

# 2010

ANTONIO ROS MORENO

H<sub>2</sub>O

## EL AGUA

El agua, una molécula simple y extraña, puede ser considerada como el líquido de la vida. Es la sustancia más abundante en la biosfera, dónde la encontramos en sus tres estados y es además el componente mayoritario de los seres vivos, pues entre el 65 y el 95% del peso de la mayor parte de las formas vivas es agua. De no haberse formado el agua no habría vida en el planeta, y su degradación puede acabar con todos los seres vivos.



## ***INDICE:***

### ***1.- CONCEPTOS GENERALES SOBRE EL AGUA***

- 1.1.-* Introducción
- 1.2.-* La composición del agua
- 1.3.-* Propiedades del agua
- 1.4.-* Origen del agua
- 1.5.-* El ciclo hidrológico
- 1.6.-* Distribución del agua

### ***2.- CALIDAD Y CONTAMINACIÓN DEL AGUA***

- 2.1.-* Introducción
- 2.2.-* Las aguas naturales
- 2.3.-* Calidad del agua
- 2.4.-* Parámetros de calidad de las aguas
- 2.5.-* Índices de calidad de las aguas
- 2.6.-* Aguas residuales

### ***3.- TRATAMIENTO DE AGUAS***

- 3.1.-* Introducción
- 3.2.-* Procesos básicos u operaciones unitarias
- 3.3.-* Niveles de tratamiento
- 3.4.-* Tratamiento de los fangos

### ***4.- PURIFICACIÓN Y TRATAMIENTO PARA AGUAS NATURALES Y RESIDUALES***

- 4.1.-* Introducción
- 4.2.-* Purificación de aguas de consumo
- 4.3.-* Tratamiento de aguas residuales
- 4.4.-* Otros sistemas de depuración

### ***5.- TRATAMIENTO DE AGUAS PARA USO INDUSTRIAL***

- 5.1.-* Introducción
- 5.2.-* Problemas derivados del uso del agua
- 5.3.-* Tratamientos de agua para generadores de vapor
- 5.4.-* Tratamiento de aguas de refrigeración

### ***6.- DESALACIÓN DE AGUA***

- 6.1.-* Introducción
- 6.2.-* El agua a desalar
- 6.3.-* Pretratamientos en desalación
- 6.4.-* Técnicas de desalación

## ***BIBLIOGRAFÍA.***



*“Todo ser humano, ahora y en el futuro, debería disponer de suficiente agua limpia para beber y para higiene, y suficiente comida y energía a un costo razonable. Proporcionar agua suficiente para estas necesidades debe conseguirse de una manera equitativa que esté en armonía con la naturaleza. Porque el agua es la base de todos los ecosistemas y habitats vivos y forma parte de un ciclo hidrológico inmutable que debe respetarse para que el desarrollo de la actividad y bienestar humano sea sostenible.”*

**Comisión Mundial del Agua Siglo XXI**



## 1. CONCEPTOS GENERALES SOBRE EL AGUA

### 1.1. Introducción

La creciente importancia que tiene la conservación de los recursos naturales ha despertado en el hombre, la búsqueda de métodos para cuidarlos y recuperarlos, para que puedan ser aprovechados por los seres vivos; de aquí que uno de los recursos de vital importancia para el hombre, como lo es el agua, sea objeto de estudio.

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

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

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

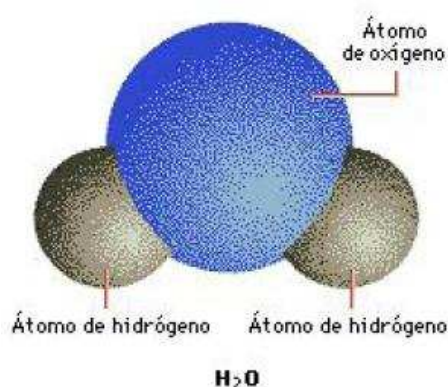
Pero aunque esa tendencia es previsible que vaya a continuar en las próximas décadas, a principios del presente siglo debemos ser más optimistas que hace 50 años, puesto que, al menos en el mundo desarrollado, ya se dispone de medios tecnológicos que pueden servir para paliar sus efectos.

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

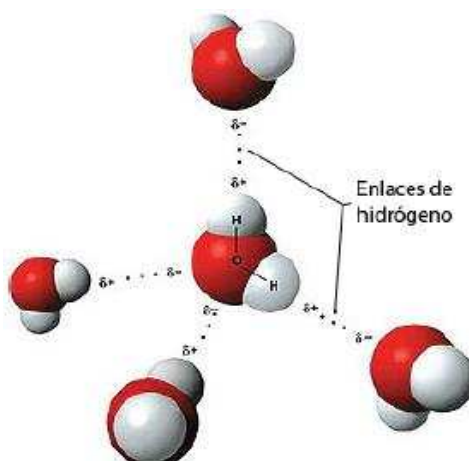
El ahorro de agua en los sectores más consumidores, la utilización de tecnologías de riego avanzadas, la depuración de aguas para evitar la contaminación, y por último la *desalación* como forma de incrementar los recursos hídricos permiten un desarrollo adecuado al margen de esa dependencia del agua,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

## 1.2. La composición del agua

El agua es un componente de nuestra naturaleza que ha estado presente en la Tierra desde hace más de 3.800 millones de años, ocupando tres cuartas partes de la superficie del planeta. La molécula de agua ( $\text{H}_2\text{O}$ ) está formada por dos átomos de hidrógeno y un átomo de oxígeno. Estos átomos no se encuentran alineados sino que se disponen formando un ángulo de  $104,5^\circ$ . Este valor se ha podido determinar mediante diversas técnicas como la difracción de rayos X, espectroscopia infrarroja, etc. El agua por tanto es una *molécula angular* donde cada átomo de hidrógeno se une al átomo de oxígeno mediante un enlace covalente, que se forma al compartir un par de electrones.



Los electrones compartidos en los enlaces covalentes están más cerca del átomo de oxígeno que de los átomos de hidrógeno, al ser el oxígeno más electronegativo y atraer con mayor intensidad el par de electrones del enlace. Como consecuencia, habrá una *carga parcial negativa* ( $\delta^-$ ) sobre el átomo de oxígeno y una *carga parcial positiva* ( $\delta^+$ ) sobre los átomos de hidrógeno. El enlace formado es un enlace covalente polar y la molécula de agua se comporta como un *dipolo*. Este carácter dipolar hace que exista una gran atracción entre las moléculas de agua y se unen entre sí por enlaces de puentes de hidrógeno.





Aunque son uniones débiles, el hecho de que alrededor de cada molécula de agua se dispongan otras cuatro moléculas unidas por puentes de hidrógeno permite que se forme en el **agua** (líquida o sólida) una estructura de tipo reticular, responsable en gran parte de su comportamiento anómalo y de la peculiaridad de sus propiedades fisicoquímicas.

### 1.3. Propiedades del agua

El agua puede existir, al igual que toda materia, en estado sólido (hielo), líquido y gaseoso (vapor). La estructura de la molécula de agua y en especial, la unión mediante enlaces de hidrógeno, como hemos visto, le confiere unas propiedades físicas y químicas que pueden calificarse de excepcionales, y permiten explicar muchos fenómenos que suceden en el planeta. Este conjunto de propiedades únicas y diferentes (elevado calor específico, tensión superficial más elevada que cualquier otro líquido, disociación de la molécula de agua, etc.) son las que hacen que el agua sea una sustancia muy activa químicamente y el disolvente universal, por ello en la naturaleza el agua nunca es pura, siempre va a tener sustancias disueltas.

Entre las principales propiedades de agua se encuentran las siguientes:

a) **Físicas.** El agua pura es un líquido inodoro, insípido, transparente y prácticamente incoloro pues sólo en grandes espesores presenta un tono débilmente azulado o azul-verdoso. El hielo también tiende al azul y en estado gaseoso (vapor de agua) es incolora. En la tabla adjunta se resumen las propiedades físicas del agua químicamente pura.

#### PROPIEDADES FÍSICAS DEL AGUA

	...		...	
Peso molecular	...	18,016	Presión crítica	218,4 atm
Punto de congelación	...	0°C (32°F)	Calor de fusión	79,7 cal/g
Punto de ebullición	...	100°C (212°F)	Calor de vap. A 100°C	539,5 cal/g
Temperatura crítica		374,2°C	Calor específico	1 cal/g. °C

La densidad del agua aumenta anormalmente al elevar la temperatura de 0°C a 4°C (exactamente 3,98°C) en que alcanza su valor máximo de 1 g/ml. Por encima o por debajo de esta temperatura el agua se dilata y la densidad disminuye según se observa en la tabla siguiente en la que se incluye la densidad del hielo con fines comparativos.

**DENSIDAD ABSOLUTA DEL AGUA**

<b>Temperatura</b>	<b>Densidad (g/ml)</b>	<b>Temperatura</b>	<b>Densidad (g/ml)</b>
0°C (Hielo)	0,91700	5°C (Agua)	0,99999
-10°C (Agua)	0,99815	6°C »	0,99997
-5°C »	0,99930	7°C »	0,99993
0°C »	0,99987	10°C »	0,99973
1°C »	0,99993	15°C »	0,99913
2°C »	0,99997	20°C »	0,99823
3°C »	0,99999	50°C »	0,98807
4°C »	1,00000	100°C »	0,95838

El agua tiene una capacidad calorífica superior a la de cualquier otro líquido o sólido con excepción del litio por encima de los 100°C o del hidruro de litio a 50°C. A 14,5°C el agua tiene, por definición, un calor específico de 1, el cual no cambia prácticamente al variar la temperatura.

Los calores latentes de vaporización y fusión, indicados en la tabla anterior de las propiedades físicas del agua, son también excepcionalmente elevados.

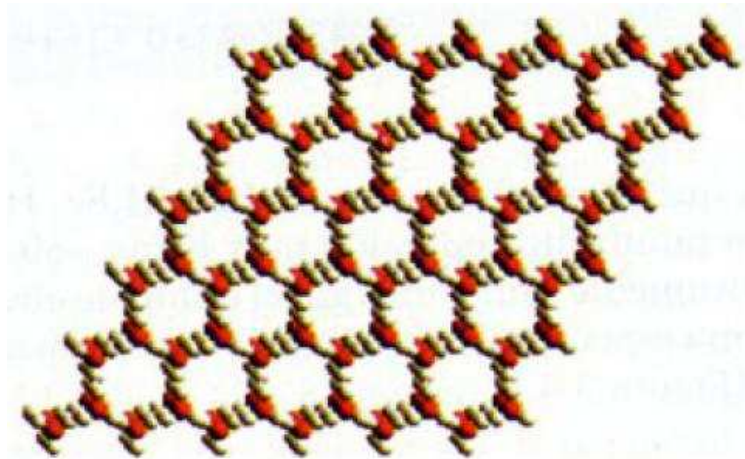
Otra propiedad anormal del agua es su expansión considerable al pasar al estado sólido. El agua congelada a 0°C y se convierte en hielo y como la densidad disminuye, es igual a 0,917 g/ml, el hielo que se forma flota sobre el agua. Este fenómeno es sumamente raro puesto que casi todas las demás sustancias se contraen al solidificarse. El comportamiento especial del agua es muy conveniente pues si ocurriese con ella lo mismo que con la inmensa mayoría de líquidos, nuestros lagos y ríos e incluso los mares se congelarían en el fondo y probablemente seguirían así en los meses de verano lo cual imposibilitaría toda vida marina.

El comportamiento especial del agua en lo que respecta a la variación anormal de la densidad entre 0—4°C y en los valores elevados de los calores latentes de fusión y de vaporización, puede explicarse mediante la asociación de sus moléculas determinada en parte por el carácter polar de las mismas y fundamentalmente por el enlace de puentes de hidrógeno. Esta asociación molecular permitió explicar los elevados puntos de fusión y de ebullición del agua mucho más altos de los que deberían esperarse por su fórmula molecular sencilla.

Los enlaces de puente de hidrógeno explica también la estructura abierta del hielo y, en consecuencia, su menor densidad. En el hielo, las moléculas de agua están distribuidas en un retículo espacial en el que cada átomo de oxígeno está unido a otros cuatro átomos a través de puentes de hidrógeno dispuestos asimétricamente por lo que

las moléculas de agua mantienen su individualidad. Los enlaces de cada átomo de oxígeno están dirigidos tetraédricamente siendo sensiblemente iguales por lo que cada molécula de agua está rodeada únicamente por otras cuatro determinando una estructura muy abierta. Cada seis átomos de oxígeno forman un anillo espacial, rodeado por otros seis en una simetría hexagonal. Al fundir el hielo se rompen la mayoría de los enlaces de hidrógeno teniendo el agua una mayor densidad pero quedan aún fragmentos microcristalinos que se van rompiendo al calentar el agua desde 0°C a 4°C., esta ruptura adicional de enlaces de hidrógeno explica el aumento de densidad en este intervalo de temperatura.

