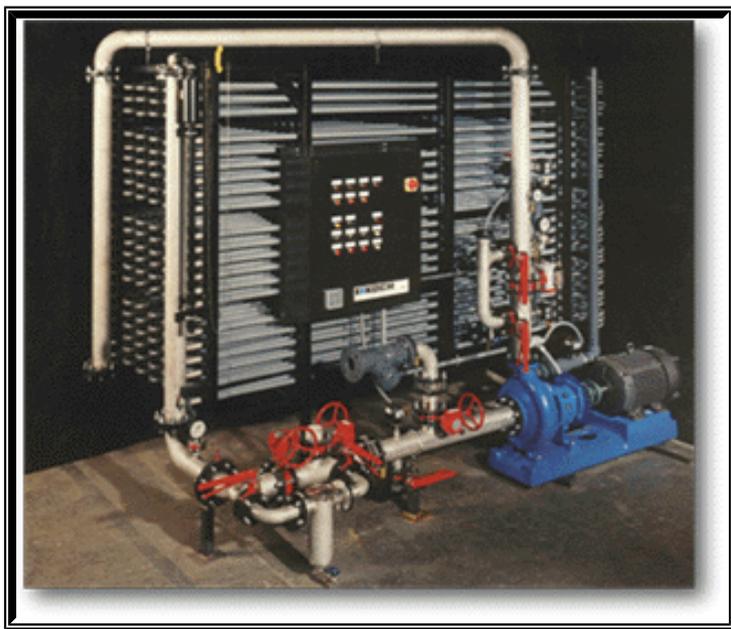


**Selectivity**

**Productivity**

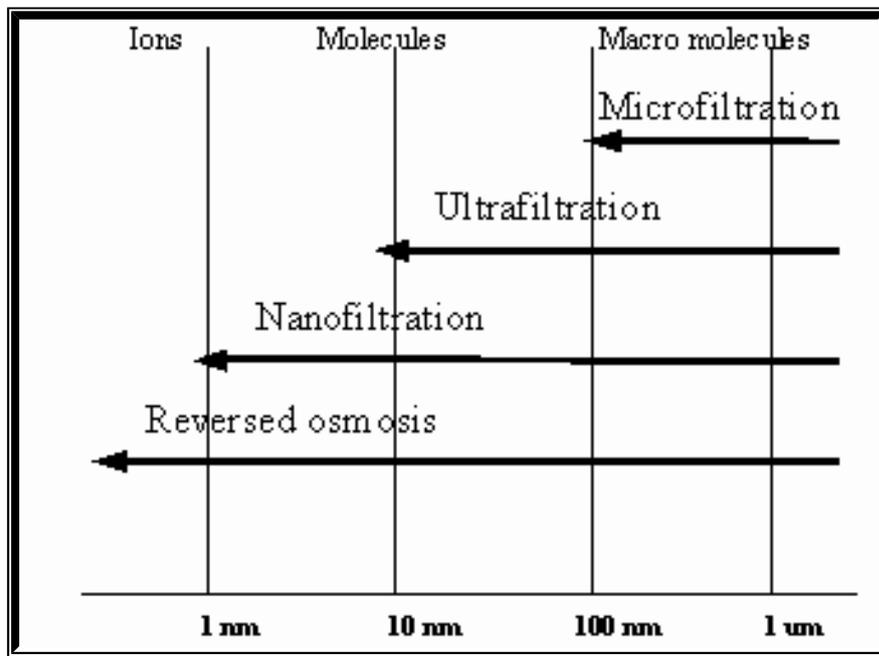
La filtración de membrana se puede dividir en micro y ultra filtración por una parte y en nanofiltración y ósmosis inversa (RO o hiperfiltración) por la otra.

Cuando la filtración de membrana se utiliza para retirar partículas más grandes, se aplican la microfiltración y la ultrafiltración. Debido al carácter abierto de las membranas su productividad es alta mientras que las diferencias de presión son bajas.



Cuando se necesita desalinizar el agua, se aplican la nanofiltración y la ósmosis inversa. La nanofiltración y las membranas de RO no actúan según el principio de porosidad; la separación

ocurre por difusión a través de la membrana. La presión requerida para realizar la nanofiltración y la ósmosis inversa es mucho más alta que la requerida para la micro y ultra filtración, mientras que la productividad es mucho más baja.



La filtración de membrana tiene bastantes ventajas frente a las técnicas existentes de purificación del agua:

Es un proceso que puede ocurrir a baja temperatura. Esto es principalmente importante porque permite el tratamiento de los materiales sensible al calor. Es por esto que se aplican ampliamente para la producción de alimento.

Es un proceso de bajo coste energético. La mayor parte de la energía requerida es la necesaria para bombear los líquidos a través de la membrana. La cantidad total de energía utilizada es mínima comparada con las técnicas alternativas, tales como evaporación.

El proceso puede ser fácilmente ampliado.

Mantenimiento de los procesos de los sistemas de filtración de membrana

Los sistemas de filtración de membrana pueden ser manejados tanto en flujo frontal como en flujo tangencial.

El propósito de la optimización de las técnicas de membrana es el logro de una producción lo más alta posible por un largo período de tiempo, con niveles aceptables de contaminación.

### Sistemas de membrana

La elección de un determinado tipo de sistema de membrana está determinada por un gran número de aspectos, tales como costes, riesgos de adaptación de las membranas, densidad de embalaje y oportunidades de limpieza. Las membranas nunca son aplicadas como una única placa plana, porque una gran superficie a menudo da lugar a altos costes de inversión. Es por esto que los sistemas son contruídos de forma muy compacta, de manera que se consigue una gran superficie de membrana en el mínimo volumen posible.

Las membranas se aplican en varios tipos de módulos. Hay dos tipos principales, llamados sistema tubular de membrana y sistema placa y marco de membrana. Los sistemas tubulares de membrana se dividen en membranas tubulares, capilares y de fibras huecas. Las membranas de placa y marco se dividen en membranas espirales y membranas almohadiformes.

### Obstrucción de la membrana

Durante los procesos de filtración de membrana la obstrucción de la membrana es inevitable, incluso con un pre-tratamiento suficiente. Los tipos y las cantidades de suciedad dependen de muchos factores diferentes, tales como la calidad del agua, tipo de membrana, material de la membrana y diseño y control de los procesos.

Partículas, bioobstrucción y “scaling” son los tres tipos principales de suciedad en una membrana. Estos contaminantes hacen que se requiera una mayor carga de trabajo, para poder garantizar una capacidad continua de las membranas. Llegará el punto en el que la presión aumentará tanto que ya no será rentable ni económica ni técnicamente.

### Limpieza de la membrana

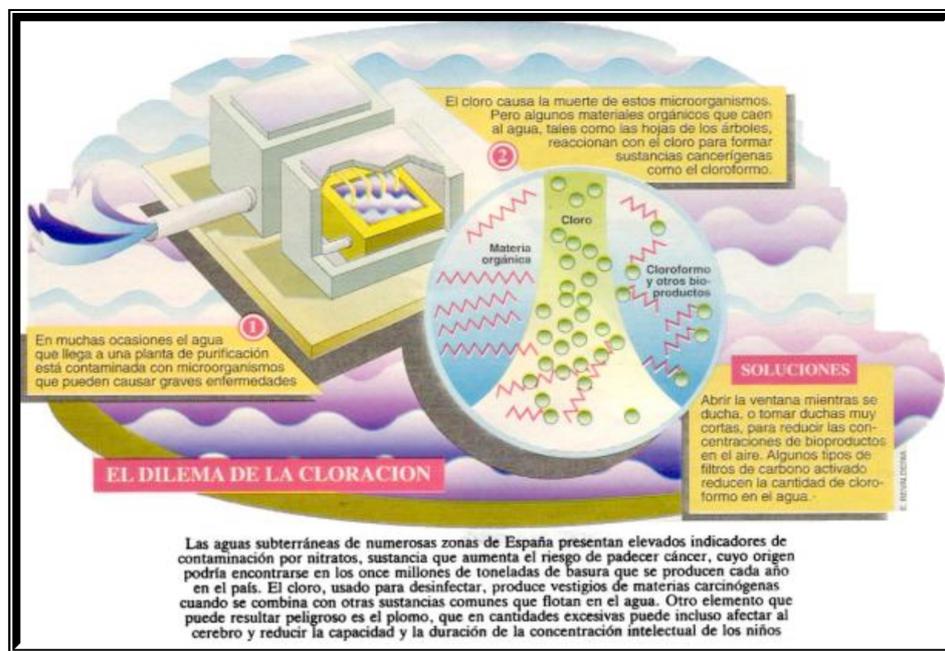
Existen unas cuantas técnicas de limpieza para la eliminación de la suciedad de membrana. Estas técnicas son de chorro delantero, lavado por chorro trasero, lavado por chorro de aire y limpieza química.

## 4. Desinfección

### 4.1 Introducción

En el momento actual, el público exige que las plantas de tratamiento hagan algo más que suministrar un agua limpia y libre de organismos patógenos. Desea un agua blanda, inodora, insípida, que no deteriore las cañerías o corroa los metales. Asimismo, la industria desea un agua que no perturbe sus procesos.

Recientemente, se ha incrementado la preocupación existente por la presencia de pequeñas cantidades de materia orgánica especialmente los hidrocarburos clorados, los cuales parecen ser los agentes causantes de un cierto número de enfermedades. Se sabe que estos contaminantes están presentes en las aguas de suministro, aunque se desconoce su efecto sobre la salud pública. La práctica normal de desinfección mediante el cloro contribuye a la producción de esos compuestos.



Durante décadas, la principal sustancia empleada como desinfectante en el tratamiento del agua potable, ha sido y sigue siendo el cloro, pero su empleo está siendo cada vez más cuestionado como consecuencia de los subproductos que origina al reaccionar con determinadas sustancias orgánicas presente en el agua, desarrollándose en los últimos 10 años, debates entre los partidarios del

empleo del cloro y los que están a favor de la eliminación de la cloración, es así que la propia Directiva, entre los requisitos obligatorios en cuanto a parámetros químicos, fija los siguientes valores, tomados en los grifos de los consumidores, para determinados subproductos de la desinfección: Trihalometanos totales, 150  $\mu\text{g/l}$  para el período comprendido entre el quinto y el décimo año de la entrada en vigor de la Directiva, es decir, entre el año 2.003 y 2.008 y a partir de los 10 años, se ha fijado un valor de 100  $\mu\text{g/l}$ ; para los bromatos, 25  $\mu\text{g/l}$  desde los 5 hasta los 10 años y 10  $\mu\text{g/l}$  a partir de los 10 años. Hasta ahora, no había establecido un nivel máximo.

En cuando a mantener una determinada concentración de desinfectante residual, no es tampoco requerido por todos los países, sólo España y Portugal requieren legalmente que se mantenga un desinfectante residual en el sistema de distribución. Alemania y Austria también tienen este requerimiento legal sólo si es necesario para conseguir los parámetros biológicos fijados. Los otros países no requieren la presencia de desinfectante residual como obligación legal, sino siguiendo determinadas guías o recomendaciones.

Por lo que respecta a los Estados Unidos, en 1.998 se establecieron unas directivas o reglas (Stage1 Desinfectant and Disinfection Byproducts Rule) que fijan unos niveles máximos de desinfectante residual para tres desinfectantes: cloro, cloramina y dióxido de cloro (4, 4 y 0,8  $\text{mg/l}$  respectivamente); igualmente fijan unos niveles máximos de contaminantes para los trihalometanos totales (80  $\mu\text{g/l}$ ), 5 ácidos haloacéticos (60  $\mu\text{g/l}$ ), clorito (1  $\text{mg/l}$ ) y bromatos (10  $\mu\text{g/l}$ ) y que deben cumplirse para el caso de grandes abastecimientos de agua superficial, a partir de Enero de 2.002 y para abastecimientos de agua subterránea y pequeños sistemas de superficie, a partir de Enero de 2.004. A la vez, las regulaciones de los Estados Unidos requieren que los sistemas de abastecimiento con agua superficial que suministran a más de 100.000 personas o sistemas, cuya fuente de agua es subterránea y suministren a más de 500.000 personas, deben monitorizar los controles de contaminantes microbiológicos y los subproductos de la desinfección, así como emplear filtros de carbón activo en instalaciones cuya agua bruta contenga más de 4  $\text{mg/l}$  de carbono orgánico total y sirvan a una población mayor de 50.000 personas. La Agencia de Protección de Medio Ambiente (EPA) estima que estas limitaciones e implantaciones van a suponer a los Estados Unidos un gran costo económico, pero en cualquier caso será superado por los beneficios sanitarios que redundarán en los consumidores, estimando que el 95% de los hogares norteamericanos incurrirán en un coste adicional mensual en la factura del agua de algo menos de un dólar a cambio de una regulación y reducción de los subproductos de la desinfección.

Volviendo al aspecto o al hecho de mantener un desinfectante residual en la red de distribución, también hay bastantes diferencias entre las prácticas seguidas en los Estados Unidos y en diversos países europeos. En la mayor parte de los abastecimiento de Estados Unidos se mantiene

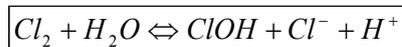
desinfectante residual (la USEPA recomienda un mínimo de 0,2 mg/l., después de 4 horas de contacto, de cloro residual), alegándose varias razones:

1) Reducir el recrecimiento de coliformes; 2) Controlar la formación del biofilm (que puede llegar a producir corrosiones y altos recuentos de organismos heterótrofos); 3) Proteger el agua de la red de contaminaciones y 4) Actuar como un indicador si la integridad del sistema se ha visto comprometida.

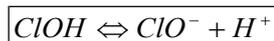
La OMS recomienda un mínimo de cloro residual de 0,5 mg/l después de un tiempo de contacto de 30 minutos, y para aguas con una turbidez menor de 1 NTU.

## 4.2. El cloro en el agua

La desinfección del agua consiste en la exterminación de las bacterias patógenas que pueda contener. En el proceso, se destruirán también los colibacilos y se reducirá considerablemente la cantidad de otras bacterias. Sin embargo, no se obtendrá ordinariamente la esterilización completa, aunque ni siquiera es necesaria. El cloro, en sus diversas formas, se emplea casi universalmente como agente desinfectante del agua. Es barato, seguro, y su manejo no presenta gran dificultad. El cloro y el agua reaccionan según la siguiente ecuación:

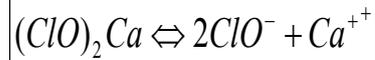
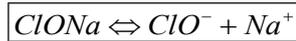


que está prácticamente desplazada a la derecha. El ácido hipocloroso, ClOH, se ioniza o se disocia en iones hidrógeno e hipoclorito en otra ecuación reversible.



El ácido hipocloroso y los iones hipoclorito son los que realizan la esterilización. El grado de ionización depende directamente del valor del pH del agua y la eficacia real de la desinfección depende de la proporción de ácido hipocloroso a iones hipoclorito, siendo tanto mayor cuanto mayor es esta proporción y, por lo tanto, esta eficacia se reduce a altos valores de pH. A valores de pH por debajo de 3,0 puede existir algo de cloro molecular. El cloro presente en el agua en forma de ácido hipocloroso, iones hipoclorito, y cloro molecular se define con la denominación de cloro libre disponible.

Los hipocloritos, tales como los cálcicos y sódicos, y la cal clorada, actúan de la misma manera. Por ejemplo, cuando se disuelve hipoclorito cálcico en agua, ioniza como sigue:



Los iones hipoclorito se combinan luego con los iones hidrógeno para formar ácido hipocloroso, en reacción inversa a la que se produce al disolver el cloro en el agua. Sin embargo, también aquí la relación de ácido hipocloroso a ión hipoclorito, depende del pH, y consiguientemente, la eficacia de la desinfección se ve también afectada por el valor del pH.

El cloro es un elemento muy activo y, al añadirlo al agua en forma de cloro libre, se combina con la materia orgánica e inorgánica y oxida compuestos. Reacciona con el amoníaco y con muchas aminas orgánicas para formar las cloraminas, las cuales, si bien son agentes oxidantes, son menos activas que el ácido hipocloroso y, por consiguiente, su eficacia desinfectante se ve considerablemente reducida. El cloro presente en el agua, en combinación química con el amoníaco y otros compuestos nitrogenados que modifican su actividad bactericida, se conoce con la denominación de cloro combinado disponible.

La demanda de cloro en el agua equivale a la diferencia entre la cantidad de cloro añadida y la cantidad de cloro presente como residual, sea libre o combinado, después de un período de tiempo determinado.

El cloro se emplea en el tratamiento del agua para la desinfección y para la prevención y destrucción de olores, para la eliminación del hierro, y del color. Si bien su empleo principal es para desinfección, el mecanismo de su acción bactericida es incierto. Se supone que el cloro destruye las enzimas extracelulares de las células bacterianas y, posiblemente, reacciona con las enzimas intracelulares. La actividad bactericida del cloro se ve reducida por los valores altos del pH y las bajas temperaturas del agua.

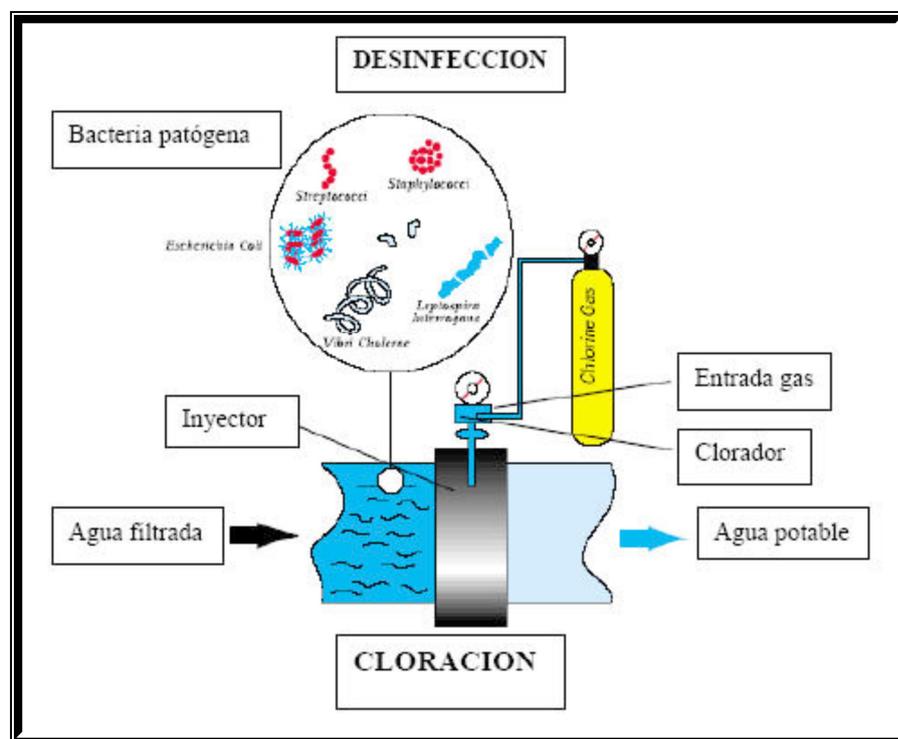
#### 4.2.1. Cloración

La cloración del agua se hace por los motivos anteriormente expuestos pudiéndose satisfacer simultáneamente las diversas necesidades. La cloración se puede considerar bajo dos aspectos; según el momento en que se añade dentro del proceso general del tratamiento o según los resultados finales.