Estructura tridimensional del hielo



La interacción entre los diferentes dipolos eléctricos de una molécula de agua causa una atracción en red que explica el elevado índice de tensión superficial del agua. La fuerza de interacción de la tensión superficial del agua es la fuerza de van der Waals entre moléculas de agua. La aparente elasticidad causada por la tensión superficial explica la formación de ondas capilares. A presión constante, el índice de tensión superficial del agua disminuye al aumentar su temperatura. También tiene un alto valor adhesivo gracias a su naturaleza polar

La capilaridad se refiere a la tendencia del agua de moverse por un tubo estrecho en contra de la fuerza de la gravedad. Esta propiedad es aprovechada por todas las plantas vasculares, como los árboles.

Esta propiedad deriva de la tendencia a formar enlaces de hidrógeno entre las moléculas de agua (cohesión) y de éstas con otras moléculas polares (adhesión), lo que hace al agua responsable de todos los fenómenos relacionados con la capilaridad.

El agua pura tiene una conductividad eléctrica relativamente baja, pero ese valor se incrementa significativamente con la disolución de una pequeña cantidad de material iónico, como el cloruro de sodio.

El agua bloquea sólo ligeramente la radiación solar UV fuerte, permitiendo que las plantas acuáticas absorban su energía.





b) *Químicas*. El agua tiene una gran importancia como medio en el que se verifican numerosísimos procesos químicos. Todas las reacciones asociadas con la vida vegetal o animal necesitan la presencia del agua para proseguir dentro del organismo viviente. Hasta la putrefacción de la materia animal o vegetal provocada por bacterias requiere la presencia de humedad. Las frutas, verduras y carnes desecadas tardan mucho tiempo en descomponerse y, por ello, la desecación de los alimentos constituye el método más económico e importante para conservarlos.

Muchas reacciones no se verifican o bien transcurren con velocidad muy pequeña si no existen al menos indicios de agua la cual actúa catalíticamente en cadena de reacciones que determinan el correspondiente proceso.

El agua puede descomponerse en partículas de hidrógeno y oxígeno mediante electrólisis.

El agua es un compuesto fuertemente exotérmico pues su calor de formación es igual a 68.320 calorías por mol y, en consecuencia, será un compuesto muy estable requiriendo para descomponerse grandes cantidades de energía. Como un óxido de hidrógeno, el agua se forma cuando el hidrógeno —o un compuesto conteniendo hidrógeno— se quema o reacciona con oxígeno —o un compuesto de oxígeno—. El agua no es combustible, puesto que es un producto residual de la combustión del hidrógeno. La energía requerida para separar el agua en sus dos componentes mediante electrólisis es superior a la energía desprendida por la recombinación de hidrógeno y oxígeno. Esto hace que el agua, en contra de lo que sostienen algunos rumores, no sea una fuente de energía eficaz.

El agua pura tiene la capacidad de disociarse en iones, por lo que en realidad se puede considerar una mezcla de:

- agua molecular ( $H_2O$ )
- protones hidratados ( $H_3O^+$ )
- iones hidroxilo ( $OH^-$ )

En realidad esta disociación es muy débil en el agua pura, y así el producto iónico del agua a 25°C es:

$$K_w = [H^+][OH^-] = 1,0 \times 10^{-14}$$



Este producto iónico es constante. Como en el agua pura la concentración de hidrogeniones y de hidroxilos es la misma, significa que la concentración de hidrogeniones es de  $1 \times 10^{-7}$ . Para simplificar los cálculos Sörensen ideó expresar dichas concentraciones utilizando logaritmos, y así definió el pH como el logaritmo decimal cambiado de signo de la concentración de hidrogeniones.

El agua es un disolvente muy potente, al que se ha catalogado como el disolvente universal, y afecta a muchos tipos de sustancias distintas. Las sustancias que se mezclan y se disuelven bien en agua —como las sales, azúcares, ácidos, álcalis, y algunos gases (como el oxígeno o el dióxido de carbono, mediante carbonación)— son llamadas *hidrófilas*, mientras que las que no combinan bien con el agua —como lípidos y grasas— se denominan sustancias *hidrofóbicas*. Todos los componentes principales de las células de proteínas, ADN y polisacáridos se disuelven en agua. Puede formar un azeótropo con muchos otros disolventes.

El agua es miscible con muchos líquidos, como el etanol, y en cualquier proporción, formando un líquido homogéneo. Por otra parte, los aceites son *inmiscibles* con el agua, y forman capas de variable densidad sobre la superficie del agua. Como cualquier gas, el vapor de agua es miscible completamente con el aire.

Los elementos que tienen mayor electropositividad que el hidrógeno —como el litio, el sodio, el calcio, el potasio y el cesio— desplazan el hidrógeno del agua, formando hidróxidos. Dada su naturaleza de gas inflamable, el hidrógeno liberado es peligroso y la reacción del agua combinada con los más electropositivos de estos elementos es una violenta explosión.

El agua se une a un gran número de óxidos (combinaciones del oxígeno con los elementos) dando lugar a los ácidos y bases, y se une también a otros muchos compuestos, especialmente sales, formando hidratos, en los que el agua mantiene su individualidad molecular.

El agua da lugar también con muchas sustancias a reacciones de doble descomposición que reciben el nombre de hidrólisis. De interés especial es la hidrólisis de diversas sales o de sus iones y que origina disoluciones ácidas o básicas.

Actualmente se sigue investigando sobre la naturaleza de este compuesto y sus propiedades, a veces traspasando los límites de la ciencia convencional. En este sentido, el investigador John Emsley, divulgador científico, dijo en cierta ocasión del agua que "(Es) una de las sustancias químicas más investigadas, pero sigue siendo la menos entendida".

## 1.4. Origen del agua

En la actualidad se plantean **dos teorías** sobre el origen del agua en la Tierra: la teoría volcánica, y la teoría extraterrestre de los meteoritos transportadores de agua. Ambas teorías siguen discutiéndose por las escuelas de científicos que toman una u otra posición, aunque actualmente se ha visto que lo más razonable es aceptar ambas teorías ya que una complementa a la otra.

La **teoría volcánica** plantea que el agua se formó en el centro de la Tierra, por reacciones a altas temperaturas (800 °K) entre átomos de hidrógeno y oxígeno. Las moléculas formadas por esta reacción fueron expelidas a la superficie terrestre en forma de vapor (por la temperatura a la que se encontraban); algo de este vapor de agua pasó a formar parte de la atmósfera primitiva (esta atmósfera primitiva carecía de oxígeno molecular), y otra parte se enfrió y condensó para formar el agua líquida y sólida de la superficie terrestre. Este proceso tomó millones de años, pero las evidencias experimentales que se tienen actualmente plantean que el agua está presente en la Tierra hace unos 3.800 millones de años.

La **teoría** más reciente atribuye el origen del agua a causas **extraterrestres**. Numerosos estudios realizados por la NASA apoyan los planteamientos de Tobias, Mojzsis y Scienceweek quienes afirman que el agua llegó a la Tierra en forma de hielo, en el interior de numerosos meteoritos, que al impactar sobre la superficie terrestre liberaron este compuesto y llenaron los océanos (o al menos parte de ellos).

Cuando esta teoría fue planteada recibió una gran cantidad de críticas y censuras, pero estudios referidos por Mojzsis hablan de otros impactos de meteoritos sobre la Tierra, a los cuales se atribuye el haber contribuido con concentraciones significativas de otros elementos y moléculas químicas a la «sopa» donde se originaron las macromoléculas orgánicas y los coacervados. Posteriormente, científicos de la NASA han comunicado algunos descubrimientos que constituyen la primera evidencia sólida para este suceso: análisis del cometa S4 LINEAR han mostrado una similitud muy grande entre la composición y estructura química de éste con el agua que actualmente existe en los océanos de la Tierra, así como estudios de presencia de deuterio (D), átomos de hidrógeno con un neutrón extra, característicos de este tipo de cometas, inclusive en las profundidades de los mares, siendo que el D<sub>2</sub>O se encuentra en toda el agua —independientemente del tipo de cuerpo de agua o la profundidad— en una relación natural aproximada de 99,85% de H y 0,15% de D.

Si bien ambas teorías son muy distintas y tienen poco en común, **ambas todavía dejan algunas dudas sobre su validez**, ya que ninguna de ellas explica del todo el origen del agua en el planeta. La teoría volcánica habla de una hidrogenéisis masiva en el centro de la Tierra, proceso que fue desarrollándose paralelamente a la formación de la atmósfera primitiva, por lo que una parte considerable del agua generada por las



reacciones químicas tuvo que evaporarse hacia el espacio o reaccionar con otros compuestos de la atmósfera primitiva.

Por otro lado, si bien la presencia de hielo en algunos planetas, la luna y algunos cometas apoya la teoría extraterrestre, los niveles de xenón presentes en la atmósfera terrestre son diez veces mayores que los presentes en los cometas, aunque se debe considerar que esta variación puede estar influenciada por las condiciones de gravedad en la Tierra que son diferentes a las de los cometas, y que el xenón —como gas noble— no sufre reacciones químicas y no puede ser fijado como compuesto. En este caso la interpretación de la cantidad de xenón puede ser usada como prueba tanto para aceptar como para refutar la teoría extraterrestre, dependiendo de cómo se interpreten estos hallazgos.

Las consideraciones anteriores sugieren, según Tobias, que **el agua en la Tierra no fue originada por una sola causa**, sino que más bien debería pensarse en un hipotético origen mixto, ya que de esta manera se complementan ambas teorías bajo un postulado lógico y coherente: parte del agua se originó en la Tierra por reacciones a elevadas temperaturas y erupciones volcánicas, y la otra parte provino de los cometas. Esta idea concuerda también con el planteamiento de que la atmósfera y los océanos se desarrollaron juntos.

Sin embargo, tampoco existen pruebas contundentes para aceptar plenamente el origen mixto, y quedan abiertas las puertas al planteamiento de otras nuevas teorías.

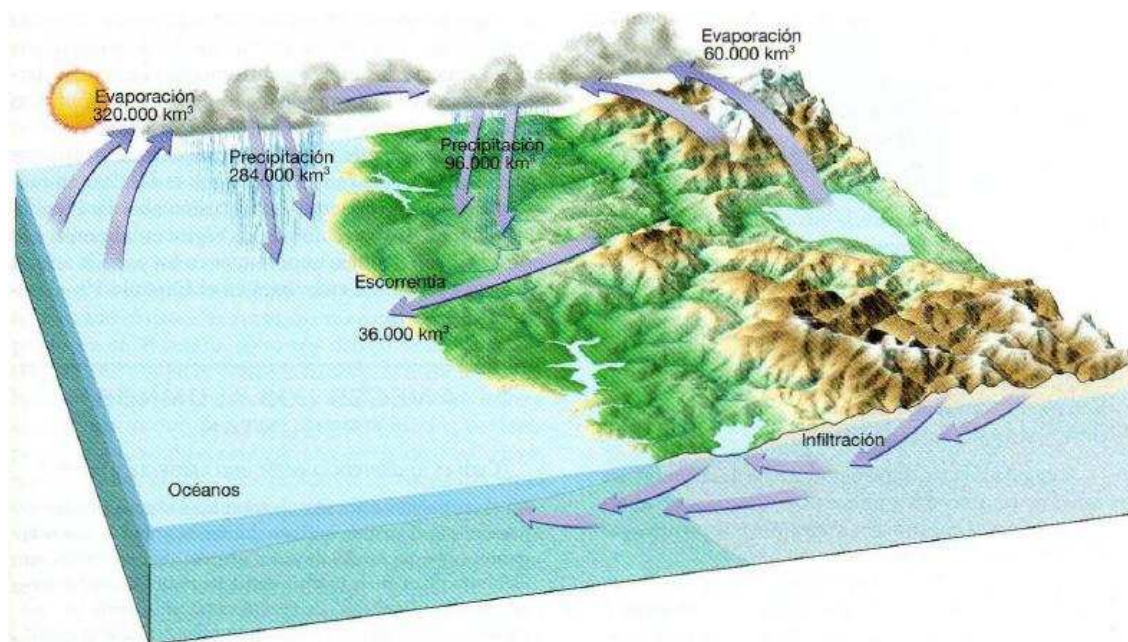
En definitiva, la aparición del agua en el planeta —tanto por causas volcánicas como por causas estelares— fue el requisito esencial para que se originara la vida, ya que sin este medio y solvente universal no habría sido posible el complejo conjunto de reacciones químicas que formaron las biomoléculas que dieron origen a los coacervados y posteriormente a las primeras células.

## 1.5. El ciclo hidrológico

El agua puede cambiar rápidamente de un estado de materia (sólido, líquido o gaseoso) a otro a las temperaturas y las presiones existentes en la superficie de la Tierra. Por consiguiente, el agua se está moviendo constantemente entre la hidrosfera, la atmósfera, la tierra sólida y la biosfera. Esta circulación interminable del suministro de agua de la Tierra se denomina *ciclo hidrológico* o ciclo del agua en estado natural. El ciclo nos muestra muchas interrelaciones cruciales entre partes diferentes del sistema Tierra.

El ciclo hidrológico es un sistema mundial gigantesco impulsado por la energía del sol, en el cual la atmósfera proporciona el nexo vital entre los océanos y los continentes. El agua se evapora en la atmósfera desde el océano y, en un grado mucho

menor, desde los continentes. Los vientos transportan este aire cargado de humedad, a menudo a grandes distancias, hasta que las condiciones hacen que la humedad se condense en nubes y caiga como precipitación. La precipitación que cae en el océano ha completado su ciclo y está dispuesta a empezar otro. El agua que cae en el continente, sin embargo, debe completar su camino de vuelta al océano.



Del agua que cae en el continente: Una parte del agua penetra en el suelo (infiltración) y se mueve hacia abajo, luego en dirección lateral y, por fin, rezuma en los lagos, los ríos o directamente en el océano. Cuando la velocidad de caída de la lluvia es mayor que la capacidad del suelo para absorberla, el agua adicional fluye sobre la superficie en lagos y corrientes, un proceso denominado escorrentía. Gran parte del agua que se infiltra o se escurre acaba por encontrar la manera de volver a la atmósfera por medio de la evaporación desde el suelo, los lagos y las corrientes. Además, una parte del agua que se infiltra en el suelo es absorbida por las plantas, que después la liberan a la atmósfera. Este proceso se denomina transpiración (*trans* = a través; *spiro* = respirar). El resto de los seres vivos, aunque en menor medida, también transpiramos y respiramos, liberando vapor de agua a la atmósfera.

El tiempo de residencia medio del agua en la atmósfera es del orden de 8 a 9 días, mientras que en el mar es del orden de 4000 años.

En cuanto al cálculo de la cantidad total de agua en la Tierra y en los numerosos procesos del ciclo hidrológico, ha sido tema de exploración científica desde la segunda mitad del siglo XIX. Sin embargo, la información cuantitativa es escasa, particularmente en los océanos, lo cual significa que las cantidades de agua en varios componentes del ciclo hidrológico global todavía no se conocen en forma precisa.



El *balance hidrológico* general de la Tierra, o el volumen de agua que pasa al año por cada parte del ciclo es aproximadamente el siguiente: Anualmente, la energía solar evapora alrededor de 320.000 a 456.000 kilómetros cúbicos de agua de los océanos, mientras que la evaporación en los continentes (incluidos lagos y corrientes) contribuye con 60.000 a 62.000 kilómetros cúbicos de agua. De este total de 380.000 a 518.000 kilómetros cúbicos de agua, unos 284.000 a 410.000 kilómetros cúbicos caen de nuevo en el océano, y los 96.000 ó 108.000 kilómetros cúbicos restantes caen en la superficie terrestre. De estos 96.000 ó 108.000 kilómetros cúbicos, sólo 60.000 ó 62.000 se evaporan desde el continente, dejando de 36.000 a 46.000 kilómetros cúbicos de agua que erosionan el terreno durante su viaje de vuelta a los océanos. La cantidad de vapor de agua que hay en el aire es tan *sólo* una diminuta fracción del abastecimiento de agua total de la Tierra.

Es importante saber que el ciclo hidrológico está en equilibrio. Dado que el vapor de agua total de la atmósfera permanece aproximadamente igual, la precipitación anual media sobre la Tierra debe ser igual a la cantidad de agua evaporada. Sin embargo, si se consideran juntos todos los continentes, la precipitación excede a la evaporación. A la inversa, sobre los océanos, la evaporación supera a la precipitación. Dado que el nivel de *los* océanos mundiales no está disminuyendo, el sistema debe estar en equilibrio.

En resumen, el ciclo hidrológico representa la circulación continua del agua de los océanos a la atmósfera, de la atmósfera a los continentes y, desde los continentes, de vuelta al mar.

Por otra parte, las fuerzas gravitacionales y la energía solar constituyen las principales fuerzas motrices del ciclo hidrológico. La gravedad afecta la circulación de los ríos y aguas subterráneas, mientras que el resto del ciclo hídrico es determinado por la energía solar. La absorción de dicha energía genera evaporación de las aguas superficiales, tanto continentales como oceánicas. Además, una pequeña fracción de la energía solar incidente, genera los vientos y las corrientes, que ayudan a la circulación de la atmósfera y las masas de agua.

La energía absorbida a la forma de calor latente durante la evaporación, es liberada durante la condensación, por lo que estos flujos hídricos son también vehículos de transporte de energía desde una región a otra. El efecto neto de esta transferencia de energía es una reducción de las diferencias de temperatura entre las diferentes zonas de la Tierra.

Otro efecto adicional del ciclo hidrológico, deriva de la gran capacidad solvente del agua. La lluvia absorbe aquellos compuestos solubles presentes en la atmósfera, tales como: O<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub> y óxidos de S y N. Esto último puede incrementar significativamente la acidez de las lluvias. A su vez, la escorrentía debida a las precipitaciones, disuelve los compuestos solubles del suelo y las rocas, proceso que es



facilitado a bajo pH. Como resultado de esto, la escorrentía que llega a los ríos, lagos y mares, es rica en compuestos disueltos, que luego pueden formar compuestos insolubles, y precipitar o sufrir nuevas transformaciones químicas.

Los aerosoles de agua de mar generados por acción del viento y las olas, son arrastrados por los vientos tierra adentro, donde son depositados por acción de las lluvias o la nieve o como depósitos secos, representando una importante fuente de sodio y cloro.

A lo largo de todo este proceso, la tierra, los ríos y humedales y otras masas de agua, hacen el papel de enormes depuradoras naturales. Sin embargo, su buen funcionamiento depende mucho de la acción del hombre.

### 1.5.1. El ciclo integral del agua

El ser humano necesita disponer de agua con una cierta calidad y características. Además necesita de ella en momentos y lugares determinados. Para ello desde siempre ha ideado y perfeccionado una serie de sistemas que le permitieran sacar aún más provecho del ciclo natural o hidrológico del agua que acabamos de ver. A este ciclo del agua influido por la actividad humana es lo que llamamos *ciclo integral del agua*.



En resumen, el hombre intenta modificar el ciclo hidrológico para aprovechar mejor y disponer de más agua dulce, evitando los desequilibrios temporales y espaciales de la distribución del agua.



Modificaciones basadas en:

- Disminución de la evaporación
- Aumento de la condensación (mas precipitación)
- Disminución de la escorrentía

Ejemplos de la intervención humana:

- Presas, embalses
- Control de la explotación de acuíferos y recargas artificiales
- Recolección del rocío de los campos
- Transvase entre cuencas
- Desalación de agua del mar
- Lluvia artificial
- Embalses cubiertos
- Canalización de ríos

El ciclo integral del agua comprende varios procesos:

a) **La extracción:** aprovechamiento de las aguas subterráneas (pozos), la derivación de caudales de las aguas superficiales (canales) e incluso la desalación del agua de mar.

Se estima que las aguas subterráneas son “100 veces más abundantes que las aguas superficiales” (sin contar los casquetes polares). Sin embargo, la mayor parte de esas aguas se encuentra a más de 800 metros de profundidad y, por tanto, no es posible utilizarlas para cubrir las demandas existentes. Son las aguas subterráneas menos profundas las que sí podemos aprovechar.

En España, por ejemplo, el 22% de las demandas de agua se cubren con aguas subterráneas, aunque este porcentaje varía mucho de unas comunidades a otras.

Los *trasvases* se utilizan para transportar el agua desde una cuenca hidrográfica con excedentes de agua a otra con déficit. El impacto en el paisaje de estas conducciones es muy elevado.

La desalación del agua de mar trata de obtener agua potable o para uso agrícola a partir del agua del mar. Consiste en eliminar el exceso de sales y se realiza en plantas desalinizadoras, en zonas próximas al mar y que padecen escasez de agua dulce.





**b) *El almacenamiento y canalización*** tanto de las aguas subterráneas como de las superficiales.

El almacenamiento de agua bruta se hace necesario cuando la fuente de agua no tiene un caudal suficiente durante todo el año para suplir la cantidad de agua necesaria. Para almacenar el agua de los ríos o arroyos que no garantizan en todo momento el caudal necesario se construyen embalses.

Una presa o embalse es un vaso de almacenamiento que sirve para regular los escurrimientos de un río, es decir, para almacenar el volumen de agua que escurre en exceso en las temporadas de lluvia para posteriormente usarlo en las épocas de sequía, cuando los escurrimientos son escasos.

En los sistemas que utilizan agua subterránea, el acuífero funciona como un verdadero tanque de almacenamiento, la mayoría de las veces con recarga natural, sin embargo hay casos en que la recarga de los acuíferos se hace por medio de obras hidráulicas especiales.

La etapa de conducción del abastecimiento está constituida por todas aquellas tuberías de tamaño importante que transportan el agua desde las fuentes de abastecimiento hasta los núcleos urbanos. Se incluye dentro de esta definición tanto las aducciones por gravedad como las aducciones de bombeo, así como el conjunto de conducciones que llevan el agua desde la fuente de captación hasta el sistema de tratamiento y las que llevan el agua desde dicho sistema de tratamiento a los depósitos de cabecera de la red.

La tradición histórica de este tipo de instalación sugiere un transporte en lámina libre (circulación por canales). No obstante, es cada vez mayor el uso y empleo de estos sistemas en sistemas a presión. Es lo que comúnmente se denomina sistemas de abastecimiento en alta.

**c) *Su tratamiento*** para conseguir la calidad que cada uso requiere (consumo humano, riego, limpieza,...).

De nada le sirve al hombre ingeniar grandes obras capaces de capturar y almacenar enormes cantidades de agua si su calidad no es la adecuada.

Cada uso que damos al agua requiere una calidad distinta de este recurso y recibe por ello un tratamiento diferente, tanto antes como después de su utilización. Solemos distinguir los usos del agua en tres grandes grupos: agrícola, industrial y urbano.



Normalmente, se conduce a una planta potabilizadora, donde se limpia y desinfecta con el fin de hacerla apta para el consumo humano. De este modo se eliminan todos los gérmenes patógenos como bacterias o virus que transmiten enfermedades.

**d) *Su distribución*** en la red urbana, industrial o agrícola.

Desde las estaciones de tratamiento de agua potable, a través de una enorme red de tuberías de distribución, el agua es llevada hasta depósitos de regulación. Estos depósitos suelen ser subterráneos, y contienen el agua necesaria para abastecer durante un día a toda la población que tenga asignada: en las pequeñas poblaciones, por ejemplo, un depósito regulador suele ser suficiente; en cambio, en las grandes poblaciones, un solo depósito sólo puede abastecer a algunos barrios.

Desde esos depósitos, el agua se distribuye por tuberías y cañerías hasta llegar a los puntos de uso.

**e) *La recogida de las aguas*** ya utilizadas, llamadas aguas residuales, **y su depuración.**

Las aguas residuales son generadas por residencias, instituciones y locales comerciales e industriales. Éstas pueden ser tratadas dentro del sitio en el cual son generadas (por ejemplo: tanques sépticos u otros medios de depuración) o bien pueden ser recogidas y llevadas mediante una red de tuberías - y eventualmente bombas - a una planta de tratamiento municipal. Los esfuerzos para recolectar y tratar las aguas residuales domésticas de la descarga están típicamente sujetos a regulaciones y estándares locales, estatales y federales (regulaciones y controles). A menudo ciertos contaminantes de origen industrial presentes en las aguas residuales requieren procesos de tratamiento especializado.