Simple cloración. En algunas ciudades se emplean las aguas superficiales sin otro tratamiento que el de una simple cloración, aunque en algunas de ellas se da al agua un largo almacenamiento previo. En estos casos la cloración es muy importante, puesto que es la principal si no la única garantía

contra la infección. Estas aguas que no reciben otro tratamiento, contienen probablemente grandes cantidades de materia orgánica y requieren elevadas dosis y largos tiempos de contacto para la máxima seguridad. El cloro puede añadirse al agua en la conducción de salida del embalse hacia la ciudad. Con miras únicamente a la desinfección, puede precisarse una dosis de 0,5 mg/l para conseguir algo de residual combinado disponible en el sistema de distribución de la ciudad.

Precloración. Consiste en la aplicación del cloro antes de cualquier otro tratamiento y puede efectuarse su adición bien en las tuberías de aspiración de las bombas de agua cruda o en la cámara de mezcla, conforme el agua va entrando. La aplicación de la precloración tiene varias ventajas: Puede mejorar la coagulación y reducirá los gustos y olores originados por los fangos en los tanques de sedimentación; al reducir la cantidad de algas y de otros organismos puede conservar más limpia la arena de los filtros y aumentar así la duración de los ciclos de filtración. Las dosis de actividad eficaz dependen, naturalmente, del mantenimiento de un cierto residual a través de las distintas unidades de la instalación. Con frecuencia, esta dosis es tal que el agua llega a los filtros con una cantidad de cloro residual combinado de 0,1 a 0,5 mg/l. La combinación de la precloración con la poscloración puede ser aconsejable e incluso necesaria si el agua cruda está tan contaminada que la carga bacteriana en los filtros ha de reducirse con objeto de obtener en el efluente final unos títulos colibacilares o N. M. P. satisfactorios.



Poscloración. Esta expresión define generalmente la adición de cloro al agua, después de los tratamientos. Ha constituido un tratamiento normalizado en las instalaciones de filtros rápidos y, si se usa sin precloración y con residuales bajos, se denomina, a veces, cloración marginal.

El cloro puede añadirse en la aspiración de las bombas de agua tratada, pero es preferible adicionarlo a la salida de los filtros o en el depósito, de modo que se asegure un tiempo de contacto adecuado. Si sólo se practica la poscloración, este tiempo de contacto debe ser por lo menos de 30 minutos, antes de que el agua pueda llegar a ser consumida. La dosis depende del carácter del agua y puede ser de 0,25 a 0,5 mg/l para obtener un residual combinado de 0,1 a 0,2 mg/l conforme el agua sale de la instalación.

Probablemente se necesitarán residuales mayores, si se desea mantener un efecto desinfectante a través del sistema de distribución, y esto se considera aconsejable, puesto que proporciona una protección contra la contaminación procedente de conexiones extrañas y evita el desarrollo orgánico en las tuberías, con sus consiguientes olores.

En algunos casos se añade cloro en puntos estratégicos de las tuberías del sistema de distribución, con objeto de mantener en las mismas una cierta cantidad de cloro residual.

Este tiende a desaparecer en el interior de las tuberías, debido a la combinación del cloro o la cloramina con la materia orgánica viviente, con sus productos de descomposición, o con las propias conducciones.

Cloración al «break-point». Tal como se dijo anteriormente, cuando se añade cloro al agua se combina con las materias orgánicas e inorgánicas y parte de las combinaciones cloradas resultantes, tales como los clorofenoles, pueden presentar olor y son desagradables. Si se aumenta la dosis de cloro, el residual combinado aumentará también y posiblemente aumenten los olores a cloro.

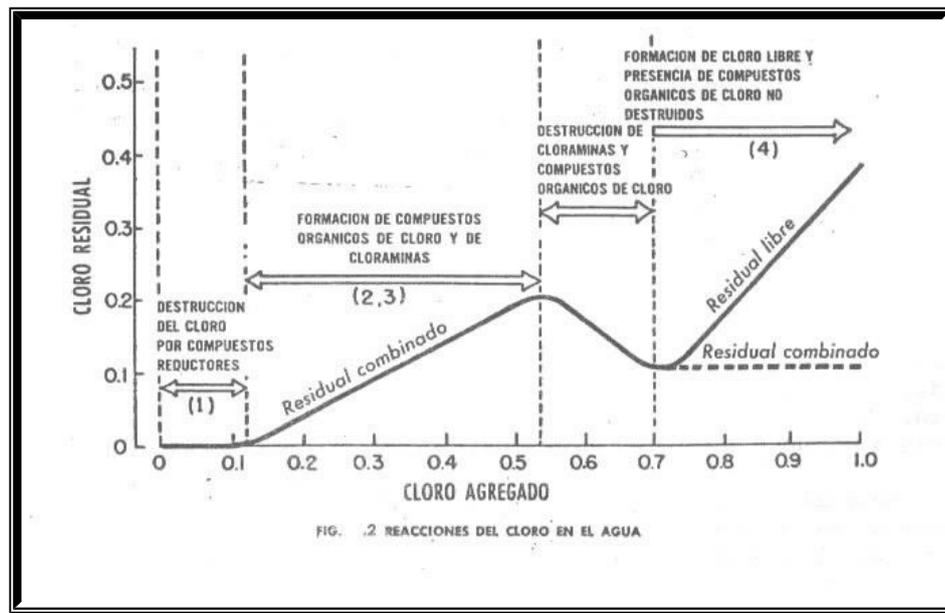
Esto continuará así, con la mayoría de las aguas, hasta que la cantidad de cloro residual presente una caída (inflexión) en una curva que represente gráficamente los valores residuales en función de las dosis de cloro aplicadas; posteriormente, al aumentar las dosis aumentan igualmente los residuales, y la dosis en que se produce esta caída constituye el «break-point» (punto de ruptura).

Aparentemente el «break-point» indica la oxidación completa de las cloraminas y otras combinaciones cloradas, y el cloro residual por encima de la dosis de «break-point» es en su mayoría cloro libre disponible.

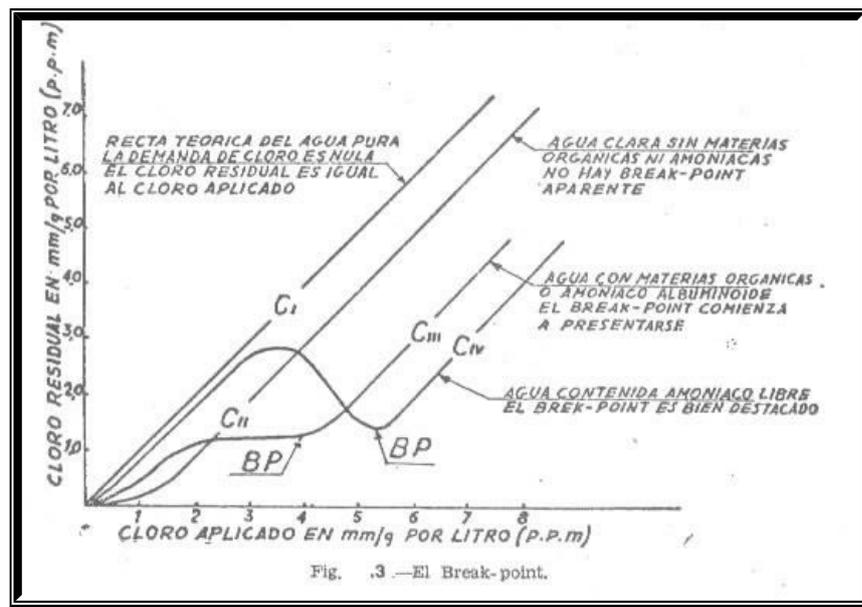
En general los olores a cloro y de otro origen desaparecerán a la dosis del «break-point» o poco antes. Las dosis habrán de ser probablemente de 7 a 10 mg/l para obtener un residual libre de

alrededor de 0,5 mg/l o más. Cuando se aplica el procedimiento del «break-point», el cloro, en general, aunque no siempre, se adiciona al agua en el momento en que entra en la planta de tratamiento.

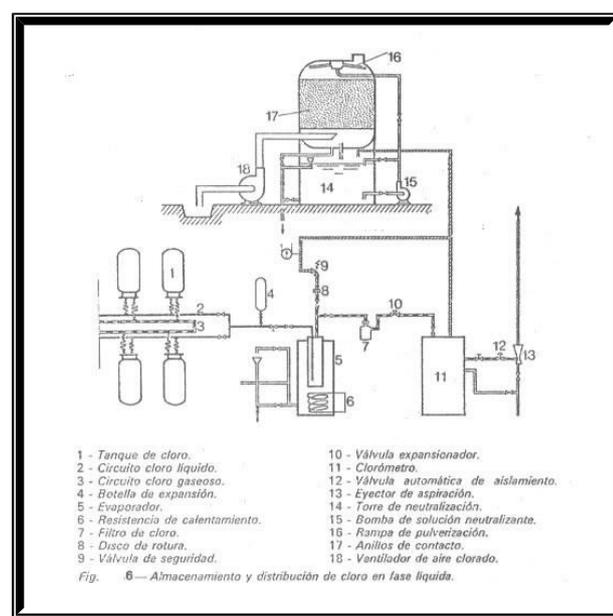
En algunos casos se ha añadido amoníaco a aguas que carecían del mismo, con objeto de conseguir una curva de «break-point» más pronunciada.



Cloración a residual libre y cloración a residual combinado. La mayor parte de la precloración y la poscloración se practican para obtener un residual combinado, aunque también puede hallarse presente algo de cloro libre. En general los residuales de cloro combinado, de acuerdo con los ensayos bacteriológicos, son adecuados. Para una mayor seguridad puede practicarse la cloración hasta obtener un residual libre añadiendo cloro suficiente para destruir el amoníaco, y de este modo el residual obtenido será un desinfectante muy eficaz. En el proceso seguido para obtener un cloro residual libre se eliminarán probablemente las materias que originan olor, y una vez satisfecha la demanda de cloro, se puede mantener un residual en el sistema de distribución, mientras el agua no se exponga a la acción de la luz solar. La única desventaja es el coste del cloro extra necesario, más que la posible formación de hidrocarburos halogenados adicionales.



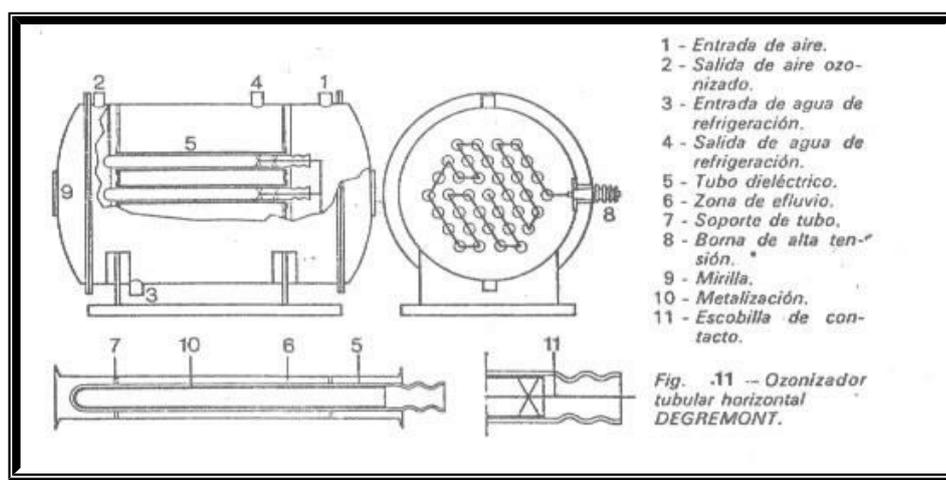
Declaración. La cloración a dosis elevadas puede producir residuales fuertes y desagradables, especialmente si se ha pretendido una acción desinfectante rápida o la destrucción de gustos y olores, pero no se ha efectuado al break-point. Este proceso se ha denominado supercloración y a ésta puede seguirle un proceso de dechloración. La aireación elimina el cloro, el ácido hipocloroso y la dicloramina al modificar el equilibrio de las reacciones de ionización. También pueden emplearse el anhídrido sulfuroso y el sulfito y bisulfito sódicos, y también es útil el carbón activo. Las muestras de agua clorada que se recogen para los ensayos bacteriológicos se dechloran con tiosulfato sódico.



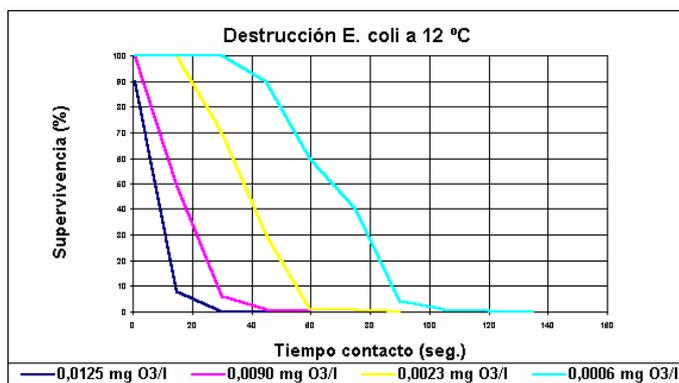
### 4.3. El ozono en el tratamiento del agua

El ozono fue descubierto en 1785 por Van Mauten y es en 1857 cuando Werner von Siemens diseña un generador de ozono. En 1893 se usó por primera vez para desinfección del agua en Holanda, y 1906 se aplica en una planta de tratamiento en Niza.

En los últimos 25 años, los mayores avances y desarrollos en este campo, han propiciado una importante mejora en los equipos productores y un mayor empleo en la desinfección del agua.



El ozono, forma alotrópica del oxígeno, es un oxidante muy energético, es utilizado como tal en la desinfección del agua, está comprobada su eficacia en oxidación de materias orgánicas e inorgánicas (entre éstas últimas destacan el hierro y manganeso). Su poder oxidante y desinfectante, mayor que el del cloro, le hace más eficaz que éste en la eliminación del olor, sabor y color del agua, así como en la eliminación de bacterias, virus y otros microorganismos. Su potencial de oxidación es 2,07 voltios, mientras el del cloro es 1,36 voltios.



La ozonización (algunos llaman ozonación) es una buena alternativa a la cloración, (principalmente en la preoxidación), cuando en el agua hay fenoles y otras sustancias orgánicas precursoras de

trihalometanos. Los fenoles por la adición de cloro forman clorofenoles de sabor y olor muy desagradables, aún en concentraciones tan pequeñas como 0,01 mg./l.

Los precursores de trihalometanos suelen ser sustancias orgánicas naturales como los ácidos húmicos, fúlvicos y tánicos, generalmente de procedencia vegetal, que a la vez comunican a las aguas superficiales una determinada coloración. Sobre estas sustancias orgánicas, con enlaces dobles entre átomos de carbono, actúa el ozono rompiéndolos y a medida que esto sucede, no solo el color va desapareciendo, sino que los propios precursores de los trihalometanos se van eliminando.

El ozono se forma de manera natural en los niveles altos de la atmósfera por la acción de las radiaciones UV procedentes del Sol, que produce la disociación iónica de la molécula de oxígeno y la reacción posterior de los iones formados con nuevas moléculas de oxígeno. A niveles más bajos de la atmósfera, se forma ozono gracias a la energía desarrollada por las descargas eléctricas en las tormentas, transformando el oxígeno en ozono.

También puede generarse ozono en el arco producido en el proceso de soldadura y cuando algunos componentes de los gases de escape de los automóviles e industrias, reaccionan con la luz del Sol. El ozono es 12,5 veces más soluble en agua que el oxígeno. La solubilidad del ozono en agua depende de la temperatura de ésta y de la concentración de ozono en la fase gaseosa. En el cuadro siguiente se reflejan datos de solubilidad.

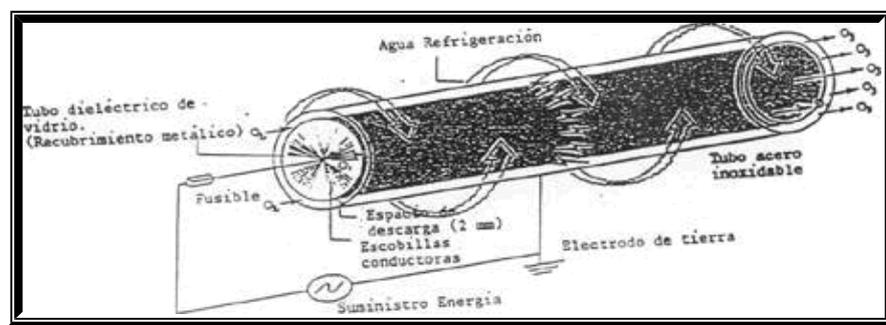
Concentración O <sub>3</sub>	5 °C	10°C	15°C	20 °C
1,5 %	11,10	9,75	8,40	6,43
2 %	14,80	13,00	11,20	8,57
3 %	22,18	19,50	16,80	12,86

Es muy inestable, motivo este que obliga a generarle “in situ”, en la propia planta de tratamiento de agua. Se descompone rápidamente, volviendo a originar oxígeno diatómico. La mitad de la vida del ozono en el aire es de unos 20 minutos en el agua es muy variable, dependiendo de diversos factores (temperatura, pH, sustancias presentes en el agua, etc.), puede variar de 1 minuto hasta 300 minutos. A igualdad de condiciones es más estable en agua que en el aire. Es 1,3 veces más denso que el aire

#### 4.3.1. Ozonizadores

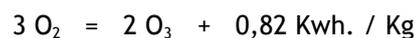
En la producción industrial de ozono puede partirse de aire u oxígeno puro. Cuando se utiliza aire, la concentración de ozono a la salida del ozonizador varía entre el 1 y el 4 por ciento y si se emplea oxígeno puro, la concentración suele oscilar entre el 4 y el 12 por ciento en peso. En cualquier caso, el ozono en su empleo industrial, ya sea partiendo del aire o del oxígeno puro, se obtiene por descarga eléctrica alterna de alta tensión y/o frecuencia, para evitar la formación de un arco eléctrico (descarga eléctrica silenciosa), entre dos electrodos separados por un medio dieléctrico, generalmente vidrio.

En los ozonizadores industriales, los dos electrodos son tubos concéntricos, el exterior de acero inoxidable y el interior un tubo de vidrio, que consta de una fina capa metálica depositada en la cara interna.



El ozonizador está integrado por múltiples conjuntos de estos pares de tubos concéntricos.

La reacción de formación del ozono es



Como alrededor del 80 al 90 por ciento de la energía se convierte en calor, el conjunto de electrodos conectados a tierra están refrigerados por agua .

Los generadores industriales de ozono se fabrican generalmente de dos tipos , el de tubos concéntricos y el de placas, las configuraciones pueden ser , vidrio-vidrio , o metal-vidrio.

La producción de ozono en estos equipos, está sujeta a una serie de parámetros interrelacionados, que influyen en gran medida en la eficaz generación o producción de ozono y que podrían reunirse en tres grupos :

- Parámetros del sistema : Fundamentalmente son, 1) longitud del sistema de descarga , 2) anchura del espacio de descarga y 3) configuración y espesor del dieléctrico.

- Parámetros del proceso : Estos quedan abarcados principalmente en la concentración y producción del ozono y el rendimiento o necesidades de energía específica.

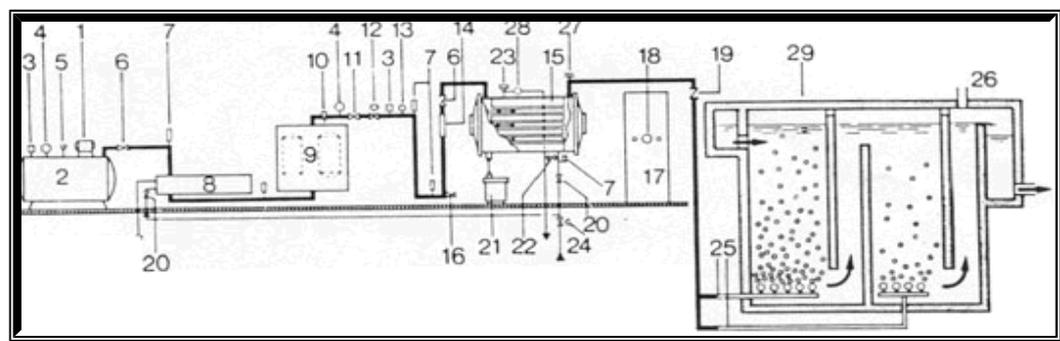
- Parámetros operacionales . Estos son más numerosos, los principales son: 1) tensión , 2) tipo de tensión , 3) frecuencia, 4) densidad de potencia, 5) presión de trabajo, 6) temperatura de trabajo, 7) velocidad de corriente del gas, 8) composición y humedad del gas empleado.

Partiendo de aire, este es suministrado al ozonizador a presión y exento de polvo y humedad, lo cual requiere compresores, filtros y otras unidades más complejas de secado de este aire.

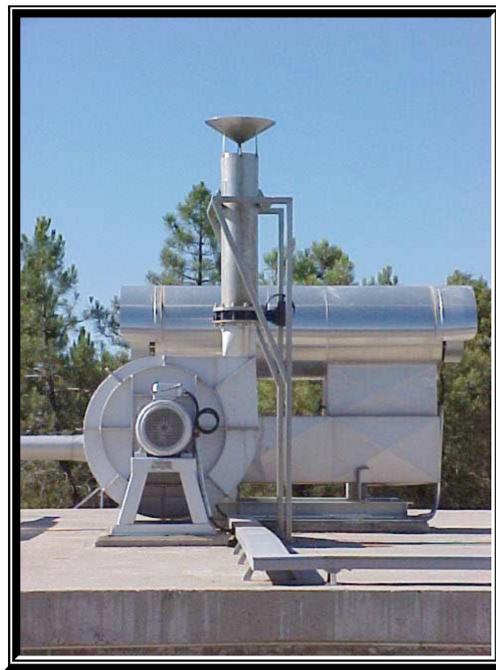
La mezcla de aire ozonizado, que es lo que realmente sale del ozonizador, se conduce hasta las cámaras de contacto, donde se encuentra el agua a tratar, obligándole a salir a través de difusores porosos, con objeto de que las burbujas de gas que se introducen en el agua sean muy finas, o bien mediante difusores de turbina.

A las cámaras de contacto de las dota de unos extractores en la parte superior, a fin de recoger el ozono residual que no se ha consumido en su contacto con el agua y dirigirle hacia un equipo de destrucción, generalmente térmica, transformándose en oxígeno.

Después de pasar por las cámaras de contacto, el agua debe contener aún una concentración próxima al 0.1 ppm.



Los equipos ozonizadores que parten de aire, suelen consumir del orden de 14 a 18 Kwh/kg.O<sub>3</sub>, dependiendo de las diversas instalaciones. Con los modernos recursos de la electrónica, se han llegado a conseguir unas tensiones de explotación de ozonizadores de 10 KV ( para frecuencias entre 600 y 1000 Hz. Partiendo de oxígeno se triplica la eficiencia en la producción de ozono por Kwh. La producción de 1 Kg de ozono, partiendo de oxígeno, supone un consumo de aproximadamente 7 Kwh.



Las variables operativas en la producción de ozono son, la energía aplicada, el caudal del gas de entrada, la temperatura y la eficiencia del propio generador.

#### 4.3.2. Ventajas y desventajas de la ozonización

La evaluación del ozono como desinfectante presenta pros y contras, en su comparación con el cloro destacan las siguientes ventajas: a ) Tiene mayor poder oxidante. b) No produce trihalometanos y elimina los precursores de estos. c) Requiere una concentración y tiempo de contacto menor ( 0,4 ppm durante 4 minutos es una concentración y tiempo de contacto eficaz para eliminar bacterias y virus). d ) No altera el pH del agua. e ) Mejora la coagulación. f ) Facilita la eliminación del hierro y manganeso y reduce en gran medida el olor, sabor y color del agua.

Como desventajas figuran: a ) Su mayor coste, tanto en los equipos como en los costos de operación (energía eléctrica) a pesar de las menores dosis empleadas. b) Puede formar otros subproductos perjudiciales, entre los que destacan los bromatos y aldehídos. c) No mantiene una concentración residual persistente, lo que obliga a emplear cloro o cloraminas en la desinfección final, si se desea mantener un desinfectante residual. d) Puede formar óxido nítrico ó ácido nítrico, que causaran corrosiones en los equipos.

Al ser el ozono un oxidante fuerte, puede producir trastornos en los tejidos humanos y particularmente en los ojos y pulmones. Hay establecidos unos límites para los ambientes de trabajo que se exponen a continuación.

Limite	Exposición
0,01 - 0,05 ppm	Olor detectable
1 ppm	8 minutos
3 ppm	15 minutos
0,1 ppm	8 minutos

#### 4.4. Otras técnicas de desinfección

Los otros halógenos, bromo y yodo, también son agentes germicidas efectivos. La química de estos compuestos es similar a la del cloro, aunque las constantes de ionización y, por tanto, el pH óptimo son diferentes. El ácido hipocloroso predomina a pH 7 o inferior, el hipobromoso a pH 8,7 o inferior, mientras que el hipoyodito se encuentra solamente a pH muy altos.

El yodo, al contrario que el bromo y cloro, no reacciona con el amoníaco o con compuestos orgánicos nitrogenados para formar aminas, por lo que persiste como ácido hipoyodoso y yodo molecular.

Es un desinfectante efectivo que se ha utilizado en piscinas, pero no es probable que sea empleado con profusión en el tratamiento del agua debido a los posibles efectos fisiológicos que pueda tener sobre la actividad de los tiroides y a su coste relativamente elevado.

Se ha estudiado la posibilidad de utilizar una mezcla de halógenos, la mono-cloramina y el yoduro, como técnica de desinfección. Esta combinación da lugar a una desinfección más rápida que empleando la cloramina sola, seguramente debido a la formación de ácido hipoyodoso a partir de la cloramina y el yoduro.

El sistema yodo-yodato es mejor desinfectante que las cloraminas a pH neutro. La combinación de ambos ha demostrado ser más efectiva que la cloramina o yoduro individualmente.

El bromo, aunque desinfectante efectivo, es más caro que el cloro y tiene alguna relación con la formación de hidrocarburos halogenados. Por estas razones y por la falta de experiencia en su uso, no se espera que el bromo sea normalmente utilizado como desinfectante.

El dióxido de cloro y el cloruro de bromo son compuestos halogenados que se han utilizado para la desinfección del agua y aguas residuales.

El cloruro de bromo se ioniza en HCl y ácido hipobromoso que se combina con el amoníaco para formar las bromoaminas. Aunque no se emplea en el tratamiento de agua sí lo ha sido con aguas residuales. El dióxido de cloro es especialmente útil para la eliminación de olores así como para desinfección.

Se obtiene por la cloración de clorito sódico a razón de un mol de cloro por cada dos moles de clorito. El compuesto resultante,  $ClO_2$ , no reacciona con el amoníaco, no se ve afectado por el pH dentro del intervalo normalmente encontrado en el agua y es un poderoso agente oxidante y germicida. Al igual que el ozono, exige su generación en el punto de utilización y parece ser capaz de oxidar compuestos orgánicos sin formar hidrocarburos halogenados.

Debido a un mecanismo de bloqueo de zonas activas antes de que puedan producirse las sustituciones de halógenos. Por el contrario que el ozono, a temperaturas normales es relativamente persistente por lo que puede procurar protección residual.

Los rayos ultravioleta son efectivos en la destrucción de todo tipo de bacterias y virus. Parece ser que el mecanismo que tiene lugar es la destrucción de los ácidos nucleicos por medio de los rayos generados en lámparas de vapor de mercurio- cuarzo. La longitud de onda de la luz debe ser de 253,7 nm y la intensidad 50 W/m<sup>2</sup> a una distancia de 50 mm. Los tiempos de retención mínimos son del orden de 15 segundos para espesores de agua inferiores de 120 mm.

Las ventajas de la desinfección con rayos ultravioletas incluyen la automatización del proceso, no tener que manejar producto químico alguno, corto tiempo de contacto, ausencia de efectos sobre las características químicas y sabor del agua, bajo rendimiento y ausencia de efectos perjudiciales en caso de dosis excesivas. Las desventajas estriban, fundamentalmente, en la falta de protección residual, coste relativamente alto y la necesidad de que el agua tenga una turbiedad baja para asegurar la penetración de los rayos. Este proceso se usa, principalmente, en aplicaciones industriales y en pequeños abastecimientos privados. La eficiencia de producción de rayos ultravioleta con lámparas modernas es del orden del 30 %.

Los valores extremos del pH, tanto altos como bajos, pueden dar lugar a una destrucción importante de las bacterias. La precipitación del magnesio (asociado con pH de 11) puede producir reducciones de coliformes superiores al 99,9 %. Los ácidos minerales pueden conseguir reducciones similares pero, al igual que ocurre con la cal, no se añaden al agua para desinfectarla. La reducción bacteriana que se obtiene por variación del pH es un resultado accidental al propósito que se trata de conseguir en ciertos procesos.

El calor puede ser utilizado como desinfectante, pero el método no es práctico a gran escala. La pasteurización a caudal continuo ha sido empleada con éxito en algunos sistemas de pequeño tamaño, pero su coste es muy elevado y no proporciona protección residual.

Los ultrasonidos a frecuencias de 20 a 400 kHz son capaces de esterilizar completamente el agua con períodos de retención de 60 minutos y conseguir porcentajes elevados de reducción para períodos tan cortos como 2 minutos. Los costes han resultado excesivos, aunque la combinación de la aplicación de ultrasonidos de corta duración y rayos ultravioleta puede ser atractiva desde el punto de vista económico.

Los iones metálicos como la plata, cobre, mercurio, tienen poder desinfectante. La plata es efectiva a concentraciones inferiores a aquellas que son perjudiciales para la salud humana (0,05 mg/l). Las ventajas del empleo de la plata incluyen la baja dosis necesaria, su facilidad de aplicación y la protección residual. Las desventajas son la posibilidad de absorción de plata en materias coloidales, de inhibición o precipitación por otros productos químicos, reducción de su eficiencia con la temperatura y su coste relativamente elevado.

Los compuestos cuaternarios de amoníaco son potentes desinfectantes pero no son aceptables para aguas potables debido a su coste, posibles efectos tóxicos y su sabor desagradable.

Otros agentes oxidantes, tales como el permanganato potásico, que se utilizan para la eliminación del manganeso o para el control de olores y sabores, tienen también poder germicida, pero son muy raramente empleados como agentes desinfectantes principales.

#### 4.5. Subproductos de la desinfección

El nombre de subproductos de la desinfección parece implicar que son inherentes a cualquier proceso de desinfección, cuando realmente subproductos tóxicos pueden originarse cuando se emplea un oxidante fuerte aunque no se emplee por motivos de desinfección.

Algún autor (R.Trusell) ha llegado a proponer que se usara el término de subproductos de la oxidación.

El cloro ha sido el principal desinfectante de los abastecimientos de agua desde hace prácticamente un siglo.

Su empleo nunca fue discutido y los beneficios derivados de su empleo han sido evidentes, atajando y eliminando las grandes epidemias y brotes de enfermedades hídricas, hasta que en 1.974, algunos investigadores como Rook en Holanda y Bellar en Estados Unidos, valiéndose de la cromatografía de

gases y el espectrómetro de masas, pusieron en evidencia que el cloro reacciona con ciertas sustancias orgánicas conocidas como precursores, que se encuentran en algunas aguas y producen unas sustancias potencialmente carcinógenas, los trihalometanos, (THM), especialmente el cloroformo.

En 1.975 en Estados Unidos, la USEPA tomó cartas en el asunto y se examinaron diversas aguas tratadas de cinco grandes ciudades, determinando todos los compuestos volátiles posibles, identificando 72 compuestos y el 53% de ellos contenían uno o más halógenos.

Posteriormente, se hizo un estudio más extenso, abarcando a 113 ciudades. A finales de 1.976, la EPA publicó una lista con 1259 compuestos que se habían identificado en diversas aguas naturales y residuales, tanto en Estados Unidos como en Europa.

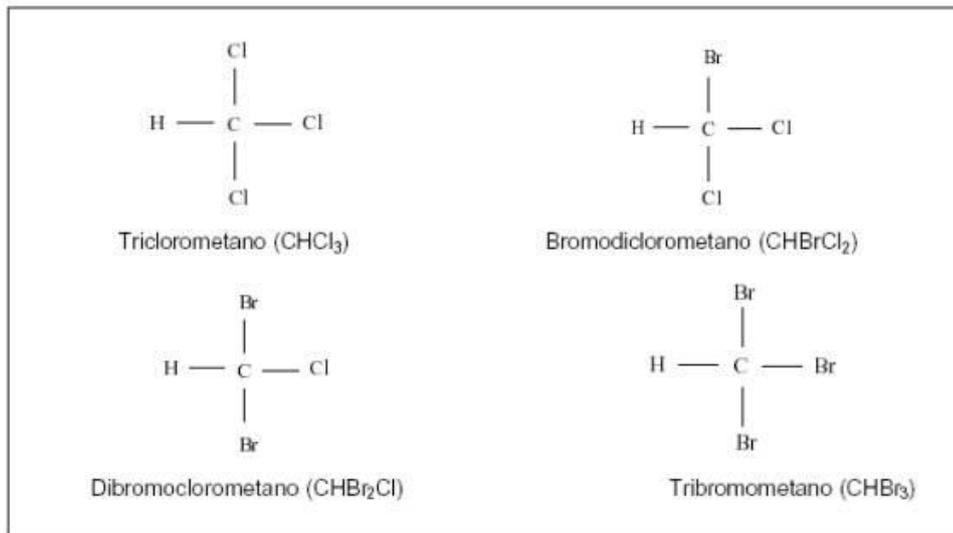
Este estudio concluyó que todos los sistemas de abastecimiento que utilizaban cloro libre en su tratamiento, contenían al menos 4 THMs en su agua tratada, cloroformo, bromodichlorometano, dibromodichlorometano y bromoformo.

Esquemáticamente, la formación de subproductos de la desinfección ( DBP, en inglés) es la siguiente:

Desinfectante u oxidante + Precursores (Materia orgánica natural + Bromuros)  $\Rightarrow$  Subproductos de la desinfección.

La clase y cantidad de subproductos depende de varios factores como son el tipo de desinfectante u oxidante empleado, cantidad y naturaleza de los precursores presentes en el agua, tiempo de contacto, dosis aplicada, temperatura, pH y concentración de bromuro presente.

Respecto a éste último, que está presente en algunas aguas en concentraciones desde menos de 0,1 mg/l., hasta sobrepasar 1,0 mg/l., puede alterar de forma importante la concentración de subproductos (THM) bromados, a los que se le atribuye mayores efectos cancerígenos que a sus análogos enteramente clorados.



Puesto que el cloro es el agente desinfectante más utilizado, los derivados orgánicos clorados que se generan en la cloración de aguas, principalmente superficiales, han sido los más estudiados. La materia orgánica precursora de los subproductos de la cloración, son esencialmente los ácidos fúlvicos, ácidos húmicos, aminoácidos y nitrofenoles, que dan lugar a diferentes subproductos como los trihalometanos, ácidos haloacéticos, haloacetónitrilos, cloropicrina, clorofenoles.

La dosis de cloro aplicada a un agua que contenga precursores de trihalometanos, así como el tiempo de contacto, es de suma importancia en la cantidad de subproductos formados. En el siguiente gráfico se observa la formación del principal y más elemental de estos subproductos, el cloroformo, en función del cloro aplicado y tiempo de contacto, en una determinada agua

Otra sustancia utilizada en la desinfección, como es el ozono y que puede eliminar la materia orgánica precursora de los trihalometanos, puede a su vez generar subproductos de oxidación no halogenados, como son aldehídos, cetonas, ácidos carboxílicos y bromatos.

El empleo de ozono en la fase final del tratamiento, puede dar lugar a la aparición de otros problemas, ya que es bastante habitual que, a pesar de las diversas etapas preliminares del tratamiento del agua, aún queden compuestos orgánicos capaces de ser transformados por la oxidación del ozono en compuestos biodegradables, carbono orgánico disuelto biodegradable, que es un nutriente que favorece el crecimiento bacteriano en la red, lo cual podría inducir a necesitar una mayor cantidad de cloro, con el consiguiente riesgo de producir más subproductos y aumentar los sabores desagradables. Para evitar o remediar este hecho, si se emplea ozono en la posdesinfección, es aconsejable el empleo conjunto de carbón activo que actuaría como un reactor biológico, eliminando el carbono orgánico disuelto biodegradable.

Otro desinfectante empleado en el tratamiento del agua es el dióxido de cloro, que no forma los subproductos halogenados referidos, pero puede llegar a formar compuestos clorados orgánicos no volátiles. Pueden generar clorito y clorato, ambos perjudiciales para la salud por los efectos hematológicos que producen. La formación de cloritos al emplear dióxido de cloro, se correlaciona con la materia orgánica que contenga el agua.

La combinación de los diversos productos empleados en la desinfección, en las distintas fases de esta, genera a su vez distintos subproductos, que de una forma resumida se presentan en el siguiente cuadro:

Estos subproductos los ha presentado la OMS como la concentración en el agua de bebida asociada a un riesgo de cáncer de  $10^{-5}$ , es decir, un caso adicional de cáncer por 100.000 personas que consumen el agua con la concentración guía del subproducto en 70 años. La UE considera un riesgo de  $10^{-6}$  en lugar del  $10^{-5}$  propuesto por la OMS.

La Directiva Europea, 98/83, RD 140/2003, de 3 de Noviembre de 1998, fija un valor paramétrico para el total de trihalometanos de 100 mg/l, si bien para el período comprendido entre el quinto y décimo año, (1 de Enero de 2008), a partir de la entrada en vigor, el valor paramétrico será de 150 mg/l, indicando igualmente que los Estados miembros deberán procurar obtener un valor más bajo, cuando sea posible, sin afectar a la desinfección.

La correcta desinfección no puede abandonarse ni dejarse en segundo término ante un problema derivado de los subproductos de la desinfección, como la propia OMS establece que los criterios microbiológicos deben tener siempre preferencia y siempre que se pueda la concentración de subproductos deberá reducirse actuando sobre el proceso global de tratamiento.

Se considera que los efectos sobre la salud derivados de la polución de las aguas destinadas al consumo humano, pueden clasificarse en tres categorías:

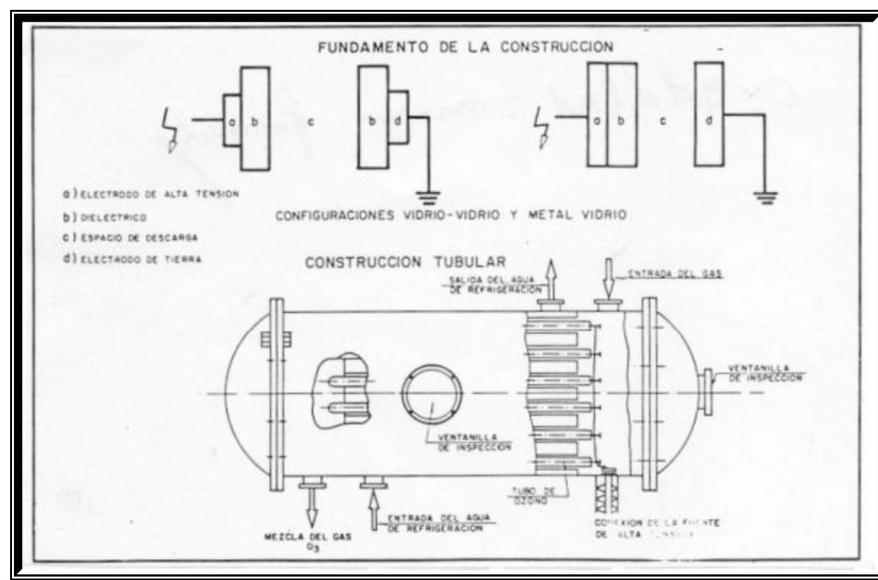
- Riesgo a corto plazo, que a veces puede deberse al consumo de un sólo vaso de agua, este riesgo es principalmente de orden microbiológico.
- Riesgo a medio plazo, que requiere el consumo de agua durante semanas o meses, es el caso de un agua con elevado contenido en nitritos, nitratos, flúor, etc.
- Riesgo a largo plazo que requeriría el consumo de agua durante toda una vida, sería el caso de la mayor parte de los productos cancerígenos.