La contaminación urbana es menos agresiva que la industrial y, al igual que la de origen agrícola, es mayoritariamente de tipo orgánico. Sin embargo, mientras la contaminación agrícola es dispersa, la urbana confluye, desde el alcantarillado hasta las estaciones depuradoras, en puntos muy localizados. Por esta razón es posible depurar, a corto plazo, el 100% de las aguas residuales urbanas.

Así, una vez depuradas, las aguas residuales vuelven a los torrentes y ríos o se vierten directamente al mar, si se trata de núcleos urbanos costeros.

Cuando el agua, una vez utilizada, vuelve a su medio natural, no ha de comprometer los usos posteriores, tanto públicos como privados, que se pueden hacer de ella.



### **f) La reutilización.**

La reutilización es el resultado de la búsqueda de nuevas soluciones para cubrir las demandas hídricas. Consiste en destinar las aguas depuradas a usos que requieran menor calidad que la primera utilización, ya que las aguas depuradas raramente recuperan la calidad inicial.

Cada vez más, las aguas depuradas urbanas se emplean para riego agrícola, reduciendo así las extracciones necesarias para este sector.

Otra posibilidad de la reutilización es la de las aguas grises o procedentes de las bañeras, lavabos y piscinas, que pueden destinarse a usos que no requieren agua potable, como las cisternas, la limpieza en las calles y el riego de zonas verdes y campos de golf. En muchos municipios se utilizan ya aguas no potables reutilizadas para estas tareas.

## **1.6. Distribución del agua**

El total del agua presente en el planeta, en todas sus formas, se denomina hidrosfera. El agua es la sustancia más abundante de la biosfera, no debemos olvidar que tres cuartas partes (71%) de la superficie terrestre están cubiertas de agua, encontrándose además en sus tres estados: sólido (casquetes polares, glaciares, nieve, etc.), líquido (océanos, mares, ríos, aguas subterráneas, etc.), y gaseoso, en forma de vapor de agua, en la atmósfera. Sin embargo, su disponibilidad no es siempre fácil, de hecho sólo se puede acceder con facilidad a un 0,9%, lo que en algunos casos puede llegar a limitar la productividad de los ecosistemas terrestres, sobre todo en las regiones con climas secos. Por otra parte, el agua salada sustenta importantes cadenas alimenticias claves para la alimentación mundial, además, vive en ella una vegetación muy pequeña que es la que aporta más de un 60% del oxígeno de la Tierra.

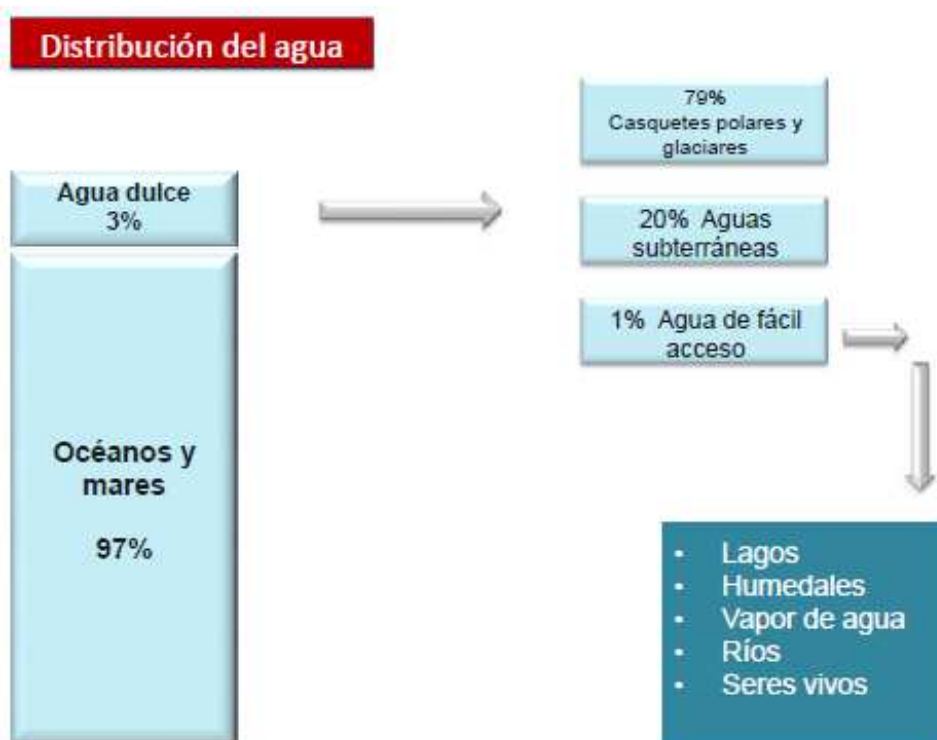
Actualmente, hay en la Tierra la misma cantidad de agua que existía hace 3.800 millones de años atrás, época en que se formó el agua en nuestro planeta. Esto se debe a que el ciclo hidrológico permite que continuamente se utilice la misma agua, la cual se encuentra en diferentes estados: sólida, líquida o gaseosa.

El 97 por ciento es agua salada, la cual se encuentra principalmente en los océanos y mares; sólo el 3 por ciento de su volumen es dulce. De esta última, un 1 por ciento está en estado líquido. El 2% restante se encuentra en estado sólido en capas, campos y plataformas de hielo o banquisas en las latitudes próximas a los polos. Fuera de las regiones polares el agua dulce se encuentra principalmente en humedales y, subterráneamente, en acuíferos.

La atmósfera dispone de vapor de agua. Sin embargo, se trata de un volumen dinámico que constantemente se está incrementando en forma de evaporación y

disminuyendo en forma de precipitaciones. Estos volúmenes suponen la parte clave de la renovación de los recursos naturales de agua dulce. En los países de clima templado y frío la precipitación en forma de nieve supone una parte importante del total.

En la superficie de la Tierra hay unos 1.386.000.000 km<sup>3</sup> de agua que se distribuyen de la siguiente forma:



Situación del agua	Volumen en km <sup>3</sup>		Porcentaje	
	Agua dulce	Agua salada	de agua dulce	de agua total
Océanos y mares	-	1.338.000.000	-	96,5
Casquetes y glaciares polares	24.064.000	-	68,7	1,74
Agua subterránea salada	-	12.870.000	-	0,94
Agua subterránea dulce	10.530.000	-	30,1	0,76
Glaciares continentales y Permafrost	300.000	-	0,86	0,022
Lagos de agua dulce	91.000	-	0,26	0,007
Lagos de agua salada	-	85.400	-	0,006
Humedad del suelo	16.500	-	0,05	0,001
Atmósfera	12.900	-	0,04	0,001
Embalses	11.470	-	0,03	0,0008
Ríos	2.120	-	0,006	0,0002
Agua biológica	1.120	-	0,003	0,0001
Total agua dulce	35.029.110	-	100	-
Total agua en la tierra	1.386.000.000	-	-	100



La mayor parte del agua terrestre, por tanto, está contenida en los mares, y presenta un elevado contenido en sales. Las aguas subterráneas se encuentran en yacimientos subterráneos llamados acuíferos y son potencialmente útiles al hombre como recursos. En estado líquido compone masas de agua como océanos, mares, lagos, ríos, arroyos, canales, manantiales y estanques.

El restante 3 %, que no es agua de mar, sería el agua que podría utilizar la población de la tierra, estimada en unos 35 millones de Km<sup>3</sup>. La realidad nos dice que sin embargo, de esta pequeña cantidad, sólo un 13 % constituye el agua realmente disponible.

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

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

## **2. CALIDAD Y CONTAMINACIÓN DEL AGUA**

### **2.1. Introducción**

La calidad del agua es una variable fundamental del medio hídrico, tanto en lo que respecta a la caracterización ambiental como desde la perspectiva de la planificación hidrológica. Este término puede responder a varias definiciones, que se han visto reflejadas en la legislación a lo largo del tiempo.

De forma tradicional se ha entendido por calidad de un agua el conjunto de características físicas, químicas y biológicas que hacen que el agua sea apropiada para un uso determinado. Esta definición ha dado lugar a diversa normativa, que asegura la calidad suficiente para garantizar determinados usos, pero que no recoge los efectos y consecuencias que la actividad humana tiene sobre las aguas naturales.

Cada uso que damos al agua requiere una calidad distinta de este recurso y recibe por ello un tratamiento diferente, tanto antes como después de su utilización. Solemos distinguir los usos del agua en tres grandes grupos: agrícola, industrial y urbano.



El uso agrícola es aquel en que el agua es destinada al riego de las cosechas. En España supone aproximadamente el 68% de la demanda total de agua y a nivel mundial un 69%. Aunque es mucha cantidad, sin embargo, de los tres grandes grupos de uso del agua es el que menos calidad exige. Esta agua se lleva directamente desde los embalses o ríos hasta balsas de riego o, a través de canales agrícolas, a los puntos de distribución de las diversas fincas.

El uso industrial es el que cubre las demandas de la industria y las centrales hidroeléctricas. A nivel estatal, se estima que el 20% de la demanda total va a parar al uso industrial (23% a nivel mundial).

El uso urbano comprende el abastecimiento a la población: consumo doméstico; servicios públicos (tales como el riego de zonas verdes, la limpieza de las calles y el consumo en instalaciones públicas, como los centros educativos y los polideportivos); y el suministro a industrias dependientes de la red urbana.

El uso urbano supone una media del 12% de la demanda total de agua en España, con un promedio mundial del 8%. El urbano es el uso que requiere una mejor calidad del agua, pues debe ser potable y cumplir estrictas normas de control de calidad. Por ello, desde los embalses se canaliza hasta una estación potabilizadora, en la que se somete a tratamiento potabilizador, que la desinfecta (con compuestos de cloro y otros productos químicos) y elimina los sólidos que contenga. Al final de la potabilización, se realizan en esa agua varios controles sanitarios para garantizar su potabilidad.

El agua natural puede contener una gran variedad de impurezas, características del ciclo hidrológico que ha experimentado previamente. Cuando las impurezas representan elementos nocivos para el uso a que va destinada el agua las denominamos contaminantes. Por lo tanto, es el grado de calidad requerido el que determina si una impureza es contaminante o no.

Hasta hace poco tiempo, los vertidos producidos por los asentamientos de población y por la escasa industria existente, podían ser asimilados por los cauces receptores, de tal forma que a través de los procesos de autodepuración natural de las aguas, en espacios y tiempos delimitados, el agua volvía a adquirir unas características lo suficientemente aceptables para poder ser reutilizadas por otros posibles usuarios del cauce público. En la actualidad, los vertidos producidos son de tal importancia en muchos casos, que la capacidad de autodepuración del cauce no son suficientes, deteriorándose de tal forma el cauce, que imposibilita la reutilización posterior del agua.

Una de las múltiples definiciones de contaminación hídrica es la proclamada en la Carta Europea del Agua, en su punto quinto, dice: "La contaminación consiste en una modificación, generalmente provocada por el hombre, de la calidad del agua, haciendo impropia o peligrosa para el consumo humano, la industria, la agricultura, la pesca, las actividades recreativas, así como para los animales domésticos y la vida natural". Bajo



estas consideraciones, se dice que un agua está contaminada cuando sufre cambios que afectan su uso real o potencial.

La problemática de la contaminación del medio hídrico a lo largo de este último siglo, ha alcanzado unos límites máximos, poniendo en grave peligro el futuro de la humanidad, debido fundamentalmente al gran crecimiento industrial, así como la gran evolución demográfica de la población, viéndose agravado el problema por la concentración tanto industrial como humana en áreas delimitadas.

La contaminación de las aguas es uno de los factores importantes que rompe la armonía entre el hombre y su medio tanto a corto, como a medio y largo plazo; por lo que la prevención y lucha contra ella constituye en la actualidad una necesidad de importancia prioritaria.

De aquí surge la necesidad de definir un nuevo concepto de calidad que se desvincule totalmente de los usos, y que tenga como punto de referencia el propio recurso en sí y no los fines a los que se destina.

Esta sería la *CALIDAD INTRÍNSECA O NATURAL DE LAS AGUAS*, que se define por las condiciones fisicoquímicas y biológicas de un medio natural que no ha sufrido intervención humana.

## **2.2. Las aguas naturales**

Las aguas naturales siempre contienen impurezas, a pesar de que provengan de un agua de lluvia teóricamente pura. En el ciclo hidrológico la evaporación del agua hacia las nubes constituye un proceso netamente purificador. Sin embargo, en su caída en forma de lluvia, el agua inicia un proceso de contaminación cuyo resultado final dependerá de las condiciones atmosféricas y climáticas de la región en que caiga, de las características geológicas del terreno y de su distribución como aguas superficiales o subterráneas. El nivel natural de calidad del agua podrá ser modificado, además, como consecuencia de las actividades humanas.

El agua de lluvia transporta el polvo que se encuentra en suspensión y está saturada de oxígeno, nitrógeno y dióxido de carbono y, en general, es ligeramente ácida con un pH inferior a 6. La acidez puede verse incrementada por contaminantes atmosféricos, principalmente óxidos de azufre y nitrógeno. Cuanto más ácida sea el agua de lluvia, más fácilmente reaccionará con los materiales geológicos con los que entre en contacto.

El agua de lluvia infiltrada en el suelo puede aumentar su acidez debido a los procesos biológicos, en particular la respiración de plantas y microorganismos que viven en la capa más exterior. La acidez también puede aumentar, aunque más



limitadamente, debido a productos de descomposición orgánica tales como ácidos húmico y fúlvico, captación de nutrientes por las raíces y bacterias nitrificantes.

En contacto con los minerales que encuentra a su paso, el agua reacciona aumentando el contenido en sales disueltas, principalmente las aguas subterráneas con largos períodos de residencia. La disolución de calcita ( $\text{CO}_3\text{Ca}$ ) y dolomita ( $\text{CO}_3\text{CaMg}$ ) aumentará su contenido en calcio, magnesio, y también en bicarbonatos. Los minerales aluminosilicatos aumentarán las concentraciones de sodio, magnesio, calcio y ácido silícico. Los minerales a base de sulfatos, tales como yeso y anhidrita, aunque son menos frecuentes, se caracterizan por sus altas solubilidades y las aguas en su contacto pueden presentar el ión sulfato dominando sobre el ión bicarbonato. En aguas subterráneas muy profundas y de origen antiguo, o en zonas costeras con intrusión salina, el ión cloruro puede llegar a ser el dominante. Las aguas superficiales están más fácilmente expuestas a la contaminación derivada de la actividad humana y pueden contener, además de materia orgánica, todo tipo de productos de origen industrial o agrícola.

Además de su capacidad de solvente, el agua posee otra virtud, que también depende de la velocidad con la que marcha sobre la superficie de la Tierra: la capacidad de transportar material en suspensión. Dicho material en suspensión confiere al agua la característica que llamamos *turbidez*.

En el cuerpo de un curso de agua existe también una gran variedad de organismos vivos tales como algas, protozoarios, etcétera, que pueden dar color, gusto y olor a las aguas.

La materia orgánica en descomposición también libera sustancias orgánicas coloreadas que, disueltas por el agua o puestas en un fino estado de suspensión denominado *estado coloidal*, colorean el agua. También el hierro y el manganeso pueden asociarse a tales sustancias orgánicas y producir color.

### 2.3. Calidad del agua

El agua pura ( $\text{H}_2\text{O}$ ), en sentido estricto, no existe en la naturaleza debido a que es un excelente solvente. Por lo tanto, rara vez se encuentra en condiciones de ser utilizada directamente.

El concepto de calidad del agua se relaciona con la naturaleza de ésta y con la concentración de impurezas que contenga. Las impurezas presentes en el agua son las que le proporcionan sus características.





El concepto de impureza del agua es relativo; depende del uso específico que se da al recurso. Por ejemplo, impurezas poco importantes para el agua que se usa en la limpieza pueden ser claves en el agua para beber.

Por lo general, las aguas de abastecimiento contienen las siguientes impurezas:

**a)** En suspensión: bacterias, microorganismos (algas y protozoarios), arena, sílice y arcilla, y residuos industriales y domésticos.

**b)** En estado coloidal: sustancias colorantes vegetales, y sílice.

**c)** En disolución: sales de calcio y magnesio, sales de sodio, hierro, manganeso, y gases (oxígeno, CO<sub>2</sub>, etcétera).

Además de estas sustancias, las aguas presentan:

**d)** sustancias de interés especial: flúor, yodo y sustancias radiactivas;

**e)** sustancias que pueden causar envenenamiento: arsénico, cromo, cobre, plomo, etcétera, y

**f)** sustancias que en exceso tienen un efecto laxante: magnesio, sulfatos y sólidos totales.

Por lo tanto, la calidad del agua se define según sus características, que son físicas, químicas y biológicas.

Tales características se determinan mediante los siguientes procedimientos: **a)** examen físico, **b)** análisis químico, **c)** examen bacteriológico, y **d)** examen microscópico.

## **2.4. Parámetros de calidad de las aguas**

En base a la vinculación entre calidad de aguas y sus usos, se establecen estándares y criterios de calidad específicos que definen los requisitos que ha de reunir un determinado agua para un fin concreto, requisitos que, generalmente, vienen expresados como rangos cuantitativos de determinadas características fisicoquímicas y biológicas.

Los parámetros más utilizados para definir su calidad se pueden clasificar en cuatro grandes grupos: físicos, químicos, biológicos y radiológicos.



## 1.- Parámetros físicos

El examen de estos parámetros da a conocer el olor, el sabor, la apariencia y aceptabilidad del agua de una manera general.

Las determinaciones físicas más comunes son las siguientes:

### 1.1.- Sabor y olor

El sabor y olor son determinaciones organolépticas de determinación subjetiva, para las cuales no existen instrumentos de observación, ni registro, ni unidades de medida. Tienen un interés evidente en las aguas potables destinadas al consumo humano, ya que estas características constituyen el motivo principal de rechazo por parte del consumidor.

En el agua se pueden considerar cuatro sabores básicos: ácido, salado, dulce y amargo.

El sabor se determina por sucesivas diluciones de la muestra original con agua inodora ( $T^a \approx 40\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) hasta que es indetectable (umbral de percepción), siendo un ensayo muy subjetivo y de escasa reproducibilidad. Las muestras deben conservarse en vidrio un máximo de 6 h a  $2 - 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

El cuadro muestra los límites de percepción de algunas sales y compuestos presentes en el agua.

**Límites de percepción de algunas sales y compuestos en el agua (mg/l)**

Sustancia	Netamente reconocible	Debidamente perceptible	No apreciable
$\text{CaCl}_2 \cdot \text{NaCl}$	600	300	150
$\text{MgCl}_2$	100	60	—
$\text{FeSO}_4$	—	3,5	1,75
$\text{CuSO}_4$	7	3,5	1,75
$\text{H}_2\text{S}$	1,15	0,55	0,30
$\text{H}_2\text{SO}_4$	4	2	1
$\text{Cl}_2$	0,1	0,05	0,05
$\text{Ca}(\text{OCl})_2$	0,5	0,20	0,20



Para aguas residuales urbanas e industriales, este contaminante no se tiene en cuenta, dado que estas aguas no son aptas para el consumo. Su efecto sobre el medio receptor es la transmisión de sabor a la fauna acuática o al agua utilizada aguas abajo.

La cloración en presencia de compuestos fenólicos puede imprimir un mal sabor en el agua, por la formación de derivados clorados que producen un sabor a derivados fenólicos.

El olor presente en el agua puede ser debido a la presencia en la misma de compuestos químicos (fenoles, cloro,...), materias orgánicas en descomposición (desprendimiento de gases) o bien a ciertos organismos vivos (algas, hongos,...). Una característica del olor es que cantidades muy pequeñas pueden originar grandes olores.

El cuadro presenta un resumen de algunos olores característicos del agua, de acuerdo con su origen.

#### Olores característicos del agua y su origen

Naturaleza	Origen
Olor balsámico	Flores
Dulzor	<i>Coelosphaerium</i>
Olor químico	Aguas residuales industriales
Olor a cloro	Cloro libre
Olor a hidrocarburo	Refinería de petróleo
Olor medicamentoso	Fenol, yodoformo
Olor a azufre	Ácido sulfhídrico, H <sub>2</sub> S
Olor a pescado	Pescado, mariscos
Olor séptico	Alcantarilla
Olor a tierra	Arcillas húmedas
Olor fecaloide	Retrete, alcantarilla
Olor a moho	Cueva húmeda
Olor a legumbres	Hierbas, hojas en descomposición



Su determinación se efectúa, al igual que el sabor, por dilución hasta determinar el umbral de percepción y sólo se realizará con muestras que sean sanitariamente aptas para consumo humano.

Las aguas residuales urbanas cuando son frescas no presentan olores, sólo a medida que transcurre el tiempo aumenta el olor por desprendimientos de gases tales como el sulfhídrico o metano -originados por descomposición anaerobia-. En las aguas industriales el olor dependerá de los compuestos presentes en los procesos. En las aguas naturales, si existe olor es debido a la presencia de descomposiciones de productos naturales (el desove de peces,...).

En algunos casos, la eliminación de los olores puede realizarse mediante la aireación o la adición de carbón activado.

La EPA y la OMS recomiendan como criterio que por razones organolépticas, las fuentes de abastecimiento deben estar razonablemente exentas de olor y sabor; es decir, en términos generales, que se encuentren en un nivel aceptable.

## **1.2.- Color**

El color es la capacidad de absorber ciertas radiaciones del espectro visible. No se puede atribuir a ningún constituyente en exclusiva, aunque ciertos colores en aguas naturales son indicativos de la presencia de ciertos contaminantes. El agua pura sólo es azul en grandes espesores. En general presenta colores inducidos por materiales orgánicos de los suelos vegetales, como el color amarillo debido a los ácidos húmicos. La presencia de hierro puede darle color rojizo, y la del manganeso un color negro. El color afecta estéticamente la potabilidad de las aguas, puede representar un potencial colorante de ciertos productos cuando se utiliza como materia de proceso, y un potencial espumante en su uso en calderas.

Esta característica del agua puede estar ligada a la turbiedad o presentarse independientemente de ella.

Resumiendo, el color de un agua puede ser de origen natural o por contaminación. Todas las aguas presentan una tonalidad variable dependiendo de muy diversas circunstancias. Esta tonalidad más o menos acusada es el color del agua, que tiene su origen en causas internas o en causas externas. Las primeras, son debidas a los materiales disueltos y a los suspendidos en el mismo agua, y las segundas, tienen su origen en la absorción de las radiaciones de mayor longitud de onda. A su vez, este color del agua es de dos tipos: APARENTE (el que presenta el agua bruta) y REAL (el que queda después de haber separado las materias en suspensión por filtración).



En la formación del color en el agua intervienen, entre otros factores, el pH, la temperatura, el tiempo de contacto, la materia disponible y la solubilidad de los compuestos coloreados.

Las aguas residuales urbanas cuando son frescas son grisáceas, oscureciéndose a medida que pasa el tiempo hasta convertirse en negras. Las industriales dependerán del tipo de fabricación, materias primas, procesos, etc. El efecto de este contaminante sobre el medio receptor es además de perjudicial, estético; disminuyendo la transmisión de la energía solar y en consecuencia la fotosíntesis.

Las medidas de color se hacen normalmente en laboratorio, por comparación con un estándar arbitrario a base de cloruro de cobalto,  $\text{Cl}_2\text{O}$ , y cloroplatinato de potasio,  $\text{Cl}_6\text{PtK}_2$ , y se expresa en una escala de unidades de Pt-Co (unidades Hazen) o simplemente Pt. Las aguas subterráneas no suelen sobrepasar valores de 5 ppm de Pt, pero las superficiales pueden alcanzar varios centenares de ppm. La determinación del color se efectúa visualmente empleando luz diurna difusa sobre fondo blanco, o mediante el uso de un espectrofotómetro visible.

El valor guía de la OMS es 15 unidades de color (UC) para aguas de bebida.

Según el origen del color los principales tratamientos de eliminación pueden ser la coagulación y filtración, la cloración, o la adsorción en carbón activo.

Debido a que el color del agua se origina, en muchos casos, por la presencia de compuestos de naturaleza orgánica, se recomienda que la desinfección se realice luego de que este haya sido removido, para evitar que la aplicación de cloro como desinfectante pueda dar origen a la formación de trihalometanos, compuestos que tienen efecto cancerígeno en animales.

### **1.3.- Turbidez**

La turbidez es la dificultad del agua, para transmitir la luz debido a materiales insolubles en suspensión, coloidales o muy finos, que se presentan principalmente en aguas superficiales. Son difíciles de decantar y filtrar, y pueden dar lugar a la formación de depósitos en las conducciones de agua, equipos de proceso, etc. Además interfiere con la mayoría de procesos a que se pueda destinar el agua. La turbidez nos da una noción de la apariencia del agua y sirve para tener una idea acerca de la eficiencia de su tratamiento.