La garantía microbiológica del agua (riesgo a corto plazo) es el primero y el más importante de los compromisos de los suministradores del agua.

En ningún caso se debería aceptar la reducción de un riesgo a largo plazo frente a un riesgo a corto plazo. Si bien es necesario tomar muy seriamente los problemas derivados de los subproductos de la desinfección, la correlación entre estos subproductos y ciertos riesgos para la salud hay que tomarla con prudencia, ya que intervienen otros muchos factores y a veces el hecho de que el agua tenga un elevado contenido en subproductos es una prueba de un mal tratamiento global del agua.

Una eficaz coagulación-floculación, filtración y un replanteamiento del punto de aplicación del desinfectante, puede rebajar estos contenidos elevados. No es imprescindible por tanto, suprimir el cloro como desinfectante, sino someter el agua antes de la cloración al tratamiento más adecuado.

En relación con los subproductos de la cloración debe quedar suficientemente claro que estos subproductos no sólo son imputables al cloro sino a la presencia en el agua objeto de la desinfección de determinadas materias orgánicas (precursores), lo cual nos llevaría a considerar que junto a la alternativa de sustitución del cloro como oxidante/desinfectante primario, se debería también tratar de eliminar estas sustancias orgánicas en el proceso de tratamiento antes, a ser posible de su contacto con el cloro, o bien si han llegado a formarse, utilizar algún proceso que los elimine.



La formación de los subproductos de la cloración, en concreto los trihalometanos y ácidos haloacéticos, tiene lugar en una primera fase relativamente rápida y otra posterior más lenta, en todo caso la reacción se completa a un 75-80% después de 24 horas de contacto y sigue más

lentamente durante los 4 ó 5 días siguientes. Las reacciones pueden, pues, considerarse que son lentas.

Considerando que la cinética de la desinfección por medio de cloro es más rápida que la formación de los subproductos, podemos aprovechar esta circunstancia para una vez conseguida la desinfección con una precloración, eliminar o estabilizar el efecto subsiguiente del cloro libre ya sea mediante una decloración o mejor aún, formando cloraminas.

Las sustancias húmicas precursoras de la formación de los THM ( suelen constituir el 50% de la Materia Orgánica Natural, MON), se originan principalmente por la degradación de sustancias vegetales, por arrastres de sustancias del suelo y por los propios procesos biológicos de las algas presentes en el agua, son compuestos de anillo aromático que son rotos cuando el cloro actúa sobre ellos formándose finalmente compuestos con uno o dos átomos de carbono (haloformos y a veces haloetanos).

En general, la formación de THMs se ve favorecida con el aumento de los precursores, aumento del pH, aumento de la temperatura, aumento de la dosis de cloro y aumento del tiempo de contacto del cloro con el agua.

Si los subproductos de la desinfección ya se han formado, se pueden reducir o eliminar algunos, mediante stripping con aire y adsorción con carbón activo en grano.

Habría que tener en cuenta que los subproductos de desinfección pueden volver a formarse en la red de distribución, si se emplea cloro como desinfectante residual y por otra parte, también habría que considerar que cuando se regenera el carbón activo granular por el que ha pasado agua clorada se pueden producir dioxinas y además la capacidad de adsorción del carbón activo se agota rápidamente cuando se adsorben THMs, es por tanto mejor emplear el carbón activo para eliminar los precursores de THMs que para eliminar los THMs formados.

De lo anteriormente expuesto, se desprende la necesidad de revisar la práctica de la cloración, de manera que se reduzca la formación de estos compuestos orgánicos clorados, actuando en varias direcciones, salvaguardando siempre la calidad del agua.

En primer lugar, lo aconsejable sería que no llegaran a formarse los haloformos, pues una vez formados es difícil su eliminación con las operaciones convencionales que tienen lugar en el proceso de tratamiento del agua, siendo la aireación la técnica que elimina en mayor medida estos THMs.

Los precursores se reducen dentro del proceso de tratamiento en las fases de coagulación-floculación y filtración y con el empleo de carbón activo.

Señalamos algunas de las actuaciones que se pueden seguir para reducir la formación de estas sustancias:

- Ajustar durante la cloración el valor del pH, próximo a 7 y no a pH más altos.
- Cambiar el punto de cloración dentro del proceso, con objeto de eliminar la mayor parte de los precursores antes de entrar en contacto con el cloro, es decir, proceder a una coagulación-floculación y sedimentación parcial antes de la precloración.
- Ajustar la dosis de cloro y el tiempo de contacto, de forma que atendiendo a las necesidades bactericidas del agua, y después de haber reaccionado el cloro preciso con el amonio (velocidad de reacción rápida), no sobre cloro, que llegaría a formar THMs.
- Finalmente, como actuación para disminuir o evitar la formación de THMs, debería no emplearse cloro en la desinfección. En este sentido cabe destacar el empleo de dióxido de cloro, ozono y cloraminas , que no generan THMs. En cualquier caso hay que tener presente que en la desinfección del agua no solo se generan THMs como subproductos de la desinfección , sino que existen otros muchos compuestos o subproductos generados en la desinfección , tanto al emplear cloro ,como al utilizar otros de los desinfectantes mencionados.

La reducción de los niveles de cloro aplicados en la desinfección del agua, es un hecho en diversas ciudades de Europa (Holanda, Alemania, Dinamarca) a veces por las presiones de los propios consumidores, debido al sabor provocado por el cloro como por los nuevos valores para los THM. En bastantes sistemas esto se conseguirá a muy alto costo y esfuerzo, principalmente en aguas de superficie y extensas redes de distribución y no deberá olvidarse lo ya indicado al comienzo del artículo en cuanto a que el riesgo que conllevan los subproductos de la cloración es muy débil ante el riesgo que comporta un agua no desinfectada.



## 5. PLANTAS DE TRATAMIENTO DE AGUA POTABLE

### 5.1. Introducción.

Una planta de tratamiento de aguas potables es el conjunto de instalaciones, destinadas a mejorar la calidad del agua, que se localizan en un espacio físico relativamente reducido. Frecuentemente, la totalidad de los tratamientos que se efectúan sobre el agua de un abastecimiento se realizan en la planta de tratamiento. Sin embargo, en ocasiones, se realizan otros tratamientos fuera de la planta, ya sea en la captación (desbaste grueso o fino, desarenado, predecantación, rechloración), e incluso en la red de distribución (rechloración).

Así pues una planta de tratamiento es una instalación a la que llega una materia prima: agua bruta (o semielaborada) que, en términos generales, será un agua impotable y sale un producto elaborado: agua potable. Puede considerarse entonces como una auténtica “fábrica de agua potable”.

### 5.2. Características de una planta de tratamiento de agua potable.

Las características de una planta de tratamiento de agua potable dependen de dos factores básicos: la calidad del agua bruta y el caudal a tratar.

La calidad del agua bruta es una variable que depende del tiempo. Es de esperar que, a lo largo de la vida de la planta, se producirán variaciones importantes en la calidad del agua bruta, presentándose las denominadas “puntas de contaminación” de forma estacional, con las lluvias, estiaje, etc. o aleatoria (accidentes). Una planta de tratamiento de aguas potables debe estar preparada para hacer frente a las puntas de contaminación hasta un cierto límite: aquellas que sean tales que cualquier punta superior (referida a las posibilidades de la planta) tenga una duración y frecuencia previsibles tales que pueda admitirse la parada en el suministro de la instalación durante 4 horas. Esta parada puede admitirse bien por disponerse de la capacidad de almacenamiento suficiente (bien sea de agua bruta o tratada) para hacer frente a la duración previsible de la contaminación, o bien por ser esta tan poco probable que resulta antieconómico construir la instalación para hacerla frente.

Así pues, definida la contaminación límite, desglosada en sus componentes o sustancias contaminantes, puede establecerse el conjunto de tratamientos que van a tener como misión transformar el agua de tal composición, en potable. Sin embargo, estos tratamientos deben ser lo suficientemente flexibles como para adaptarse a las previsible variaciones de calidad en origen,

entre los límites establecidos. A este respecto suele preverse la posibilidad de anular ciertos tratamientos, mediante los by-pass necesarios.

El caudal a tratar es otra variable temporal, es decir que depende del tiempo. La variación de la demanda a lo largo de los días, semanas, meses y años. El caudal punta a considerar en una planta de tratamiento será función, para un esquema de demanda dado, de la capacidad de almacenamiento (es decir, de regulación) del abastecimiento. Así, como es frecuente, el almacenamiento está previsto para regular el día máximo, debe preverse que por la planta de tratamiento habrá de pasar en algún momento, el caudal medio del día de máximo consumo. Sin embargo, en una planta de tratamiento pueden distinguirse:

- La capacidad de tratamiento, como el máximo caudal que puede atravesar la planta, en condiciones límite de contaminación, y quedar tratado de forma eficaz y completa.
- La capacidad hidráulica, como el máximo caudal que, por condicionantes hidráulicos, tanto de la planta como de las conducciones, puede atravesar la planta.

Habitualmente, la capacidad hidráulica de una planta de tratamiento suele ser de un 20 a un 50% mayor que su capacidad de tratamiento. Obviamente, si en un momento dado, la planta trabajase en su capacidad hidráulica y con la contaminación límite, el agua quedaría deficientemente tratada. Sin embargo, en otras ocasiones, la planta puede superar su capacidad de tratamiento (si la calidad del agua bruta es superior a las condiciones límite) y quedar el agua perfectamente tratada.

Así pues, según las características del agua a tratar, podrá ajustarse el caudal máximo previsto con la capacidad de tratamiento (en cuyo caso, la capacidad hidráulica será un factor de seguridad), con la capacidad hidráulica (si es poco probable que se presenten simultáneamente las puntas de contaminación y demanda) o con un valor intermedio entre ambas.

Nuevamente, en este caso, la planta deberá ser lo suficientemente flexible como para permitir estas variaciones de caudal sin perjuicio para el tratamiento general, y de forma que pueda minimizarse los gastos de explotación.

### **5.3. Plantas de tratamiento para pequeñas comunidades.**

Las pequeñas comunidades (que para fijar un orden de ideas pueden definirse como aquellas cuya población es inferior a 5.000 o incluso hasta 10.000 hab.) tienen una problemática muy específica, en cuanto a tratamiento de aguas potables se refiere.

Entre las características que, habitualmente, tienen los abastecimientos de agua a una pequeña comunidad, merecen destacarse:

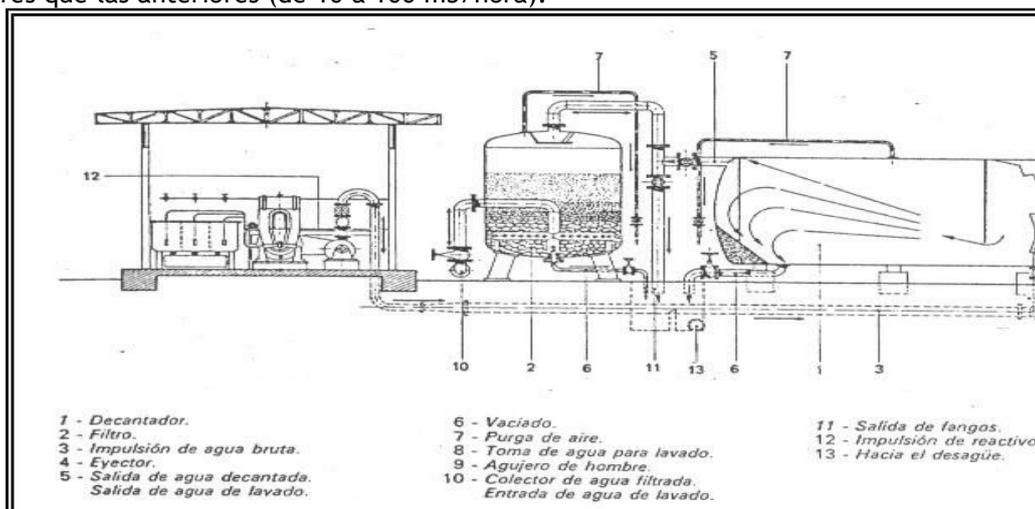
-Relativamente buena calidad del agua en origen, debida a sus pequeñas necesidades, que permiten un abanico más amplio soluciones y una mayor variedad de recursos utilizables. Esto permite, realmente, desechar las aguas de peor calidad. Por otra parte, la calidad del agua captada permite, en ocasiones, poner esta en la distribución con una simple cloración.

-Escasa capacidad económica para su explotación, propia de los pequeños municipios, esto obliga, en general a la búsqueda de soluciones que requieran pocos gastos de explotación (energía, reactivos, etc.) y escasa mano de obra. En muchas circunstancias, es preferible encarecer el abastecimiento transportando el agua desde una distancia mayor, que complicar los tratamientos, cuya atención y vigilancia durante el periodo de explotación, pueden ser, en algunos casos, muy dudosamente eficaces.

Por estas razones, las plantas de tratamiento destinadas a resolver las necesidades en comunidades pequeñas deben ser compactas y muy automatizadas (con mecanismos sencillos que no encarezcan su coste), de fácil transporte, montaje y puesta en servicio. Pueden clasificarse en:

- Plantas que funcionan a Presión en todos sus elementos y que generalmente se emplean para las gamas más pequeñas de caudales (de 1,5 a 30 m<sup>3</sup>/hora).

- Plantas que funcionan, total o parcialmente, a lámina libre que suelen emplearse para caudales mayores que las anteriores (de 10 a 100 m<sup>3</sup>/hora).



## 5.4. Plantas de tratamiento medianas y grandes.

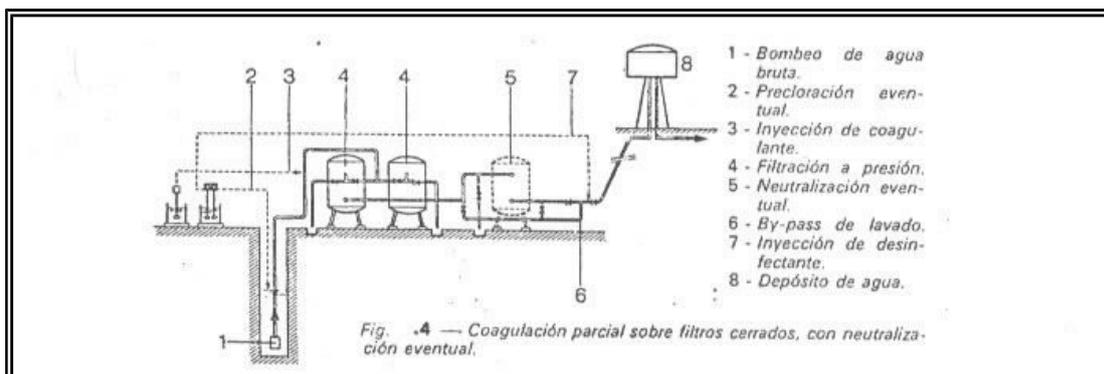
Las plantas de tratamiento de aguas potables medianas y grandes se caracterizan en general por una diferenciación clara de las zonas de almacenamiento, manipulación y dosificación de reactivos y por una automatización elevada en su funcionamiento.

Las distintas concepciones del almacenamiento y manipulación de reactivos están condicionadas por la importancia del caudal a tratar y por las reservas que deben preverse. En general, suelen realizarse en edificios especialmente diseñados para esta misión, en el que se incluyen todas las operaciones necesarias.

El automatismo de los órganos de mando está relacionado esencialmente con el tamaño de las válvulas que deben accionarse, el personal de que se pueda disponer y la complejidad de la instalación, entre otros. Frecuentemente, los órganos de mando se centralizan en la denominada “sala de mandos y control” lugar en donde se centraliza toda la información automatizada en un panel sinóptico dotado de señales ópticas, acústicas y digitales y desde donde pueden accionarse todos (o al menos la mayor parte) de los dispositivos de la planta.

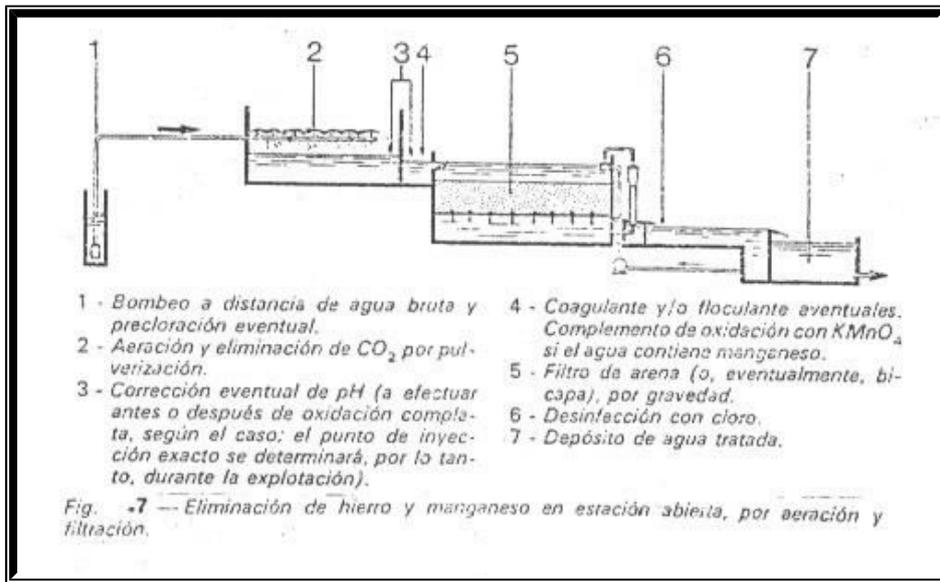
Las plantas de tratamiento de aguas potables de tamaño mediano y grande están muy influenciadas, en su concepción, por las características físico-químico-bacteriológicas del agua a tratar y por la calidad deseada para el agua tratada.

Para su estudio, las plantas de tratamiento medianas y grandes se subdividirán, atendiendo a las características del agua, en los siguientes casos:



La Figura representa una instalación típica, en lámina libre, destinada al tratamiento de aguas superficiales poco contaminadas o de embalse. Consta de una precloración, una coagulación sobre filtro, corrección del pH, cloración y neutralización del exceso de cloro. Eventualmente puede añadirse cal y amoníaco.

Para pequeñas cantidades de hierro y manganeso se utiliza con frecuencia el esquema presentado en la figura 7 a base de pulverización, coagulación sobre filtro, con oxidación eventual por permanganato potásico y desinfección.



## 5.5. Acondicionamiento

El acondicionamiento en el proceso de tratamiento, comprende las acciones que se llevan a cabo sobre el agua ya filtrada, que modifican determinados parámetros de calidad, fundamentalmente comprende el ajuste de pH, la fluoración y remineralización (en escasas instalaciones) y también puede considerarse como acondicionamiento, la cloración final o desinfección, ya sea con cloro, cloraminas u ozono.