La medición se hace por comparación con la turbidez inducida por diversas sustancias. La medición en ppm de  $\text{SiO}_2$  fue la más utilizada, pero existen diferencias en los valores obtenidos según la sílice y la técnica empleadas por un laboratorio u otro. Existen diversos tipos de turbidímetros modernos dando valores numéricos prácticamente idénticos. El fundamento del turbidímetro de Jackson es la observación



de una bujía a través de una columna del agua ensayada, cuya longitud se aumenta hasta que la llama desaparece. Con una célula fotoeléctrica se mejora la medida. El aparato se puede calibrar mediante suspensiones de polímero de formacina, con lo cual se deriva a una escala en unidades de formacina. En el nefelómetro se mide la intensidad de luz difractada al incidir un rayo luminoso sobre las partículas en suspensión y recogida sobre una célula fotoeléctrica.

La unidad nefelométrica (NTU o UNF), la unidad Jackson (JTU), y la unidad de formacina (FTU) se pueden intercambiar a efectos prácticos.

Las aguas subterráneas suelen tener valores inferiores a 1 ppm de sílice, pero las superficiales pueden alcanzar varias decenas. Las aguas con 1 ppm son muy transparentes y permiten ver a su través hasta profundidades de 4 ó 5 m. Con 10 ppm, que sería el máximo deseable para una buena operación de los filtros, la transparencia se acerca al metro de profundidad. Por encima de 100 ppm la transparencia está por debajo de los 10 cm y los filtros se obstruyen rápidamente.

La turbidez se elimina mediante procesos de coagulación, decantación y filtración.

En la práctica, la remoción de la turbiedad no es un proceso difícil de llevar a cabo en una planta de clarificación de agua; sin embargo, es uno de los que más influye en los costos de producción, porque, por lo general, requiere usar coagulantes, acondicionadores de pH, ayudantes de coagulación, etcétera.

El diseño de los sistemas de remoción de turbiedad debe considerar no solo el tipo de partículas existentes (origen, estructura, composición y forma) sino también su tamaño y comportamiento.

Aunque no se conocen los efectos directos de la turbiedad sobre la salud, esta afecta la calidad estética del agua, lo que muchas veces ocasiona el rechazo de los consumidores. Por otra parte, como señala Castro de Esparza (*Parámetros físico-químicos que influyen en la calidad y en el tratamiento del agua.*), los estudios elaborados por Tracy y por Sanderson y Kelly han demostrado que en el proceso de eliminación de los organismos patógenos, por la acción de agentes químicos como el cloro, las partículas causantes de la turbiedad reducen la eficiencia del proceso y protegen físicamente a los microorganismos del contacto directo con el desinfectante. Por esta razón, si bien las normas de calidad establecen un criterio para turbiedad en la fuente de abastecimiento, esta debe mantenerse mínima para garantizar la eficacia del proceso de desinfección.

Las Guías de Calidad para Aguas de Consumo Humano de la Organización Mundial de la Salud (OMS) recomiendan como valor guía 5 NTU. La OMS indica, sin embargo, que para una desinfección eficiente, el agua filtrada debería tener una turbiedad promedio menor o igual a una NTU.

#### 1.4.- Conductividad y resistividad

La conductividad es una medida de la capacidad que tiene el agua para conducir la corriente eléctrica. La conductividad está relacionada por un parámetro llamado fuerza iónica que viene determinado por la concentración y la carga de cada ión presente en el agua.

$$\mu = 1/2 \sum c_i \times z_i^2$$

Es decir, la conductividad eléctrica ( $\Lambda_o$ ) es la medida de la capacidad del agua para conducir la electricidad. Es indicativa de la materia ionizable total presente en el agua. El agua pura contribuye mínimamente a la conductividad, y en su casi totalidad es el resultado del movimiento de los iones de las impurezas presentes. La resistividad es la medida recíproca de la conductividad. El aparato utilizado es el conductivímetro cuyo fundamento es la medida eléctrica de la resistencia de paso de la electricidad entre las dos caras opuestas de un prisma rectangular comparada con la de una solución de ClK a la misma temperatura y referida a 20°C. La medida de la conductividad es una buena forma de control de calidad de un agua, siempre que:

- No se trate de contaminación orgánica por sustancias no ionizables.
- Las mediciones se realizan a la misma temperatura.
- La composición del agua se mantenga relativamente constante.

La unidad estándar de resistencia eléctrica es el ohm y la resistividad de las aguas se expresa convenientemente en megaohms-centímetro. La conductividad se expresa en el valor recíproco, normalmente como microsiemens por centímetro ( $\mu S\text{ cm}^{-1}$ ). Para el agua ultrapura los valores respectivos son de 18,24 Mohms.cm y 0,05483  $\mu S/\text{cm}$  a 25°C.

Tipo de agua	Conductividad eléctrica ( $\mu S/\text{cm}$ )
Agua pura	0,04 $\mu S/\text{cm}$
Agua destilada	0,5 a 5 $\mu S/\text{cm}$
Agua de lluvia	5 a 50 $\mu S/\text{cm}$
Aguas potables	<2500 $\mu S/\text{cm}$
Aguas salobres	2500 –20000 $\mu S/\text{cm}$
Aguas de mar	45000-55000 $\mu S/\text{cm}$
Salmueras	>100000 $\mu S/\text{cm}$

**Conductividad eléctrica de distintos tipos de aguas**

Es una medida indirecta de la cantidad de sólidos disueltos estando relacionados ambos mediante la expresión empírica

$$SD\text{ (mg/l)} = 0,8 \cdot \Lambda_o\text{ (}\mu S\text{ cm}^{-1}\text{)}$$



Las muestras deben analizarse preferiblemente “in situ”, o conservarse en frascos de polietileno, nunca de vidrio sódico, en nevera (2-4 °C) y obscuridad durante un máximo de 24 h, teniendo la precaución de termostatarlas a 25 °C antes de realizar la determinación.

### **1.5.- Temperatura**

La temperatura del agua tiene una gran importancia en el desarrollo de los diversos procesos que en ella se realizan, de forma que un aumento de la temperatura modifica la solubilidad de las sustancias, aumentando la de los sólidos disueltos y disminuyendo la de los gases. La actividad biológica aproximadamente se duplica cada diez grados (ley del  $Q_{10}$ ), aunque superado un cierto valor característico de cada especie viva, tiene efectos letales para los organismos. Una temperatura elevada implica la aceleración de la putrefacción, y por tanto, un aumento de la demanda de oxígeno; paralelamente, disminuye la solubilidad de éste. Las aguas residuales presentan mayor temperatura que las naturales. Las urbanas están en torno a 15 °C y las industriales dependerán del tipo de proceso utilizado y del volumen de agua.

Su efecto principal sobre el medio receptor como consecuencia de elevar la temperatura del agua es la disminución de la solubilidad del oxígeno en la misma, provocando alteraciones tanto químicas como biológicas que originan la desaparición de unas especies (salmónidos,...) en favor de otras (hongos,...).

Múltiples factores, principalmente ambientales, pueden hacer que la temperatura del agua varíe continuamente. Un aumento anormal (por causas no climáticas) de la temperatura del agua, suele tener su origen en el vertido de aguas utilizadas en procesos industriales de intercambio de calor. La temperatura se determina mediante termometría realizada “in situ”.

## **2.- Parámetros químicos**

Los análisis químicos constituyen uno de los principales requisitos para caracterizar el agua. Entre los contaminantes químicos, los que generan especial inquietud son los que tienen propiedades tóxicas acumulativas, como los metales pesados y las sustancias carcinógenas.

Por otro lado, el empleo de desinfectantes químicos para tratar el agua produce, por lo general, la formación de productos químicos secundarios, algunos de los cuales son potencialmente peligrosos.

Entre las sustancias químicas de importancia para la salud que pueden afectar el agua potable, destacan el cadmio, el cianuro, el cobre, el mercurio y el plomo.





Por otro lado, hay sustancias químicas cuya presencia puede producir quejas en los usuarios por diversas razones. Entre ellas, resaltan el cloruro, el cobre, el manganeso y el total de sólidos disueltos. Asimismo, hay que tomar en cuenta la dureza del agua.

Las determinaciones químicas más comunes son las siguientes:

### 2.1.- pH

El pH es una medida de la concentración de iones hidrógeno, y se define como  $\text{pH} = \log(1/[H^+])$  ó  $\text{pH} = -\log[H^+]$ . Es una medida de la naturaleza ácida o alcalina de la solución acuosa que puede afectar a los usos específicos del agua. La mayoría de aguas naturales tienen un pH entre 6 y 8.

En las aguas subterráneas normalmente vamos a tener valores de pH entre 6 y 9, debido al efecto tampón del sistema  $\text{CO}_2 - \text{H}_2\text{CO}_3 - \text{HCO}_3^- - \text{CO}_3^{2-}$ .

El agua ( $\text{H}_2\text{O}$ ) se encuentra disociada en protones ( $\text{H}^+$ ) e iones hidroxilo ( $\text{OH}^-$ ). El producto de la concentración de estas especies está relacionado por una constante de equilibrio  $K_w$ :

$$[H^+][OH^-] = K_w = 10^{-14}$$

En una situación de neutralidad la concentración de  $\text{H}^+$  será igual que la concentración de  $\text{OH}^-$  por lo que podremos expresar la ecuación anterior de la siguiente forma:

$$[H^+]^2 = 10^{-14}$$

$$[H^+] = \sqrt{10^{-14}} = 10^{-7}$$

Si multiplicamos por  $-1$  a cada lado de la ecuación y tomamos logaritmos tendremos:

$$-\log[H^+] = -\log(10^{-7}) = 7$$

Y por la definición de pH tendremos que en condiciones de neutralidad el pH es igual a 7. De la misma forma cuando el agua esté totalmente disociado en protones el pH tendrá un valor de 0 y será 14 cuando esté totalmente disociado en  $\text{OH}^-$ .



Unas oscilaciones significativas en el valor del pH, o bien valores bajos o altos, significan la aparición de *vertidos* industriales. Este parámetro sirve pues como indicador de *vertidos* industriales. Por otro lado, es preciso controlar el pH para garantizar los procesos biológicos, debiéndose mantener entre valores de 6,2 y 8,5, para que no se generen problemas de inhibición.

El valor de este parámetro es importante para determinar la calidad de un agua residual, debido a que el rango en el cual se desarrollan los procesos biológicos corresponde a un intervalo estrecho y crítico -no existiendo vida fuera del mismo por desnaturalización de las proteínas de los seres vivos-. Es de señalar que por variación del pH, el agua puede convertirse en corrosiva respecto a los metales, o bien compuestos estables presentes en la misma pueden convertirse en tóxicos.

Las aguas residuales urbanas son ligeramente alcalinas. En las industriales, dependerá de los productos fabricados, materias primas, etc.

Su medición se realiza fácilmente con un pHmetro (electrometría de electrodo selectivo) bien calibrado, conservando la muestra en frasco de polietileno o vidrio de borosilicato en nevera menos de 24 h, obteniendo la concentración en valores de pH comprendidos entre 1 y 14. Las aguas con valores de pH menores de 7 son aguas ácidas y favorecen la corrosión de las piezas metálicas en contacto con ellas, y las que poseen valores mayores de 7 se denominan básicas y pueden producir precipitación de sales insolubles (incrustaciones). En las medidas de pH hay que tener presente que estas sufren variaciones con la temperatura y que los valores indicados son para 20 °C. También se puede disponer de papeles especiales que, por coloración, indican el pH.

Cuando se tratan aguas ácidas, es común la adición de un álcali (por lo general, cal) para optimizar los procesos de coagulación. En algunos casos, se requerirá volver a ajustar el pH del agua tratada hasta un valor que no le confiera efectos corrosivos ni incrustantes.

## **2.2.- Dureza**

La dureza representa una medida de la cantidad de metales alcalinotérreos en el agua, fundamentalmente Calcio (Ca) y Magnesio (Mg) provenientes de la disolución de rocas y minerales que será tanto mayor cuanto más elevada sea la acidez del agua. Es una medida, por tanto, del estado de mineralización del agua. La dureza está relacionada con el pH y la alcalinidad; depende de ambos.

La dureza, debida a la presencia de sales disueltas de calcio y magnesio, y en menor proporción por el hierro, el aluminio y otros metales, mide la capacidad de un agua para producir incrustaciones por formación de precipitados insolubles de carbonatos e hidróxidos. Afecta tanto a las aguas domésticas como a las industriales, siendo la principal fuente de depósitos e incrustaciones en calderas, intercambiadores de



calor, tuberías, etc. Por el contrario, las aguas muy blandas son agresivas y pueden no ser indicadas para el consumo.

Existen distintas formas de dureza:

— *Dureza total o título hidrotimétrico*, TH. Mide el contenido total de iones  $\text{Ca}^{++}$  y  $\text{Mg}^{++}$ . Se puede distinguir entre la dureza del calcio,  $\text{THCa}$ , y la dureza de magnesio,  $\text{THMg}$ .

— *Dureza permanente o no carbonatada*. Mide el contenido en iones  $\text{Ca}^{++}$  y  $\text{Mg}^{++}$  después de someter el agua a ebullición durante media hora, filtración y recuperación del volumen inicial con agua destilada. El método es de poca exactitud y depende de las condiciones de ebullición.

— *Dureza temporal o carbonatada*. Mide la dureza asociada a iones  $\text{CO}_3\text{H}^-$ , eliminable por ebullición, y es la diferencia entre la dureza total y la permanente.

Si la dureza es inferior a la alcalinidad, toda la dureza es carbonatada, pero si la dureza es superior a la alcalinidad hay una parte de dureza no carbonatada, asociada a otros aniones. La dureza de carbonato es igual al valor  $m$  si  $\text{TH} > m$ , e igual a  $\text{TH}$  si  $\text{TH} < m$ . La dureza no carbonatada sólo existe en el primer caso y es igual a  $\text{TH} - m$ .

La dureza se puede expresar como meq/l, en ppm de  $\text{CO}_3\text{Ca}$ , o en grados hidrométricos de los cuales el más común es el francés (1 grado francés = 0,2 miliequivalentes = 10 ppm de  $\text{CO}_3\text{Ca}$ ). Las aguas con menos de 50 ppm en  $\text{CO}_3\text{Ca}$  se llaman blandas, hasta 100 ligeramente duras, hasta 200 moderadamente duras, y a partir de 200 ppm muy duras. Es frecuente encontrar aguas con menos de 300 ppm como  $\text{CO}_3\text{Ca}$ , pero pueden llegar a 1.000 ppm e incluso hasta 2.000 ppm.

La medición puede hacerse por análisis total o por complexometría con ácido etilendiaminotetraacético (EDTA). Existe una forma sencilla y aproximada que utiliza agua jabonosa por el gran consumo de jabón de las aguas duras.

Las normas de calidad no establecen un límite específico para la dureza en el agua para consumo humano. Aún no se ha definido si la dureza tiene efectos adversos sobre la salud.

Para disminuir la dureza las aguas pueden someterse a tratamiento de ablandamiento o desmineralización. En las calderas y circuitos de refrigeración se usan complementariamente tratamientos internos. La estabilidad de las aguas duras y alcalinas se determina mediante índices específicos, como se verá al final del apartado.

### 2.3.- Alcalinidad

La alcalinidad es una medida de la capacidad para neutralizar ácidos. Contribuyen a la alcalinidad principalmente los iones bicarbonato,  $\text{CO}_3\text{H}^-$ , carbonato,  $\text{CO}_3^{2-}$ , y oxhidrilo,  $\text{OH}^-$ , pero también los fosfatos y ácido silícico u otros ácidos de carácter débil. Los bicarbonatos y los carbonatos pueden producir  $\text{CO}_2$  en el vapor, que es una fuente de corrosión en las líneas de condensado. También pueden producir espumas, provocar arrastre de sólidos con el vapor y fragilizar el acero de las calderas.

La alcalinidad del agua es la suma de las concentraciones de los iones carbonato ( $\text{CO}_3^{2-}$ ), bicarbonato ( $\text{CO}_3\text{H}^-$ ) y e hidróxidos ( $\text{OH}^-$ ), siendo estos últimos despreciables frente al resto.

$$TAC = [\text{CO}_3^{2-}] + [\text{CO}_3\text{H}^-] + [\text{OH}^-]$$

Estas especies producen en el agua un efecto tampón ya que absorben protones manteniendo el pH en un valor muy estable. Esta propiedad es muy importante para los seres vivos en determinados medios como el flujo sanguíneo ya que mantienen el valor de pH a un valor muy constante y estable frente a posibles variaciones en el medio.

Se distingue entre la alcalinidad total o título alcalimétrico total, TAC, medida por adición de ácido hasta el viraje del anaranjado de metilo, a pH entre 4,4 y 3,1, también conocido como alcalinidad m, y la alcalinidad simple o título alcalimétrico, TA, medida por el viraje de la fenoftaleína, a pH entre 9,8 y 8,2, conocido como alcalinidad p. A partir de ambas mediciones se pueden determinar las concentraciones en carbonato, bicarbonato e hidróxido.

Condición	$\text{OH}^-$	$\text{CO}_3^{2-}$	H
p = 0	0	0	m
p < 0,5 m	0	2p	m - 2p
p = 0,5	0	2p	0
p > 0,5	2p - m	2(m - p)	0
p = m	m	0	0

Se mide en las mismas unidades que la dureza y está influenciada por el pH, la composición general del agua, la temperatura y la fuerza iónica.

La alcalinidad es también importante en el tratamiento del agua porque reacciona con coagulantes hidrolizables (como sales de hierro y aluminio) durante el proceso de coagulación. Además, este parámetro tiene incidencia, como se ha visto,



sobre el carácter corrosivo o incrustante que pueda tener el agua y, cuando alcanza niveles altos, puede tener efectos sobre el sabor.

La alcalinidad se corrige por descarbonatación con cal, tratamiento con ácido, o desmineralización por intercambio iónico.

#### **2.4.- Coloides**

Es una medida del material en suspensión en el agua que, por su tamaño alrededor de los  $10^{-4} - 10^{-5}$  mm, se comporta como una solución verdadera y, por ejemplo, atraviesa el papel de filtro. Los coloides pueden ser de origen orgánico (ejemplo macromoléculas de origen vegetal) o inorgánico (ejemplo óxidos de hierro y manganeso). En aguas potables puede ser una molestia sólo de tipo estético.

La dificultad de sedimentación se salva con un proceso de coagulación-floculación previo. Si se debe a DBO (demanda bioquímica de oxígeno) en aguas residuales se puede tratar biológicamente. La filtración es insuficiente y requiere un proceso de ultrafiltración.

#### **2.5.- Acidez mineral**

La acidez es la capacidad para neutralizar bases. Es raro que las aguas naturales presenten acidez, sin embargo las aguas superficiales pueden estar contaminadas por ácidos de drenajes mineros o industriales. Pueden afectar a tuberías o calderas por corrosión. Se mide con las mismas unidades de la alcalinidad, y se determina mediante adición de base. Se corrige por neutralización con álcalis.

#### **2.6.- Sólidos**

Se puede definir como *sólido* todo aquel elemento o compuesto presente en el agua y que no es el agua.

El contenido total de materia sólida contenida en el agua constituye los Sólidos Totales (**ST**), comprendiendo los sólidos tanto orgánicos como inorgánicos; su valor queda definido por toda la materia que permanece como residuo de evaporación a 105°C. Estos Sólidos Totales pueden encontrarse como:

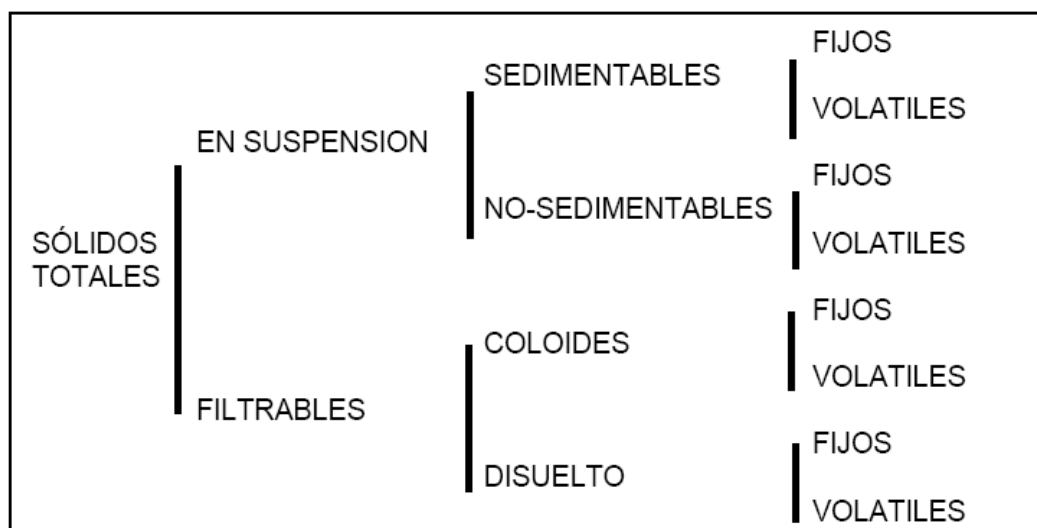
— Sólidos Disueltos (**SD**) que no sedimentan encontrándose en el agua en estado iónico o molecular. Comprenden sólidos en solución verdadera y sólidos en estado coloidal, no retenidos en la filtración, ambos con partículas inferiores a un micrómetro ( $1\ \mu$ ).

— **Sólidos en Suspensión (SS)**. Corresponden a los sólidos presentes en un agua residual, exceptuados los solubles y los sólidos en fino estado coloidal. Se considera que los sólidos en suspensión son los que tienen partículas superiores a un micrómetro y que son retenidos mediante una filtración en el análisis de laboratorio. Pueden ser:

- **Sedimentables (SSs)**, que por su peso pueden sedimentar fácilmente en un determinado período de tiempo (2 horas en cono Imhoff).
- **No sedimentables (SSn)**, que no sedimentan tan fácilmente por su peso específico próximo al del líquido o por encontrarse en estado coloidal.

Los sólidos en suspensión sedimentables constituyen una medida de la cantidad de fango que se depositará durante el proceso de decantación en las Depuradoras.

### Tipos de sólidos



A su vez, cada una de estas clases de sólidos puede clasificarse de nuevo en base a su volatilidad a 500°C. La fracción orgánica se oxidará y será expulsada como gas, permaneciendo la fracción inorgánica como ceniza. Por tanto los términos de Volátiles y Fijos aplicados tanto a los sólidos totales como a los disueltos, en suspensión, sedimentables y no sedimentables, se refieren a su parte orgánica e inorgánica, respectivamente.

Es necesario aclarar que las pruebas analíticas para determinar las formas de los residuos no determinan sustancias químicas específicas y solo clasifican sustancias que tienen propiedades físicas similares y comportamiento semejante frente a las diferentes condiciones ambientales.

Equivalencias:

Sólidos totales = sólidos suspendidos + sólidos disueltos  $\Rightarrow$  **ST = SS + SD**

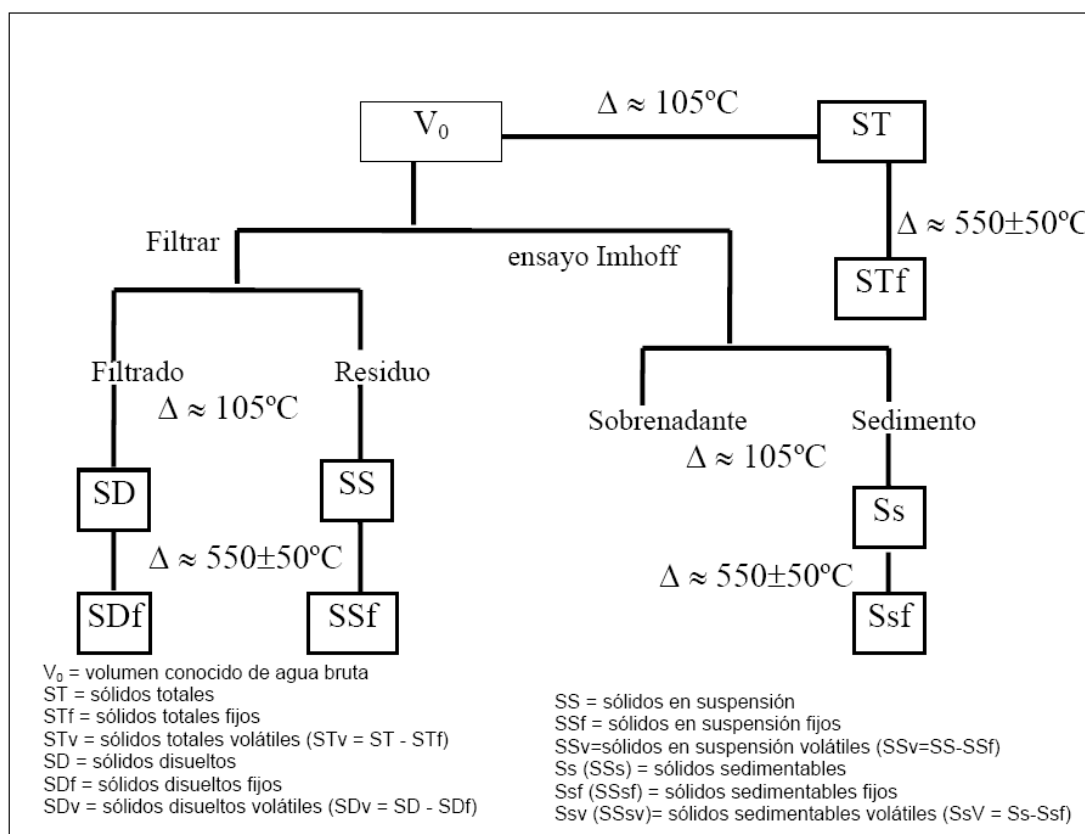
Sólidos totales = sólidos fijos + sólidos volátiles  $\Rightarrow$  **ST = Sf + Sv**

Sólidos totales = sólidos sedimentables + no sedimentables + sólidos disueltos

**ST = SSs + SSn + SD**

Sólidos suspendidos = sólidos sedimentables + sólidos no sedimentables

**SS = SSs + SSn**



En líneas generales, los efectos sobre el medio receptor son:

A/ De los sólidos en suspensión:

- Producción del color aparente de las aguas.
- Disminución de la fotosíntesis.
- Depósitos sobre plantas y branquias de peces.
- Sedimentación en el fondo de los cauces receptores.