En cuanto a la modificación del pH, generalmente implica una elevación de éste, ya que tanto el sulfato de alúmina empleado como coagulante como el cloro, disminuyen el pH, especialmente en aguas de baja salinidad, y por otra parte, algunas aguas contienen carbónico disuelto en exceso sobre el necesario para el equilibrio carbonatos  $\leftrightarrow$  bicarbonatos, que requieren su eliminación, empleándose, tanto para eliminar este  $\text{CO}_2$ , como para la elevación del pH algún reactivo alcalino, siendo el más empleado, una lechada de hidróxido cálcico, esta operación puede considerarse como una verdadera remineralización.

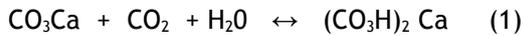
Dado que el equilibrio carbónico es fundamental en todas las aguas naturales y tratadas, describimos este fenómeno a continuación.

El anhídrido carbónico en el agua, puede estar, como ya hemos indicado, bien en forma de gas  $\text{CO}_2$ , de ácido carbónico, de bicarbonatos o de carbonatos. A estas dos últimas formas, se les conoce como  $\text{CO}_2$  combinado. En el siguiente esquema, se muestran las posibles formas en que el anhídrido carbónico se encuentra en el agua

$\text{CO}_2$  TOTAL:

- $\text{CO}_2$  LIBRE
  - .  $\text{CO}_2$  Agresivo( $\text{CO}_2$ )
  - .  $\text{CO}_2$  Equilibrante ( $\text{CO}_3\text{H}_2$  )
- $\text{CO}_2$  COMBINADO
  - .  $\text{CO}_2$  Semicombinado (Bicarbonatos)
  - .  $\text{CO}_2$  Combinado (Carbonatos)

Cuando un agua se pone en contacto con carbonatos y en esta agua hay presente anhídrido carbónico libre, tiene lugar la reacción química de transformación del carbonato en bicarbonato, hasta alcanzarse el equilibrio representado en la siguiente reacción:



Esta reacción es fundamental en el problema que estamos tratando, ya que regula el equilibrio carbonato-bicarbonato e influye en el pH del medio.

El equilibrio se alcanzará cuando en la solución no quede  $\text{CO}_2$ , libre, agresivo, que como hemos visto anteriormente, es una de las formas en que se puede encontrar el anhídrido carbónico en el agua, y es precisamente el que ataca y disuelve a los carbonatos, pero si existe el suficiente  $\text{CO}_2$  para lograr que en la reacción de equilibrio (1) no haya un desplazamiento hacia la izquierda transformándose los bicarbonatos en carbonatos, a este último  $\text{CO}_2$  se le conoce como anhídrido carbónico equilibrante, que estará formando ácido carbónico con el agua:



En este punto de equilibrio, no habrá ni ataque a los carbonatos ni formación de éstos a partir de los bicarbonatos. A este punto de equilibrio, corresponde igualmente un pH de equilibrio, también conocido como pH de saturación, por alcanzarse en este punto la saturación del agua en carbonato. En este punto de equilibrio se consigue, por tanto, que el agua no sea agresiva ni incrustante.

Se pone como ejemplo en el equilibrio carbónico, las sales correspondientes de calcio, por ser éste generalmente el más abundante en el agua, formando los bicarbonatos y carbonatos cálcicos.

Si el  $\text{CO}_2$  libre es superior al  $\text{CO}_2$  equilibrante, es decir, al necesario para mantener el bicarbonato cálcico en solución, este exceso es el conocido como  $\text{CO}_2$  agresivo a la caliza y atacará al carbonato, hasta llegar al equilibrio.

Si el  $\text{CO}_2$  libre es inferior al equilibrante, una parte del bicarbonato cálcico se descompone, liberando  $\text{CO}_2$ , hasta que se restablece o consigue el equilibrio carbónico, produciéndose a la vez carbonato cálcico, que es el causante de las incrustaciones en conducciones, caldera, etc., (Todas estas formas de  $\text{CO}_2$ , se determinan en laboratorio, excepto el equilibrante, que se determina por cálculo, relacionado con el pH de equilibrio).

Se dice que un agua es agresiva, cuando el contenido en  $\text{CO}_2$  libre es superior al  $\text{CO}_2$  equilibrante y es incrustante en el caso inverso.

El agua en equilibrio carbónico y por tanto no agresiva a la caliza ni incrustante, puede ser corrosiva para materiales metálicos en contacto con ella, especialmente si el agua está poco mineralizada, así por ejemplo, puede atacar al hierro y desaparecer el CO<sub>2</sub> equilibrante, ocasionando, como ya hemos dicho, la precipitación de carbonatos. Esta precipitación de carbonato cálcico, formará una capa protectora junto con el óxido de hierro, que protegerá al metal de un posterior ataque.

Una elevación de la temperatura del agua al ocasionar un desprendimiento de CO<sub>2</sub>, es otra posible causa de formación de precipitados incrustantes.

La formación de incrustaciones en las conducciones y otros aparatos en contacto con el agua es debido generalmente a la precipitación de carbonatos de calcio y magnesio, esta precipitación depende en gran medida de varios factores como:

Alcalinidad total

pH

Dureza total

Anhidrido carbónico disuelto

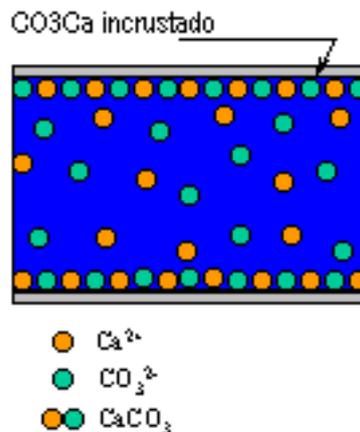
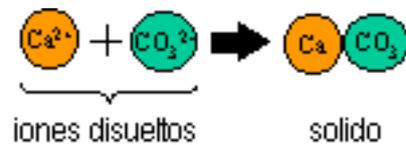
Sólidos totales disueltos

Temperatura

Entre los hechos que pueden proteger a una conducción de agua de posibles corrosiones, está la precipitación de carbonato cálcico, formando una capa protectora en el interior de la conducción. Esta precipitación puede por otra parte llegar a producir obstrucciones y otros fenómenos indeseables. En el tratamiento y conocimiento de estos fenómenos, que en definitiva son reacciones químicas, intervienen: la propia agua (H<sub>2</sub>O), dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), ácido carbónico (CO<sub>3</sub>H<sub>2</sub>) y los iones hidróxido (OH)<sup>-</sup>, hidrógeno (H)<sup>+</sup>, carbonato (CO<sub>3</sub>)<sup>=</sup>, bicarbonato (CO<sub>3</sub>H)<sup>-</sup> y calcio (Ca)<sup>++</sup>.

En la formación del precipitado de carbonato cálcico:

$\text{CO}_3^{=} + \text{Ca}^{++} = \text{CO}_3\text{Ca}$ , se requiere una condición para que la formación y precipitación tenga lugar, esta condición es que el producto de las concentraciones de [Ca<sup>++</sup>] y [CO<sub>3</sub><sup>=</sup>] sea mayor que una constante conocida como producto de solubilidad, K<sub>s</sub> (aguas sobresaturadas).



El precipitado o capa protectora de carbonato cálcico no se formará con las aguas donde el producto  $[\text{CO}_3^{2-}] \cdot [\text{Ca}^{2+}]$  sea menor que la constante de solubilidad. En este último caso las aguas no formarán la capa protectora, sino que serán corrosivas.

Las aguas en las que el producto  $[\text{CO}_3^{2-}] \cdot [\text{Ca}^{2+}]$  es exactamente igual a la constante del producto de solubilidad, son aguas saturadas.

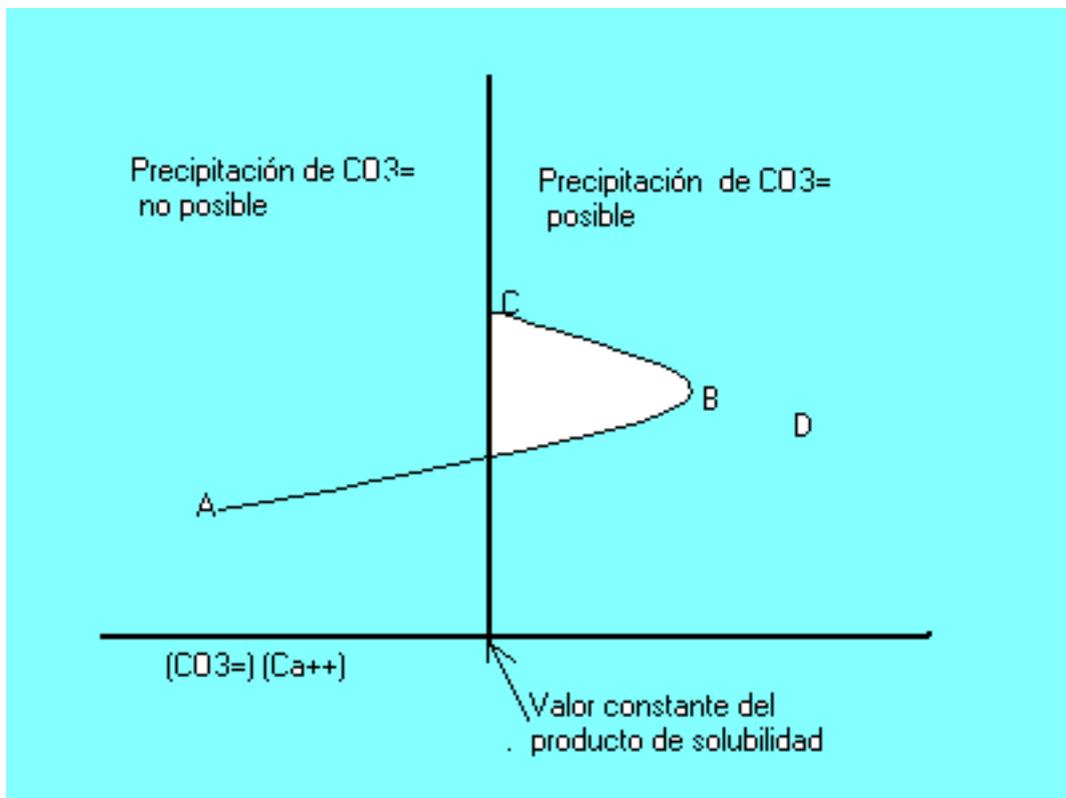
El producto de solubilidad no es constante, decrece con el incremento de la temperatura, de tal forma que un agua que está por debajo de la saturación, a baja temperatura, puede pasar a sobresaturada cuando se eleva su temperatura, es decir que la tendencia de un agua a formar incrustaciones se incrementa con el aumento de la temperatura.

Cuando se dice que un agua está justamente sobresaturada, quiere decirse que puede precipitar carbonato cálcico, lo cual no significa que precipitará de forma clara, pues en general el producto de solubilidad debe ser claramente excedido para que la tasa de precipitación del carbonato cálcico sea significativa.

Si lo que se desea es que partiendo de un agua que está por debajo del punto de saturación, sea capaz de formar una capa protectora de carbonato cálcico, se le suele añadir generalmente alguno

de estos iones, o ambos, hasta conseguir el punto deseado, es decir, sobrepasar el punto de saturación.

En el esquema siguiente se representa el punto de saturación o equilibrio, como la línea que divide la zona de "precipitación posible" y la zona de "precipitación no posible". En este esquema, el agua con las condiciones de la parte izquierda, es decir, infrasaturada, o de "precipitación no posible", como puede ser el punto A, podrá pasar a la zona derecha o de saturación, incrementando la concentración de  $\text{Ca}^{++}$  o de  $\text{CO}_3^{=}$ , para sobrepasar el producto de solubilidad y llegar al punto B.



Una vez conseguida la sobresaturación ( punto B), comienza la precipitación de  $\text{CO}_3\text{Ca}$  y durante esta precipitación el sistema se mueve hacia la dirección de alcanzar el punto de saturación C, depositandose  $\text{CO}_3\text{Ca}$  en el camino, en este punto C ya no habrá más tendencia a la precipitación ( si se mantienen constantes el resto de condiciones), pues habrá precipitado la maxima cantidad posible de  $\text{CO}_3\text{Ca}$ .

Si por ejemplo, en el proceso de acondicionamiento del agua , se alcanzara el punto D , de mayor sobresaturación, entonces la precipitación de  $\text{CO}_3\text{Ca}$  será mayor y generalmente más rápido.

## 6. DESALACIÓN

### 6.1. Introducción.

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

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

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

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

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

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

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

Otro aspecto relevante que se trata, está referido a los productos de construcción y a las sustancias químicas empleadas en los procesos de desalación y se desarrolla la limpieza de las membranas, se ofrecen diversas recomendaciones para llevarlas a cabo de la forma más segura y adecuada posible.

## 6.2. Origen de las aguas para desalación.

Diversas regiones de la geografía española, en particular en las zonas costeras del litoral mediterráneo, sufren escasez de precipitaciones, reciben una población turística importante y demandan grandes cantidades de agua para el regadío, para usos recreativos y para consumo humano. Este cúmulo de circunstancias produce un déficit hídrico permanente, que se agrava en épocas de sequía, por lo que en muchos casos se hace necesario recurrir a la desalación. La desalación se aplica tanto a aguas salobres como a las de mar. El empleo de la tecnología de membranas con aguas continentales tiene una finalidad correctora más que desalinizadora. Para producir agua desalada pueden considerarse los siguientes orígenes:

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



Mapa pluviométrico de la Península Ibérica. Valores medios anuales

### 6.2.1. Agua de mar

La composición del agua del mar varía según su origen o según las características marinas, siendo de mayor concentración de sales en lugares cálidos con poca renovación como en el Mediterráneo, y menor en lugares semicerrados con abundantes aportes continentales como el mar Báltico.

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

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

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

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

### 6.2.2. Aguas continentales con exceso de algunos iones o contaminantes

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

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

Por ejemplo, en algunas regiones, existen aguas cuya salinidad global es inferior a 1 g/L, pero que presentan una alta concentración de algunos iones como nitratos, sulfatos, calcio o magnesio, o algunos contaminantes; lo que impide que puedan ser transformadas en agua apta para consumo

humano por medio de tratamientos convencionales. En estos casos, la aplicación de la tecnología de desalación permite aprovechar estos recursos hídricos para el abastecimiento humano. Frecuentemente se trata de aguas de origen subterráneo, aunque también pueden ser superficiales.

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

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

<b>Tabla 3. Contaminantes más frecuentes</b>	
<b>Sustancias o contaminantes en el agua</b>	<b>Causa u origen</b>
Materia en suspensión.	Arrastres por agotamiento del acuífero por sobre-explotación.
Sales disueltas.	Intrusión marina en el acuífero por sobreexplotación. Vertidos salinos.
Nitratos y nitritos.	Uso masivo de fertilizantes nitrogenados, o infiltraciones de aguas fecales procedentes de fosas sépticas o de explotaciones ganaderas. Mala gestión de los residuos ganaderos.
Amonio.	Infiltraciones de aguas fecales procedentes de fosas sépticas o de explotaciones ganaderas.
Halogenuros orgánicos (Yodo o bromo orgánico).	Por contaminación difusa debida a antiguas prácticas agrícolas (empleo como herbicidas).
Plaguicidas.	Uso masivo de plaguicidas (herbicidas, insecticidas...) en la agricultura.
Disolventes orgánicos, hidrocarburos, aceites, grasas.	Vertidos industriales y/o urbanos.
Metales pesados, Cromo hexavalente y cianuros.	Vertidos industriales.
Radiactividad.	Contaminación artificial y natural.
Detergentes.	Vertidos de aguas residuales urbanas. Vertidos industriales.
Bacterias, virus, hongos, protozoos.	Infiltraciones de aguas fecales procedentes de fosas sépticas o de explotaciones ganaderas, etc.

### 6.2.3. Aguas Salobres

Se considera que el agua es salobre cuando su concentración de sales disueltas se encuentra en el intervalo de 1 a 10 g/L. Aunque el agua salobre puede ser de origen superficial, generalmente

procede de acuíferos costeros en contacto directo con el mar. Los acuíferos de aguas salobres de origen fósil completamente aislados del mar, son también potencialmente útiles en la desalación.

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

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

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

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

#### **6.2.4. Aguas residuales depuradas**

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

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

#### **6.2.5. Captación del agua**

Se distinguen dos procedimientos básicos de captación:

- Captación cerrada (pozos profundos, pozos playeros, drenes horizontales, cántaras ...).

- Captación abierta (captación superficial, torres sumergidas, escollera ...).



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

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

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

### 6.3. Pretratamiento

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

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

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

### **6.3.1. Pretratamientos para los procesos de desalación por membranas**

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

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

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

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

### **Pretratamientos físico-químicos**

Los pretratamientos físico-químicos de las aguas que alimentan a las plantas de desalación con membranas, son procesos unitarios de tratamiento muy similares a los empleados en las ETAP, aunque los requerimientos de ciertos valores paramétricos del agua pretratada, son más exigentes que los demandados para el tratamiento convencional de las aguas de consumo humano.

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

- Acidificación
- Dosificación de inhibidores de la incrustación.

- Oxidación.
- Coagulación-floculación.
- Decantación.
- Flotación.
- Filtración por lecho filtrante.
- Filtración por cartuchos.
- Desinfección.
- Reducción.
- Adsorción.
- Desgasificación.





### Pretratamiento mediante membranas

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

El rendimiento de estas membranas es tan alto que partiendo de aguas 500 UNT de turbidez y 200 mg/L de sólidos en suspensión, se podría llegar a obtener un agua de 0,05-1,0 UNT y SDI<sub>15</sub> de 0,5-3.

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

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

Respecto a la utilización de membranas de nanofiltración en pretratamientos de plantas desaladoras, la aplicación más importante está centrada en la evaporación MSF, lo que permite

disminuir el consumo energético entre un 25 a 30%, reduciendo el potencial de formación de incrustaciones, principalmente de sulfato y carbonato cálcico.

#### Microfiltración

Ésta fue la primera tecnología de membrana, y se utiliza principalmente para el tratamiento de aguas superficiales destinadas a consumo humano desde hace más de dos décadas, con objeto de eliminar o reducir protozoos, como *Cryptosporidium* y *Giardia*, turbidez, color, algas, bacterias y, en algunos casos, virus ligados a materia particulada; como alternativa a los procesos físico-químicos convencionales descritos anteriormente.

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

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

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

#### Ultrafiltración

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



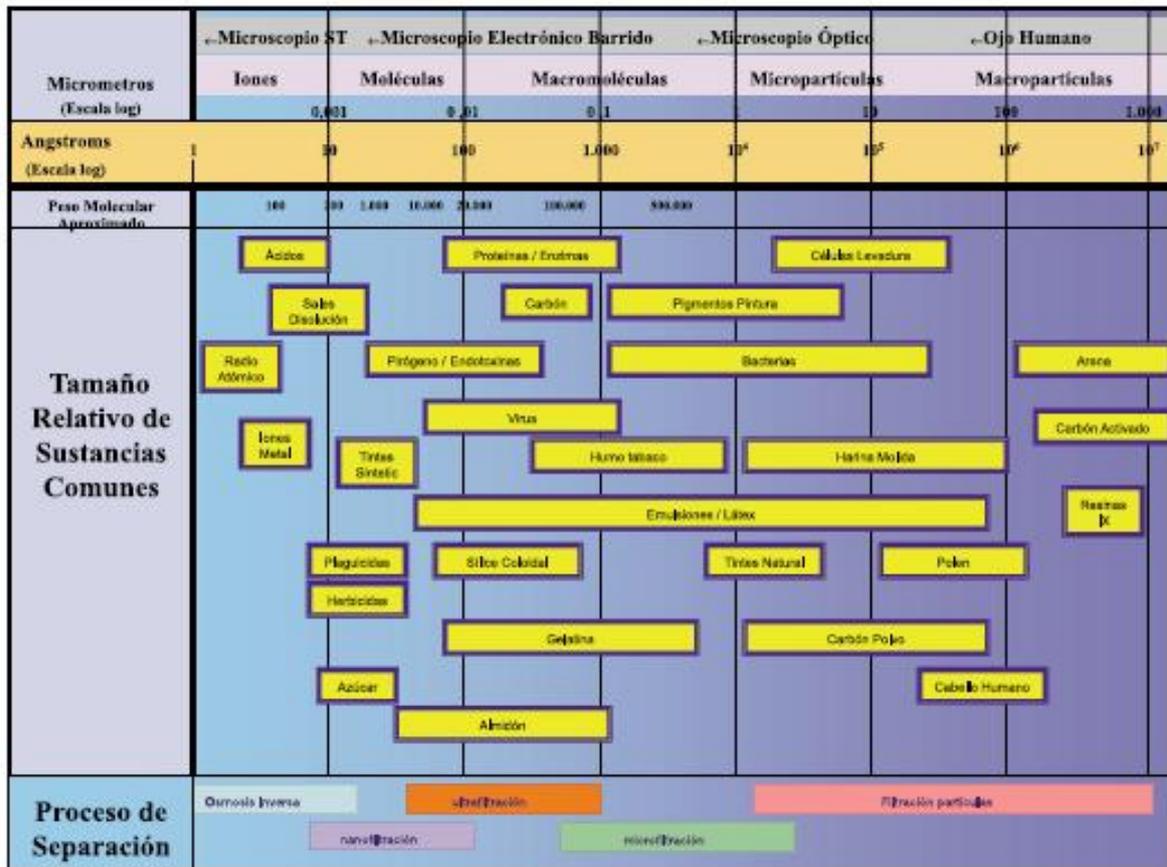
Ultrafiltración con membrana espiral. Por cortesía de AQUAESPAÑA

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

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



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



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

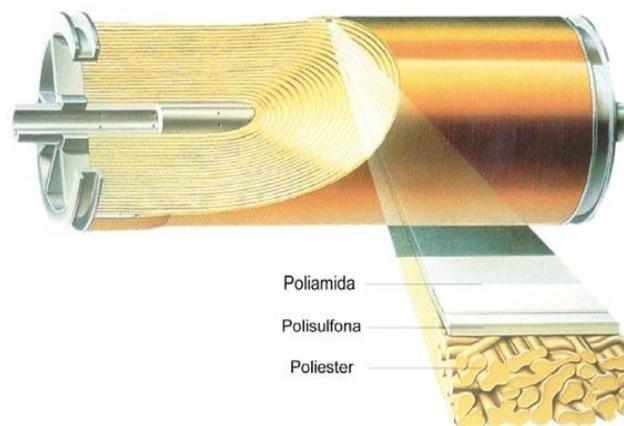
La mayoría de las membranas son de naturaleza orgánica, fabricadas en materiales poliméricos como polisulfona, fluoruro de polivilideno, poliamida, acetato de celulosa, etc; y cuyas configuraciones suelen ser en fibra capilar de distintos diámetros, en forma de membranas planas en estructura compacta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

### Nanofiltración

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

siendo sus características más destacadas esta capacidad selectiva de iones y su funcionamiento a menor presión.

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



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

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

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

### 6.3.2. Pretratamientos para procesos de destilación/evaporación

En los procesos de desalación por destilación, la misión del pretratamiento es eliminar o reducir al máximo posible el riesgo de precipitación de sales insolubles en las superficies de intercambio de

calor, y la eliminación de gases no condensables capaces de reducir el coeficiente de transmisión de calor, y provocando serios problemas de corrosión en los evaporadores y en los equipos de la planta.

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

### **Pretratamientos habituales**

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

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

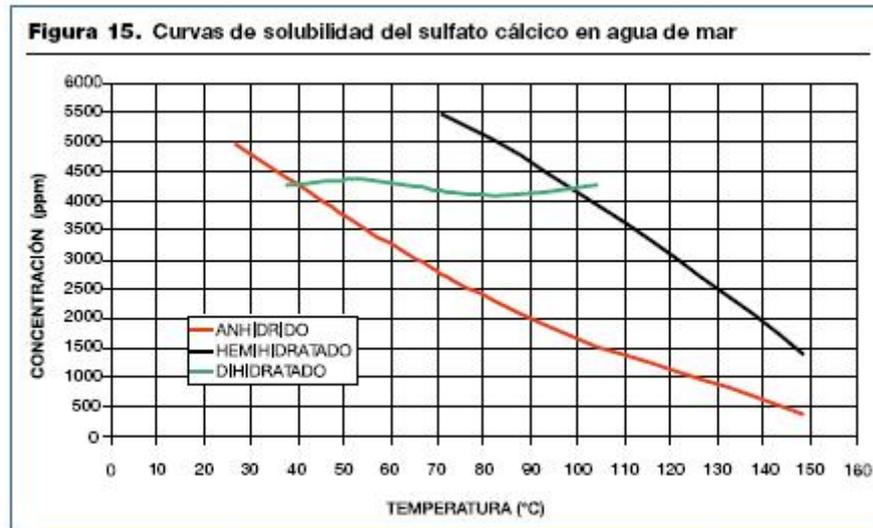
Finalmente otro de los problemas habituales en los procesos de desalación por destilación es la formación de espumas en el interior de los evaporadores. Estas espumas reducen el rendimiento de la evaporación y contaminan el producto obtenido, por esta razón hay que evitar su formación.

Vamos a analizar en detalle cada uno de estos pretratamientos.

### **Eliminación de incrustaciones**

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

### **Sulfato de calcio**



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

### Control de carbonato cálcico

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

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

### Control por antiincrustantes

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

### **Desgasificación y descarbonatación**

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

Si el tratamiento para la eliminación de los bicarbonatos ha sido de adición de ácido, se producirá una gran cantidad de  $\text{CO}_2$ , que permanecerá en disolución. Normalmente, este gas se elimina previamente a la desgasificación para evitar la sobrecarga y el sobredimensionamiento del equipo de vacío, por medio de un descarbonatador atmosférico. El rendimiento de este tipo de descarbonatadores llega a dejar en el agua menos de 10 mg/L de  $\text{CO}_2$ .

La descarbonatación consiste en una torre en la que el agua se pulveriza o dispersa finamente, percolando sobre un relleno que aumenta la superficie de contacto (normalmente anillos Raschig, monturas o similares). En contra-corriente se introduce aire que arrastra el gas en disolución evacuándolo a la atmósfera por la parte superior de la torre. Para diseños correctos, el rendimiento de este tipo de descarbonatadores es elevado, y permite extraer hasta el 98% del  $\text{CO}_2$  contenido en el agua, pero saturándola de aire, por ello posterior al descarbonatador se sitúa el desgasificador térmico a vacío.

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

### Eliminación de espumas. Antiespumantes

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

## 6.4. Técnicas de desalación

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

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

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



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

### 6.4.1. Tecnologías de membrana

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

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

#### Ósmosis inversa

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

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

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

#### Configuración de membranas de osmosis inversa

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

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

Comercialmente se consideran cuatro configuraciones básicas:

- Plato y Marco.

- Tubular.
- Fibra hueca.
- Arrollamiento en espiral.

#### Factor de conversión y factor de concentración

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

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

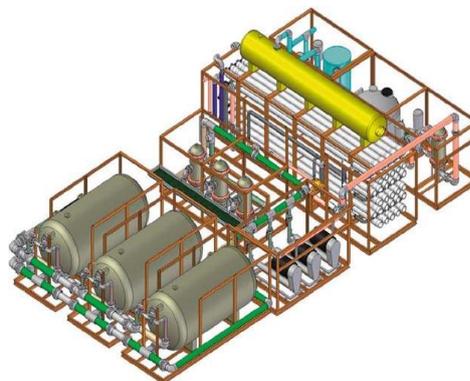
La mayor conversión de un sistema implica, además, una mayor concentración en la salmuera. El factor de concentración de un sistema de ósmosis inversa está relacionado con el factor de conversión.

#### Factor de Rechazo (R) y de Paso de Sales (SP)

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

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

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



Esquema general de una pequeña desaladora industrial de agua marina (2.500 m<sup>3</sup> día). Imagen cortesía de AQUAESPANA

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

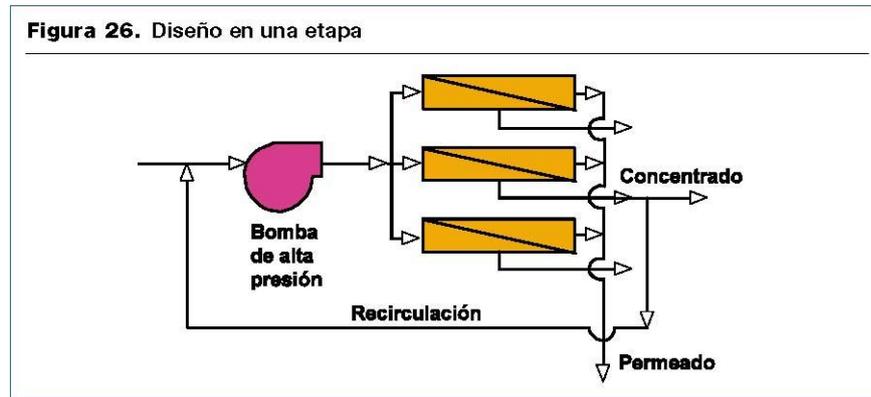


Aspecto de los bastidores con las cajas de presión. Por cortesía de AQUAESPANA

#### Etapas

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

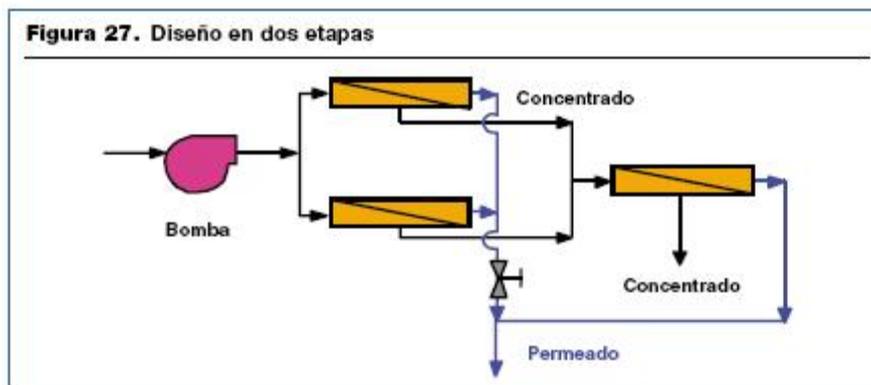
La capacidad de una planta desaladora por ósmosis inversa viene determinada por la cantidad de cajas de presión instaladas en paralelo siguiendo el esquema el siguiente:



Diseño en una etapa

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

El diagrama sería el siguiente:



Diseño en dos etapas

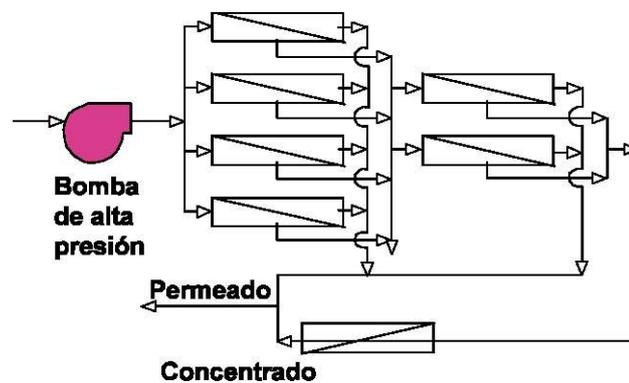
En los sistemas de dos etapas, frecuentemente se regula la presión de permeado entre la primera y la segunda etapa incrementando la presión en la primera etapa, de ese modo también se aumenta, aunque de forma indirecta, la presión sobre la segunda etapa, pudiéndose equilibrar de ese modo la producción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

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

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

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

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



Diseño en tres etapas

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

#### Pasos

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

En la figura anterior se puede ver un diagrama simplificado de una planta de OI de dos pasos. El producto procedente del primer paso normalmente es sometido a un aumento de la presión mediante una bomba, llegando hasta unos 6 u 8 bares, y se introduce en unas membranas de OI de

las empleadas con agua salobre. El producto de este segundo paso tendría un contenido en sales inferior a 10 mg/L. El factor de concentración de esta segunda etapa suele ser muy alto, del orden de ocho veces la inicial. El agua de rechazo del segundo paso se une al agua bruta de alimentación del primer paso.

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



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



**Figura 32. Detalle de las cajas de presión. Por cortesía de AQUAESPANA**



## Nanofiltración

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

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

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

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

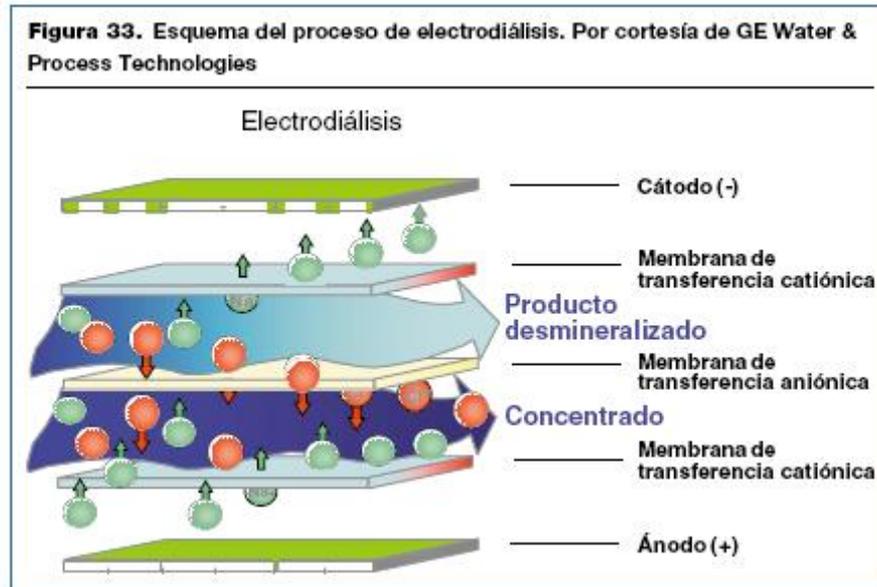
En lo que respecta al diseño, los fundamentos y los componentes para la nanofiltración, es aplicable todo lo expuesto para la ósmosis inversa.

## **Electrodiálisis**

### Principio de funcionamiento de la electrodiálisis

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

electrodiálisis sólo se mueven a través de las membranas los sólidos disueltos pero no el solvente (agua).



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

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

#### 6.4.2. Otras tecnologías de desalación. Técnicas de destilación

Conviene hacer notar los procesos de destilación han caído en desuso debido a los altos costes tanto de inversión como de consumo energético y, por tanto, de explotación. Su utilización está restringida a determinadas aplicaciones de uso industrial para producir un agua destilada necesaria en algunos procesos como por ejemplo, para agua de aportación a calderas de las centrales térmicas

o países con abundantes recursos energéticos (Golfo Pérsico). En España la última planta de destilación adjudicada para uso de abastecimiento urbano, fue en 1996: una planta del proceso de MED en Las Palmas de Gran Canaria.



Conjunto de plantas de desalación por destilación en Gran Canaria.

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

### **Proceso de Evaporación Instantánea Multietapa (MSF)**

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

Tomando como referencia el diagrama de flujo de la figura 38 se va a describir cómo ocurre el proceso. Se distinguen tres secciones, una es la sección de rechazo, otra es la de recuperación y finalmente, el recalentador de salmuera. Partiendo de la salida del recalentador (a la izquierda de

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

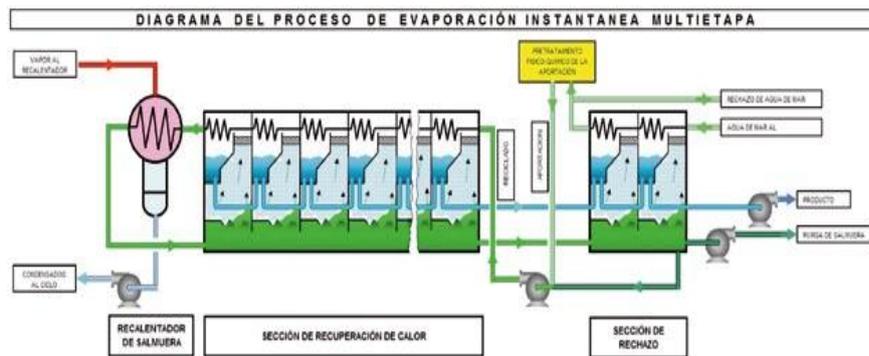


Diagrama de proceso M.S.F.

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

El caudal de aportación, más una parte de la salmuera que queda en la última etapa, se mezclan formando el reciclado, que es introducido, mediante la bomba de reciclado, por el interior de los tubos de la sección de recuperación de calor, haciendo de fluido frío para condensar el vapor que se forma en cada etapa. Este reciclado irá calentándose conforme avanza hacia la primera etapa. A la salida de los tubos de esta primera etapa, ha alcanzado la mayor parte de la temperatura necesaria para iniciar el ciclo, gracias al calor recuperado, no obstante aún le falta un incremento de temperatura que adquiere, hasta llegar a la temperatura máxima admisible en el recalentador de

salmuera, siendo la condensación de un vapor externo la fuente calorífica para calentar el reciclado hasta su temperatura máxima.

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

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

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

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

### **Proceso de Evaporación Multiefecto en Tubos Horizontales (HTME)**

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

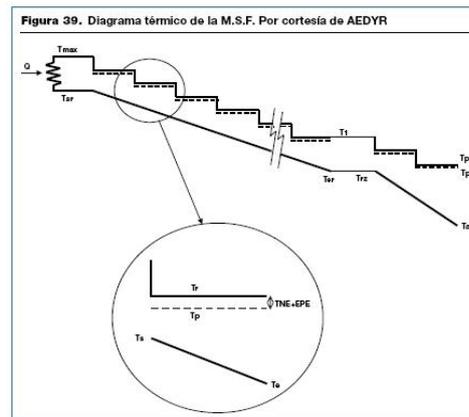


Diagrama térmico de la M.S.F. Por cortesía de AEDYR

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

El vapor producido, pasa a través de unos separadores de gotas (demisters), para extraer las gotas de salmuera que pueda arrastrar, y entra en el interior de los tubos del siguiente efecto donde se condensará, evaporando igualmente una parte del agua de mar que está siendo rociada por el exterior de los tubos. Esta agua que se rocía procede del agua de mar no evaporada del primer efecto, por lo que a su vez sufre un proceso de evaporación instantánea al encontrarse con unas condiciones reinantes en el efecto de menor presión que la anterior. En conclusión, el vapor producido en cada efecto procede de la evaporación por desequilibrio térmico entre efectos, y por la condensación de vapor en el interior de los tubos. Este proceso se va repitiendo de efecto en efecto, reduciéndose cada vez más la temperatura a la que tiene lugar y por tanto, disminuyendo así mismo la presión correspondiente en el interior de cada efecto, hasta llegar al último que es el condensador final.

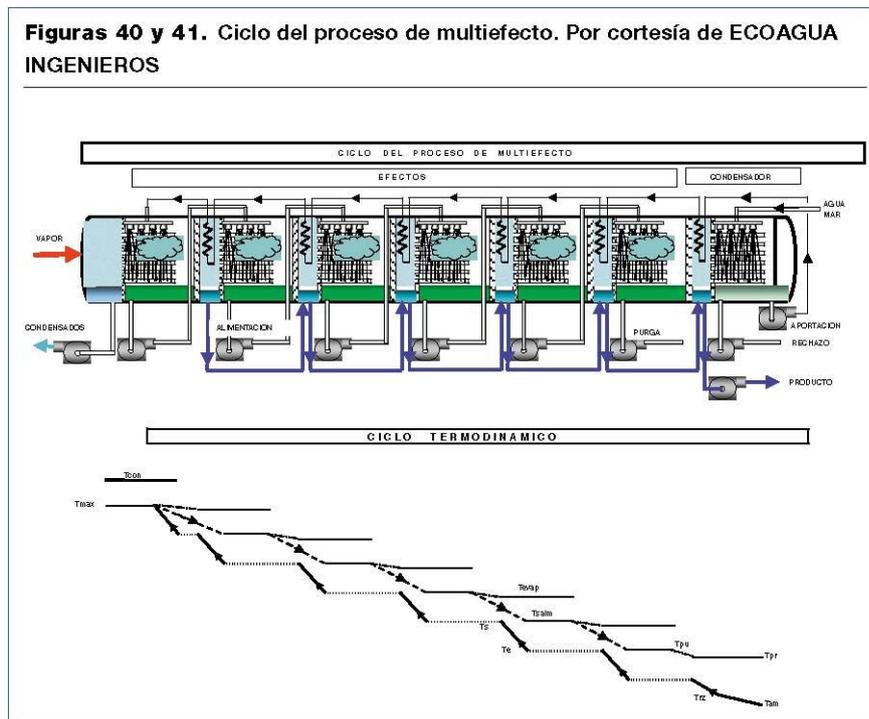
En este condensador se condensa el vapor producido en el efecto anterior, pero como la cantidad de agua de mar utilizada para condensarlo es muy grande, no se produce vapor; únicamente se logra el calentamiento del agua de mar. A la salida de este efecto/condensador, la corriente de agua de mar caliente se divide en dos, una la de rechazo que se devuelve al mar, y otra la de aportación, que se bombea a los efectos anteriores al condensador. A través de unos cambiadores de calor que utilizan una parte del vapor producido en los efectos, este caudal de aportación va calentándose hasta llegar al primer efecto, donde alcanza la temperatura máxima que le permite continuar el

ciclo. Como ya se ha indicado al principio, en este primer efecto se rocía el agua de aportación caliente por el exterior de los tubos, incrementando su temperatura y evaporándose parcialmente. El agua de mar que no se ha evaporado y que permanece en este efecto, se bombea a los efectos siguientes, rociando el exterior de los tubos.

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

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

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



Ciclo del proceso de multiefecto.

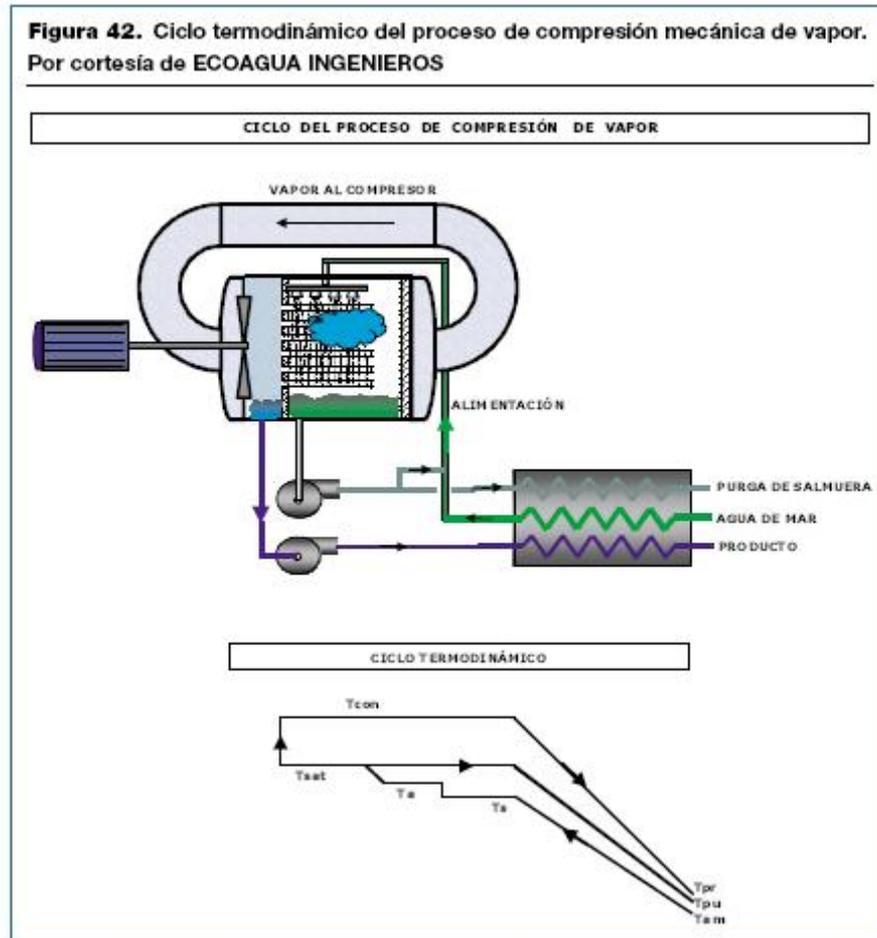
El agua de alimentación antes de introducirla en el evaporador será tratada químicamente para evitar las incrustaciones. El tratamiento habitual es una desgasificación y la adición de un inhibidor, normalmente tipo polifosfato.

### Proceso de Compresión de Vapor (Mecánica y Térmica)

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

El agua de mar procedente de la toma, se hace pasar por el intercambiador de calor donde se calienta. Este agua de mar calentada se mezcla con una parte de la salmuera y forma la alimentación, que es bombeada al interior del evaporador, y rociada sobre los tubos del condensador mediante unas toberas. Esta alimentación se calienta hasta alcanzar la temperatura de saturación ( $T_{sat}$ ) correspondiente a la presión reinante en el interior del evaporador. Al seguir absorbiendo calor, una parte se evapora. El vapor formado pasa a través de unas mallas separadoras de gotas (demisters), entra en la aspiración del compresor que lo comprime hasta alcanzar la presión  $P_2$ , convirtiéndose en un vapor recalentado. Este vapor es introducido en el interior de los tubos del evaporador, donde primero pierde su calor sensible y después se condensa, cediendo el calor a la alimentación está cayendo por el exterior de los tubos. El producto es extraído mediante

una bomba y dado que aún lleva calor sensible es enfriado en el intercambiador de placas, calentando el agua de mar que se incorpora al ciclo.



Ciclo termodinámico del proceso de compresión mecánica de vapor.

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

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

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

## 6.5. Postratamiento

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

El tipo de tratamiento de corrección, así como su alcance, dependen fundamentalmente del proceso de desalación utilizado y de la calidad del agua tratada obtenida. Se pueden diferenciar cinco actuaciones que pueden ser o no necesarias dependiendo del agua producto obtenida, la reglamentación vigente y la calidad deseada para el agua postratada (potable). Estas actuaciones pueden clasificarse en cinco tipos: eliminación de CO<sub>2</sub> o descarbonatación, mezcla de aguas, intercambio iónico, acondicionamiento químico y desinfección.

### 6.5.1. Eliminación de CO<sub>2</sub> o descarbonatación

Si en el pretratamiento se ha empleado gas carbónico para rebajar el pH y evitar la aparición de carbonatos, se producirá una gran cantidad de CO<sub>2</sub> que quedará en disolución y atravesará con facilidad la membrana apareciendo en el agua producto. El carbónico puede provocar una disminución del pH del agua que aumentaría su agresividad. Si es necesario mediante descarbonatación, se puede reducir la concentración de CO<sub>2</sub> hasta alcanzar valores de pH de equilibrio en los que el índice de Langelier se sitúe en el intervalo de  $\pm 0,5$ . De ese modo, el pH quedaría ajustado en el intervalo de valores marcado por la vigente legislación de aguas de consumo humano.

Si el contenido de CO<sub>2</sub> es bajo, ya sea porque no se realiza acidificación en el pretratamiento, porque el anhídrido carbónico ya ha sido eliminado en el propio pretratamiento, o bien porque se desea conservar para reutilizarlo en la remineralización; no se precisa la instalación de un descarbonatador.

Por el contrario, si en el agua tratada hay CO<sub>2</sub> en exceso, será necesario reducirlo hasta concentraciones convenientes para la instalación o para la calidad del agua final. La eliminación del carbónico o descarbonatación se puede llevar a cabo mediante descarbonatador u otro sistema de neutralización.

El descarbonatador, para «stripping en frío» consiste en una torre en la que el agua se pulveriza o dispersa finamente, percolando sobre un lecho de material (normalmente anillos Raschig o

similares, lava volcánica, coque, etc...), a contra corriente de un caudal de aire que arrastra el gas en disolución evacuándolo a la atmósfera por la parte superior de la torre. Para diseños correctos, el rendimiento de este tipo de descarbonatadores es elevado, y permite extraer hasta el 98% de los gases contenidos en el agua.

### 6.5.2. Intercambio iónico

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

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

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

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

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

- Polímeros de adsorción.

#### Intercambio catiónico

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

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

#### Intercambio aniónico

Es el intercambio de los aniones presentes en el agua ( $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{PO}_4^{3-}$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{SiO}_2$ , etc.) por iones hidroxilo ( $\text{OH}^-$ ). Este intercambio precede al intercambio catiónico, consiguiendo de ese modo la total desmineralización del agua.

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

### 6.5.3. Acondicionamiento químico

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

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

mineral equilibrada y en último término el cumplimiento de la legislación vigente para las aguas de consumo humano.

Cumplimiento de la normativa de agua de consumo humano

Como ya se ha indicado, el agua producto de una desalación carece de la alcalinidad y dureza mínimas para cumplir con lo especificado en la legislación vigente sobre aguas de consumo humano<sup>1</sup>.

Siendo el cloruro sódico la sal predominante del agua de mar, en el caso de una desaladora por ósmosis de agua marina, cuyas membranas estuvieran algo deterioradas, el agua permeada podría contener una cierta concentración de cloruros y de sodio. Según la vigente legislación de agua de consumo humano<sup>1</sup>, el valor máximo de sodio es de 200 mg/L (8,70 meq/L) y el de cloruros es de 250 mg/L (7,04 meq/L).

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

Sin embargo, con esta composición, el índice de Langelier sería aproximadamente de -5,3; fuera del intervalo legal para agua de consumo humano<sup>1</sup>, y el índice de SAR de 63,5; valor muy alto para agua de riego, lo que pone de manifiesto la necesidad de remineralizar las aguas desaladas.

**Tabla 7**

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

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

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

#### Remineralización mediante mezcla de aguas

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

La práctica de la mezcla de aguas no será aplicable en las instalaciones en las que dispongan exclusivamente de agua de mar, en estos casos la remineralización del producto se deberá abordar por al vía química tal y como se explica posteriormente.

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

Cuando además de agua de mar se disponga de otra de origen diferente (Ej.: pozos de agua salobre o dulce relativamente próximos).

Cuando el agua de aportación no sea de mar, sino más o menos salobre.

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

#### Remineralización química del agua producto.

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

- Dosificación de CO<sub>2</sub> y cal viva.
- Dosificación de CO<sub>2</sub> e hidróxido cálcico.
- Dosificación de CO<sub>2</sub> y lechos de carbonato cálcico (calcita)
- Dosificación de CO<sub>2</sub> y torres de dolomitas.
- Dosificación de cloruro magnésico y bicarbonato sódico.

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

Las instalaciones de dosificación de  $\text{CO}_2$  y lechos de carbonato cálcico (calcita), están incrementándose en los últimos años en España. Los lechos pueden ser de flujo descendente, a modo de filtros abiertos convencionales, equivalentes a los de arena o carbón activo de los tratamientos convencionales de las ETAPs, o de flujo ascendente y altura constante, que minimizan el problema de la carga periódica que debe hacerse en los lechos abiertos.

La calcita es carbonato cálcico  $\text{CaCO}_3$  que puede obtenerse de elevada pureza y libre de trazas de otras rocas carbonatadas. Su composición media en CaO es del 55%.

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

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

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

## 6.6. Sustancias y materiales

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

Se tratan por separado estas dos categorías:

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

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

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

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

En particular, en las tecnologías de membrana existen una serie de procesos indirectamente relacionados con el tratamiento como son el mantenimiento, conservación y limpieza de las membranas, labores que se llevan a cabo «fuera de línea», sin que los dispositivos estén produciendo agua desalada. En estos casos, los productos se regularán a través de una norma o recomendación específica y pueden estar afectadas así mismo por la normativa de biocidas<sup>1</sup> y el nuevo reglamento REACH<sup>2</sup>, por lo que es necesario que exista control y seguridad en su empleo.

Establecimiento de requisitos adicionales por parte de las Autoridades Sanitarias de las Comunidades Autónomas Las Comunidades Autónomas disponen de competencias en materia de vigilancia e inspección sanitaria, por lo que pueden establecer *requisitos sanitarios adicionales* para el uso de determinadas sustancias y productos (ej: establecimiento de determinados controles o restricciones), e incluso establecer prohibiciones de uso. Por ese motivo, se sugiere a los gestores, fabricantes o distribuidores de sustancias, que se pongan en contacto con las respectivas Consejerías de Sanidad donde prevean la distribución y empleo de sus productos químicos. Así mismo, el empleo de sustancias por parte del gestor en lugares diferentes a los establecidos en la legislación vigente, está condicionado a autorización previa por parte de las Autoridades Sanitarias. Parte de la información que se describe en el presente capítulo, puede ser también útil en la preparación de los preceptivos informes sanitarios vinculantes antes de la puesta en marcha de una desaladora, estaciones de tratamiento de agua potable u otras infraestructuras hidráulicas. A efectos prácticos, las sustancias y preparados de esta categoría se han dividido en dos grupos

según su punto de aplicación o modo de empleo, y según su consideración dentro de la normativa de agua de consumo humano. • Grupo A. Sustancias dosificadas en continuo en el pretratamiento en los sistemas de tratamiento por membranas y sustancias empleadas en el postratamiento del agua, que están normalizadas específicamente para ese uso<sup>3</sup> y reconocidas en la legislación de agua de consumo humano. • Grupo B. Sustancias empleadas en el mantenimiento, la limpieza y la conservación de membranas siempre que los trabajos sean realizados fuera del circuito de producción de agua producto y en la limpieza de superficies en contacto con el agua.

### Grupo A

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

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

Concretamente:

1. Cumplimiento de los artículos 9 y 10 del Real Decreto 140/2003, de 7 de febrero por el que se establecen los criterios sanitarios de la calidad del agua de consumo humano<sup>4</sup>.
2. Cumplimiento de la Orden SAS/1915/2009, de 21 de noviembre, sobre sustancias para el tratamiento del agua destinada a la producción de agua de consumo humano. (BOE 17/07/2009), que actualiza y amplía el RD 140/2003; o cualquier otra normativa que la sustituya o complemente, se está finalizando la tramitación de una modificación de esta Orden. Esta nueva Orden tiene las siguientes características • Deroga la Orden Ministerial SCO 3719/2005, de 21 de noviembre sobre sustancias para el tratamiento del agua destinada a la producción de agua de consumo humano. (BOE 287 del 1/12/2005) • Actualiza anexo II del Real Decreto 140/2003 sobre agua de consumo humano con dos listas positivas, 83 sustancias o grupos de sustancias en la parte A (sustancias para tratamiento), 10 sustancias en la parte B (Biocidas), frente a 73 iniciales, en las que se indica: - Nombres. - Sinónimos. - Números CAS y EINECS - Función principal. - Control analítico adicional - Observaciones y condiciones de utilización. • Establece las condiciones de cumplimiento de las normas UNE EN. • Exige que las sustancias vayan acompañadas de documentación específica a disposición de la inspección sanitaria. • Prohíbe el empleo de sustancias o productos que no estén en sus anexos (lista positiva).

Breve reseña sobre las Normas UNE EN

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

Las normas UNE-EN son la adopción de normas europeas (Normas EN, del Comité Europeo de Normalización, CEN). Con ellas se establecen las características que debe tener cada sustancia, los límites de residuos, contaminantes o sustancias químicas, la dosis recomendada, y los métodos normalizados para su análisis cualitativo y cuantitativo.

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

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

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

### **Grupo B**

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

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

En este caso, las sustancias empleadas no están dentro del ámbito de la Orden SAS/1915/2009 al tratarse de agentes de superficie y limpiadores, que siempre se emplean a planta parada. No obstante, se regularán mediante una norma o recomendación específica por parte del Ministerio de Sanidad y Política Social.

### **6.6.2. Productos y materiales de construcción en contacto con el agua**

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

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

Todo ello supone una migración potencial de los materiales ya sean metálicos, poliméricos (plásticos, resinas), cementosos e incluso cerámicos al agua que permanece o fluye por las diversas infraestructuras hidráulicas. Una selección inadecuada de los materiales, puede incrementar la presencia de elementos y sustancias causando alteraciones en la calidad del agua. Las más frecuentes son cambios organolépticos como olores, sabores y colores;

o si las sustancias están contempladas en las listas de parámetros que se controlan en el agua, puede llegar a provocar incumplimientos, incluso la no aptitud del agua para ser distribuida para consumo humano.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

## 7. Distribución de aguas

### 7.1. Definición

Una red de distribución de agua potable es el conjunto de instalaciones que la empresa de abastecimiento tiene para transportar desde el punto o puntos de captación y tratamiento hasta hacer llegar el suministro al cliente en unas condiciones que satisfagan sus necesidades.

Este grado de satisfacción tiene un elevadísimo número de componentes, unos medibles y otros no, y entre los que podemos destacar la calidad, el caudal, la presión, la continuidad del suministro y el precio.

Naturalmente todos estos componentes tienen unos antecedentes a la red de distribución, por lo que los parámetros iniciales vienen prefijados. Por tanto, debemos crear una red de distribución que altere lo menos posible las características de los componentes, minimizando la variación de satisfacción de las necesidades de los clientes.

### 7.2. Estructura Jerárquica

Las redes de distribución de agua se estructuran según el tipo de función que desempeñan y que tienen una relación directa con la serie decreciente de los diámetros con el fin de ajustarse a la distribución de consumos, a la reducción de pérdidas de carga, hacer frente a situaciones imprevistas y a reducir el coste.

Los niveles en los que se clasifican son: aducción, distribución urbana y acometidas.

Las conducciones de aducción son las grandes arterias de transporte que recogen el agua desde los puntos de captación o tratamiento y llegan hasta la zona urbana.

La red de distribución urbana es la que toma el agua de la aducción directamente o de los diferentes depósitos reguladores (cabecera, intermedio o cola) y la distribuye entre todos los puntos de consumo. Dentro de esta red se ha de distinguir las redes de transporte interzonales.

En el caso de la red de Madrid, esta red de transporte está compuesta por las tuberías superiores a 300 mm. y de las que no se permite derivar acometidas.

Existen redes sin transporte interzonal, en las que el modelo es del tipo homogéneo, siendo su funcionamiento equivalente al de un gran acuífero y que puede ser útil e incluso más económico en

aquellos abastecimientos que tengan una escasa variación altimétrica, una trama urbana muy cerrada y un elevado número de puntos de unión con la red de aducción.

Esta red de distribución urbana ha de tener una capacidad suficiente para suministrar los caudales contra incendios y de emergencias.

Por último las **acometidas** son las que partiendo de la derivación de la tubería general suministran al cliente.

La elección del tipo de acometida así como la exigencia de una ejecución correcta tiene una importancia considerable, pues es en este nivel de la red en el que se acumulan entre el 70 y el 80% de las intervenciones directas de una red de distribución.

### 7.3. Tipologías

Las redes de distribución en general o bien según su función o localización por áreas pueden ser de dos grandes tipos: **Ramificada y Mallada**.

Una **red Ramificada** es aquella que va uniendo los diferentes puntos de consumo con una única tubería.

Una **red Mallada** es la que va formando cuadrículas, consiguiéndose que cada punto de consumo tenga más de una vía de flujo.

Las diferencias más notables entre ambas son el coste y la calidad, teniendo que sopesar ambas a la hora de declinar la elección.

### 7.4. Elementos que integran una red

Toda red de distribución de agua está formada por los siguientes elementos:

- Tuberías
- Depósitos.
- Elevadoras.
- Otros elementos singulares.

#### 7.4.1. Tuberías

Es el elemento de transporte de fluidos por excelencia.

Las tuberías vienen definidas por su diámetro, material de constitución y tipo de junta.

El diámetro viene definido del cálculo hidráulico de la red y tanto el material como los tipos de juntas se recogen en otra exposición de este curso.

#### **7.4.2. Depósitos**

Los depósitos dentro de una red de distribución tienen las funciones de almacenamiento y de regulación de caudales y presiones.

La mayor parte de los tratados aconsejan que el volumen de los depósitos sea equivalente al consumo del día punta (24 horas). Ahora bien, conforme sean las características de las fuentes de suministro esta premisa puede ser excesiva o escasa.

Por ejemplo, en grandes conducciones en las que se establezca un régimen de conservación, puede que se requiera tenerla fuera de servicio un tiempo mayor, con la consiguiente necesidad de almacenamiento.

La capacidad de los depósitos de una red de distribución viene definida por la posición de equilibrio entre el tiempo de abastecimiento cubierto, el tiempo medio de estancia en la red y el aspecto económico.

Disponer de una reserva excesiva, además de suponer una inversión muy fuerte, produce un tiempo de permanencia elevado con la consiguiente disminución de la calidad del agua.

Tradicionalmente la construcción de los depósitos se realizaba bien con fábrica de diferentes materiales o bien con hormigón in situ, tanto en masa como armado. En la actualidad los elementos prefabricados tienen un lugar predominante, pues abarcan un amplio abanico tanto de volúmenes como de geometría con una disminución notable del tiempo de puesta en servicio, aunque no tanto económicamente.

La circulación del agua en el depósito debe estudiarse para evitar zonas muertas, siendo recomendable que la entrada y la salida del mismo se realice en puntos hidráulicamente opuestos.

La creación de cámaras aisladas depende tanto de la capacidad total del mismo, como de la posibilidad de ser solapado o no por otro depósito de la red.

No debe olvidarse que se ha de disponer de una capacidad de almacenamiento para el abastecimiento puntual en casos de emergencia.

Los aspectos de seguridad requieren de una atención especial tanto para la protección a terceros como de nuestras instalaciones frente a ellos. Así pues deberá protegerse la posible caída de personas o animales tanto como la imposibilidad de introducción de elementos extraños en él, protegiendo mediante sistemas sifónicos los respiraderos, con derivación a los desagües.

Al tener un ambiente elevadamente agresivo el interior de los depósitos, es muy conveniente que las diferentes cámaras de válvulas estén aisladas del mismo.

La relación de funciones sobre las que debemos actuar en un depósito son:

- Corte o regulación de la entrada.
- Corte o regulación de la salida.
- Desagüe.
- Alivio de excesos.
- Conexión y aislamiento de cada compartimento.
- Control de drenaje.
- Rotura de carga de la entrada.

Para cada una de estas funciones existen en el mercado válvulas específicas que se han diseñado para cada cometido.

### 7.4.3. Elevadoras

Las elevadoras o estaciones de bombeo son estructuras destinadas a elevar un fluido desde un nivel energético inicial a un nivel energético mayor.

Generalmente las estaciones de bombeo constan de las siguientes partes:

- Rejas
- Cámara de succión

- Las bombas propiamente dichas
- Línea de impulsión
- Servicios auxiliares
- Dispositivos de protección contra el golpe de ariete
- Línea de alimentación de energía eléctrica o instalación para almacenamiento de combustible
- Sistema de monitoreo y telecomunicaciones

#### **7.4.4. Otros elementos singulares**

A continuación se hace una sucinta enumeración del resto de elementos singulares que se ubican en una red de distribución:

- Enlaces entre alineaciones (codos, te, reducción, etc.).
- Válvulas de corte.
- Ventosas y purgadores.
- Desagües y purgas manuales.
- Válvulas de retención.
- Válvulas reguladoras de presión y caudal.
- Válvulas de sobrevelocidad o sobrepresión.
- Hidrantes.
- Dispositivos de riego y baldeo.
- Fuentes públicas.
- Cámaras de descarga.

- Estaciones de toma de muestras.
- Estaciones de adición de aditivos.
- Entradas de hombre y registros.
- Caudalímetros y contadores.

## 7.5. Criterios de diseño

El diseño de redes debe basarse en la funcionalidad del servicio que se ha de prestar al futuro usuario y en la racionalidad del uso del recurso.

En este sentido la red debe llevar el agua desde las fuentes de suministro y tratamiento, en cantidad suficiente, a los puntos de consumo, pero también tiene que cumplir otra serie de objetivos:

- Mantener la garantía de potabilidad.
- Limitar las pérdidas de agua.
- Capacidad de transportar y distribuir la demanda total.
- Asegurar una presión en el punto de destino.
- Evitar las erosiones en las tuberías y limitar las pérdidas de carga.
- Economía de instalación y conservación.
- Tener el mínimo posible de interrupciones del servicio a lo largo de la vida útil de la red.
- Poder medir y controlar todos los consumos que se deriven de la red y las posibles fugas.
- Maniobrar la red con facilidad, para corregir anomalías.

### 7.5.1. Topología

En primer lugar hemos de definir el tipo de red que se desea, (ramificada o mallada) bien en su conjunto, por su función o por áreas.

En conducciones de transporte interzonal y en aducciones hay que instalar válvulas de corte, a distancias de 1.000 a 3.000 diámetros. En otro caso cada vez que se haga una maniobra se puede desperdiciar mucha agua y se retrasan mucho las maniobras de llenado y vaciado.

También es necesario la colocación de válvulas de corte que aislen partes de la red urbana con el fin de que cada corte afecte a pocos usuarios. En Madrid, el Canal de Isabel II fija la máxima zona afectada en 1.500 habitantes o 5 Ha, pero es preferible zonas muchos menores.

Para posibilitar las maniobras de llenado, así como para poder evacuar agua o aire de la tubería en servicio, se deben colocar ventosas o purgadores en los puntos altos relativos o absolutos de cada tramo de corte, y desagües en los puntos bajos.

Las zonas de presión elevada han de disponer de reguladoras de presión para reducir y regularizar ésta. No se recomiendan las válvulas reductoras simples, puesto que no mantienen un servicio de características constantes, es mejor instalar dos válvulas en paralelo mediante un pantalán, para así posibilitar un adecuado mantenimiento.

Disposición de servicios en la vía pública:

SERVICIO	SEPARACION PLANTA	SEPARACION ALZADO
Alcantarillado	60 cm.	50 cm.
Gas	50 cm.	50 cm.
Electricidad alta	30 cm.	30 cm.
Electricidad baja	20 cm.	20 cm.
Señalización-semaforos	20 cm.	20 cm.
Telefonica	30 cm.	30 cm.

### 7.5.2. Diámetros mínimos y velocidades

Estadísticamente, para materiales iguales, el número de roturas por kilómetro aumenta conforme se reduce el diámetro.

Por este motivo y por la necesidad de unificar diámetros para minimizar el stock de piezas para la reparación de averías, la gran mayoría de empresas de abastecimiento tienen fijados unos diámetros mínimos de las tuberías a instalar.

En el caso de Madrid, el Canal de Isabel II tiene fijados los siguientes diámetros mínimos:

- En red:
  - 100 mm. para red urbana.
  - 150 mm. para zona industrial.
  - 80mm. en pequeños núcleos de menos de 5.000 habitantes.
  - 150 mm. para red urbana con hidrantes.
- En acometidas:
  - 20 mm. para unifamiliares.
  - 40 mm. para incendios.

La velocidad de diseño de una red viene en función de las demandas y diámetros de las tuberías.

La velocidad media mínima suele fijarse en 0,1 m/s con una permanencia máxima del agua en la red de 2 a 3 días.

La velocidad máxima viene limitada por las pérdidas de carga, que se ha de estudiar en el cálculo de la red y la erosión en las tuberías. Es muy habitual que estas velocidades máximas estén próximas a 1 m/s en conducciones de pequeño diámetro y no superen los 3 m/s en las de mayor calibre.

El Canal de Isabel II fija las siguientes velocidades máximas:

- Para diámetros mayores de 800mm  $v \leq 2,5$  m/seg
- Para diámetros entre 300 y 800mm  $v \leq 2,0$  m/seg
- Para diámetros menores de 300mm  $v \leq 2,1(D+0,2)-0,6$  D-diámetro en dm.

### 7.5.3. Presión de servicio

El axioma de que la calidad del servicio de distribución de agua aumenta proporcionalmente con la presión de suministro, está generalizado si bien la variable presión presenta un límite superior.

La presión de servicio de una red de distribución oscila notablemente de unos abastecimientos a otros, en función de la presión disponible respecto a la salida de la planta de tratamiento, la

orografía de la zona a abastecer, las características intrínsecas de la red y las necesidades a satisfacer de los clientes.

En Madrid, el Canal de Isabel II procura que la presión máxima en la red no exceda de 6 atm y la mínima no baje de 2,5 atm.

Las instalaciones interiores de los edificios deben probarse a 15 atm. y los fabricantes de electrodomésticos los garantizan hasta 6 atm.

#### **7.5.4. Consumos**

Junto con la topología de la red, la evaluación de consumos son los puntos de partida del diseño de una red.

Hay dos procedimientos para fijar el caudal de diseño de una instalación:

Valorar el caudal medio de la zona y afectarlo de un coeficiente de punta que lo aumenta.

Estimar el consumo máximo de cada elemento y a la suma total aplicar un coeficiente de simultaneidad que lo reduce.

Lo más frecuente es emplear el primer procedimiento para obtener el caudal de diseño de redes generales y el segundo para estimar el de las acometidas.

El segundo método no debe emplearse para dimensionar instalaciones que deben diseñarse para caudal medio.

Ambos procedimientos coinciden en el entorno de los 10 l/s.

Dado que la estadística de simultaneidades no es muy abundante y además da una gran dispersión de valores, la elección del diámetro mínimo, que en el caso del Canal de Isabel II es de 100 mm., sirve de apoyo y da una homogenización en la obtención del dimensionamiento de una red.

Los consumos medio anual o estacional pueden obtenerse de estadísticas de la región o de zonas de abastecimiento similares, contando con una previsión de la evolución de consumos y estableciendo un máximo probable para un horizonte de 20 años y aún superior en redes urbanas.

Los coeficientes de punta han de englobar una serie de factores tales como el coeficiente de estacionalidad, coeficiente semanal y el de punta instantánea.

Habitualmente se puede disponer de puntas diarias de consumo y distribución porcentual de los caudales, con ello se puede disponer de una punta solo superada estadísticamente un número de horas o minutos al año. Se suele fijar en 2 horas al año el tiempo en que se supere la punta prevista, hay que tener en cuenta que bajar este tiempo conduce a un aumento desproporcionado de las inversiones.

En zonas ocupadas sólo en temporada, la estadística es aún más enrevesada pero se puede aplicar en general valores finales análogos a los de otras similares con mayor ocupación.

Las empresas de abastecimiento tienen unas tablas para la determinación de dotaciones cuyo empleo puede ser meramente orientativo o de obligado cumplimiento. Así la establecida por el Canal de Isabel II es la siguiente:

DOTACIONES	
Viviendas Unifamiliares	
≤ 500 m <sup>2</sup> de 500 a 1.000 m <sup>2</sup> > 1.000 m <sup>2</sup>	2.000 l/vivienda y día 2.500 l/vivienda y día 3.500 l/vivienda y día
Viviendas Multifamiliares	
Area de densidad ≤ 40 Viv./ha Area de densidad > 40 Viv./ha	350 l/persona y día 300 l/persona y día
Polígono industrial	
Edificabilidad ≤ 0,5 m <sup>2</sup> /m <sup>2</sup> Edificabilidad > 0,5 m <sup>2</sup> /m <sup>2</sup>	1 l/s x Ha 0,7 l/s x Ha
Terciario	0,0001 l / s x M <sup>2</sup>
Hidrantés de 80 mm. Hidrantés de 100 mm.	500 l/minuto 1.000 l/minuto
Riegos: 1.800 m <sup>3</sup> /Ha y año. Caudal Punta 0,7 l/s x Ha	

FACTOR PUNTA EN RED	
Zona de vivienda	2,5
Zona de industria o comercio	3,0

### 7.5.5. Tipos de tubería

La elección del tipo o tipos de tubería con los que se va a configurar la red de distribución tiene también una repercusión muy considerable.

En primer lugar y ya para la fase del cálculo hidráulico, según el tipo de tubería que se emplee partiremos de unos coeficientes de rozamientos diferentes.

Las velocidades máximas han de ser tales que no produzcan erosión en las tuberías.

El material empleado ha de garantizar una adecuada resistencia, durabilidad y protección sanitaria, así como la necesidad de la existencia de piezas con las que se puede fácilmente proceder a subsanar las averías producidas en la red.

Partiendo de la distribución de precios unitarios en el ámbito de España, debe tenerse en cuenta que en una zona ya pavimentada, el coste de una renovación de red fácilmente triplica o más, al de una instalación nueva en tierra. En una instalación en tierra, la tubería puede suponer un 60% del coste y el tubo en sí un 40% como máximo, es decir que el ahorro en esta partida dejando una red menos duradera no se justifica.

## 7.6. Cálculos Hidráulicos

El cálculo hidráulico de una red de distribución se obtiene de la resolución de un sistema de ecuaciones, que plantean:

- el equilibrio de caudales.
- el equilibrio energético.

En la actualidad todo el procedimiento de cálculo se traduce en programas de ordenador, pero es fundamental el conocimiento del planteamiento teórico así como muy recomendable la comprobación numérica sencilla en nudos o tramos para la ratificación de los resultados obtenidos por el programa.

### 7.6.1. Hipótesis de cálculo

Se debe comenzar por fijar los datos numéricos de partida:

- Caudal punta

- Presión disponible en origen
- Velocidad máxima y mínima
- Presiones máxima y mínima en los puntos de consumo
- Distribución geométrica de caudales
- Rugosidad

No siempre es fácil fijar los puntos de consumo debido a indefinición de las edificaciones a la hora de realizar el cálculo, por ello la distribución de consumos, se suele hacer asignando valores a los tramos o nudos en que realmente se van a producir. Cuando este dato no está claro, se debe acudir a distribuirlo uniformemente por unidad de longitud de los ramales destinados a derivar acometidas.

En principio esto es suficiente, no teniendo desviaciones superiores al 5% entre la realidad y el cálculo de pérdidas de carga.

En cuanto al dato de rugosidad del tubo, habitualmente se consideran en tuberías de acero soldado sin pestañas o fundición de 0,05 mm., de partida pero se ven pronto incrementadas por incrustaciones y corrosiones hasta el milímetro y más.

En tuberías fundición revestida y en tuberías en general recubiertas de mortero centrifugado se pueden obtener rugosidades permanentes de 0,1mm. En tuberías revestidas de epoxi y tuberías plásticas sin irregularidades en las juntas el valor es de 7 micras y menos.

En aguas que puedan formar depósitos calcáreos, estas cifras y el calibre real se pueden ver muy alteradas, con el agua de Madrid en general no, salvo velocidades muy bajas.

La elección de la fórmula para la evaluación de las pérdidas de cargo no tiene una gran importancia, si bien la fórmula más exacta es la de Colebrook, las fórmulas exponenciales no se diferencian mucho. En la gama de las redes de distribución se aproxima bastante la de Hazen Williams.

Colebrook

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \log_{10} \left( \frac{k/D}{3,7} + \frac{2,51}{Re\sqrt{\lambda}} \right)$$

Darcy-Weisbach

$$h_f = f \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{v^2}{2g}$$

Hazen Williams

$$Q = 0,2785 * C * (Di)^{2,63} * S^{0,54}$$

### 7.6.2. Dimensionamiento

El primer paso para el dimensionamiento de una red es el trazarla en planta con el único objetivo de llegar a todos los puntos de suministro.

Los diferentes pasos que se han de dar hasta la obtención de la red general son:

- Definir las líneas de aducción y transporte interzonal caso de ser necesarias.
- Diseñar una red en árbol que llegue a los centros de gravedad de las áreas de consumo. Esta red se puede realizar aprovechando trazados que permitan suministrar a las acometidas, en el caso que la categoría jerárquica de la tubería lo consienta.
- Mellar la red principal.
- Trazar la totalidad de las tuberías evitando en lo posible testereros.
- Después de cada uno de estos pasos se va calculando la red lo que, hasta el paso 3, permite definir unívocamente los diámetros.
- La red básica se puede predimensionar hasta el paso 3 con caudales sobre el 80% del máximo de diseño.
- Ya en el punto 3 disponemos de una herramienta de simulación de un corte de agua, que es lo que va a forzar a que el cierre de la malla principal sea de calibres iguales o parecidos a los del árbol inicial.

En el punto 4, al trazar con diámetros mínimos y calcular el resultado suele ser suficiente con una comprobación. Además muchas veces se observa que se pueden reducir diámetros.

Todos estos cálculos hemos de realizarlos con las hipótesis de:

- Consumo punta.
- Consumo nulo o presión estática.
- Consumo punta con dos hidrantes funcionando.

En esta última hipótesis se permite reducir la presión mínima a 1,5 atms. y sin limitación de velocidad.

Estas hipótesis se pueden aumentar con supuestos de rotura, variación de la distribución de caudales entre los nudos, puntas inferiores, caudal medio, etc.

Por todo lo expuesto, se comprende que no existe ningún sistema que permita un dimensionamiento automático y sensato de la redes, por lo que para hacer éste hay que establecer un orden de trabajo y entrar en un proceso iterativo del que sólo se sale cuando el diseñador se siente satisfecho.

No debemos extrañarnos que dos técnicos con las mismas normas y bases de partida den dos soluciones que no se parecen demasiado, salvo de forma curiosa en el presupuesto total.

La influencia de las diferentes variables, y siempre que nos movamos en valores admisibles, están en el entorno siguiente:

- Esquema de la red 100%
- Calibres 90%
- Caudal total 70%
- Rugosidad 10%
- Fórmula 5%
- Distribución del caudal 5%

A título simplemente orientativo y como comparación, daremos el dato del diámetro de la malla principal con los supuestos de 3 l/s de caudal punta y dos hidrantes en ella:

- Superficie < 5 Ha. Ø 150 mm.

- Superficie < 16 Ha. Ø 200 mm.
- Superficie < 30 Ha. Ø 250 mm.
- Superficie < 50 Ha. Ø 300 mm.
- Superficie < 100 Ha. Ø 400 mm.

## BIBLIOGRAFÍA

- Manual Técnico del Agua, Editorial Degremont
- Abastecimiento y distribución de agua. Autor: Aurelio Hernández
- Abastecimiento de agua y alcantarillado. Autor: Ernest W. Steel
- Abastecimientos de agua potable. Autor: Juan M. Gómez Poncela
- Calidad del agua potable. Autor: N.F. Gray
- Tratamiento del agua por procesos de membrana. Autor: AWWA
- Manual del agua potable. Autor: Frank R. Spellman
- Manual de tratamiento de aguas. Autor: Departamento de Sanidad de New York
- Química del agua. Autor: J. Catalán Lafuente