**B/ De los sólidos disueltos:**

- Aumento de la salinidad.
- Variación de la solubilidad del oxígeno en el medio.
- Aunque no sean tóxicos, pueden inducir la toxicidad de otros compuestos.

El total de *sólidos disueltos* puede tener efectos significativos en el sabor del agua de consumo humano. Según las guías de la OMS, se piensa, por lo general, que con concentraciones inferiores a 600 miligramos por litro, el agua tiene un sabor agradable, que se deteriora progresivamente con concentraciones mayores a 1.200 miligramos por litro. Los niveles elevados de sólidos disueltos pueden provocar quejas de los consumidores, ya que pueden causar incrustaciones en las tuberías y los aparatos domésticos. Concentraciones muy bajas, por otro lado, pueden resultar inaceptables debido a su falta de sabor.

El origen de los *sólidos disueltos* puede ser múltiple, orgánico e inorgánico, tanto en aguas subterráneas como superficiales; están relacionados con el grado de mineralización del agua, ya que son iones de sales minerales que el agua ha conseguido disolver a su paso, y con la conductividad del agua, ya que un aumento de estos iones aumenta la capacidad conductiva. Aunque para las aguas potables se indica un valor máximo deseable de 500 ppm, el valor de los sólidos disueltos no es por sí solo suficiente para determinar la bondad del agua. En los usos industriales la concentración elevada de sólidos disueltos puede ser objeccionable por la posible interferencia en procesos de fabricación, o como causa de espuma en calderas.

Los procesos de tratamiento son múltiples en función de la composición, incluyendo la precipitación, intercambio iónico, destilación, electrodiálisis y ósmosis inversa.

Los *sólidos en suspensión* son indeseables en las aguas de proceso porque pueden causar depósitos en las conducciones, calderas, equipos, etc. Las aguas subterráneas suelen tener menos de 1 ppm, pero en las superficiales varían mucho en función del origen y las circunstancias de captación.

Se separan por filtración y decantación.

Los *sólidos sedimentables* son sólidos de mayor densidad que el agua, se encuentran dispersos debido a fuerzas de arrastre o turbulencias. Cuando estas fuerzas y velocidades cesan y el agua alcanza un estado de reposo, precipitan en el fondo. Son los causantes de la turbidez debido a que producen dispersión de la luz que atraviesa la muestra de agua. Suelen eliminarse fácilmente por cualquier método de filtración.

Los *sólidos en suspensión (no sedimentables)* se mantienen en el agua debido a su naturaleza coloidal que viene dada por las pequeñas cargas eléctricas que poseen





estas partículas que las hacen tener una cierta afinidad por las moléculas de agua. Este tipo de sólidos como tales son difíciles de eliminar siendo necesaria la adición al agua de agentes coagulantes y floculantes que modifican la carga eléctrica de estas partículas consiguiendo que se agrupen en flóculos de mayor tamaño para así poder separarlos mediante filtración. Ciertos sistemas de tratamiento de agua como la ozonización ya suponen de por sí un buen método floculante ya que se produce la oxidación del hierro, manganeso y aluminio, óxidos que son los que verdaderamente ejercen un fuerte poder floculante en el agua aumentando la eficacia del filtro y mejorando la transparencia del agua.

## **2.7.- Cloruros**

El ión cloruro,  $\text{Cl}^-$ , forma sales en general muy solubles. Suele ir asociado al ión  $\text{Na}^+$ , especialmente en aguas muy salinas. Las aguas dulces contienen entre 10 y 250 ppm de cloruros, pero no es raro encontrar valores mucho mayores. Las aguas salobres pueden tener centenares e incluso millares de ppm. El agua de mar contiene alrededor de 20.000 ppm.

Son constituyentes abundantes de las aguas subterráneas, aunque son escasos en los minerales de la corteza, pues son muy estables en solución y precipitan difícilmente (es decir son iones móviles o conservativos en el agua). Procede sobretodo de la disolución de evaporitas y de los aerosoles marinos disueltos por el agua de lluvia.

En las aguas superficiales por lo general no son los cloruros sino los sulfatos y los carbonatos los principales responsables de la salinidad.

El contenido en cloruros afecta la potabilidad del agua y su potencial uso agrícola e industrial. A partir de 300 ppm el agua empieza a adquirir un sabor salado. Las aguas con cloruros pueden ser muy corrosivas debido al pequeño tamaño del ión que puede penetrar la capa protectora en la interfase óxido-metal y reaccionar con el hierro estructural. Se valora con nitrato de plata usando cromato potásico como indicador.

Los límites fijados en el agua por las normas de calidad se sustentan más en el gusto que le imparten al agua que en motivos de salubridad.

Tomando en cuenta el límite de percepción del sabor de los cloruros en el agua, se ha establecido un límite de 250 mg/l en aguas de consumo, concentración que puede ser razonablemente excedida según las condiciones locales y la costumbre de los consumidores. La OMS considera que por encima de esta concentración, los cloruros pueden influir en la corrosividad del agua.

Por sus características químicas y la gran solubilidad de la mayoría de los cloruros, su remoción requiere métodos sofisticados y costosos, muchos de ellos



impracticables, especialmente cuando se trata de volúmenes relativamente altos. Se separa por intercambio iónico, aunque es menor retenido que los iones polivalentes, por lo cual las aguas de alta pureza requieren un pulido final. El método tradicional, que puede resultar más eficiente y práctico, es el de la destilación.

Este parámetro sirve también para detectar *vertidos* industriales, cuando su concentración presente oscilaciones fuertes o *valores* distintos a los que corresponden a *vertidos* netamente urbanos.

## 2.8.- Sulfatos

El ión sulfato,  $\text{SO}_4^{--}$ , corresponde a sales de moderadamente solubles a muy solubles. Las aguas dulces contienen de 2 a 150 ppm, y el agua de mar cerca de 3.000 ppm. Aunque en agua pura se satura a unos 1.500 ppm, como  $\text{SO}_4\text{Ca}$ , la presencia de otras sales aumenta su solubilidad.

Proceden de rocas sedimentarias, sobretodo yeso y anhidrita, y en menor proporción de la oxidación de los sulfuros de la pirita. En función del contenido de calcio, podrían impartirle un carácter ácido al agua.

Los sulfatos de calcio y magnesio contribuyen a la dureza del agua y constituyen la dureza permanente. El sulfato de magnesio confiere al agua un sabor amargo.

Un alto contenido de sulfatos puede proporcionar sabor al agua y podría tener un efecto laxante, sobre todo cuando se encuentra presente el magnesio. Este efecto es más significativo en niños y consumidores no habituados al agua de estas condiciones.

Cuando el sulfato se encuentra en concentraciones excesivas en el agua ácida, le confiere propiedades corrosivas. Algunos centenares de ppm perjudican la resistencia del hormigón. Industrialmente es importante porque, en presencia de iones calcio, se combina para formar incrustaciones de sulfato cálcico.

La remoción de sulfato puede resultar costosa y requerir métodos complicados, por lo cual es preferible elegir fuentes naturales con niveles de sulfato por debajo de los límites aconsejados. El método más empleado para realizar su eliminación es por intercambio iónico.

Por sus efectos laxantes, su influencia sobre el sabor y porque no hay métodos definidos para su remoción, la OMS recomienda que en aguas destinadas al consumo humano, el límite permisible no exceda 250 mg/L, pero indica, además, que este valor guía está destinado a evitar la probable corrosividad del agua. No afecta especialmente al agua en cantidades moderadas.



La determinación analítica por gravimetría con cloruro de bario es la más segura. Si se emplean métodos complexométricos, hay que estar seguro de evitar las interferencias.

## 2.9.- Nitritos y nitratos

El nitrógeno es un nutriente importante para el desarrollo de los animales y las plantas acuáticas. Por lo general, en el agua se lo encuentra formando amoníaco ( $\text{NH}_3$ ), nitratos ( $\text{NO}_3^-$ ) y nitritos ( $\text{NO}_2^-$ ).

Si un recurso hídrico recibe descargas de aguas residuales domésticas, el nitrógeno estará presente como nitrógeno orgánico amoniacal, el cual, en contacto con el oxígeno disuelto, se irá transformando por oxidación en nitritos y nitratos. Este proceso de nitrificación depende de la temperatura, del contenido de oxígeno disuelto y del pH del agua.

En general, los nitratos (sales del ácido nítrico,  $\text{HNO}_3$ ) son muy solubles en agua debido a la polaridad del ion. En los sistemas acuáticos y terrestres, los materiales nitrogenados tienden a transformarse en nitratos.

Los nitritos (sales de ácido nitroso,  $\text{HNO}_2$ ) son solubles en agua. Se transforman naturalmente a partir de los nitratos, ya sea por oxidación bacteriana incompleta del nitrógeno en los sistemas acuáticos y terrestres o por reducción bacteriana.

El ion nitrito es menos estable que el ion nitrato. Es muy reactivo y puede actuar como agente oxidante y reductor, por lo que solo se lo encuentra en cantidades apreciables en condiciones de baja oxigenación. Esta es la causa de que los nitritos se transformen rápidamente para dar nitratos y que, generalmente, estos últimos predominen en las aguas, tanto superficiales como subterráneas. Esta reacción de oxidación se puede efectuar en los sistemas biológicos y también por factores abióticos.

El  $\text{NO}_3^-$  es la especie derivada del nitrógeno más importante. Suponen una fuente de nutrientes importantes para ciertos organismos autótrofos. Una alta concentración de nitratos puede originar el llamado fenómeno de eutrofización, con un aumento en la población de estos organismos autótrofos que compiten con el oxígeno con otros organismos aerobios de mayor tamaño. La concentración de nitratos, al igual que la de nitritos está relacionada con la posterior aparición de algas y para uso de consumo puede provocar metahemoglobinemia o la llamada enfermedad del bebé azul.

Después de la absorción, tanto nitratos como nitritos se distribuyen con rapidez a todos los tejidos. Una vez en la sangre, el nitrito reacciona con el ion ferroso ( $\text{Fe}_2^+$ ) de la desoxihemoglobina y forma metahemoglobina, en la cual el hierro se encuentra en estado férrico ( $\text{Fe}_3^+$ ), por lo que es incapaz de transportar el oxígeno. Por ello se relaciona al nitrito con una anomalía en la sangre de los niños (metahemoglobinemia)



por la ingestión de aguas con un contenido mayor de 10 mg/l de nitratos (como N) y como resultado de la conversión de nitrato en nitrito. La mayor parte de estos casos se asocian a aguas que contienen más de 45 mg/l de nitrato (10 mg/l como  $\text{NO}_3\text{-N}$ ).

Aunque se ha comprobado que bebés menores de 6 meses que ingieren nitratos en concentraciones altas pueden morir si no reciben tratamiento inmediato, es importante anotar que no todos los niños que ingieren aguas con altos contenidos de nitratos (10 mg/l o más) necesariamente desarrollan la enfermedad. Para ello se requiere una predisposición natural. En este caso, la edad es un factor determinante, porque rara vez se presenta en niños de más de seis meses y mucho menos en adultos.

El uso excesivo de fertilizantes nitrogenados, incluyendo el amoníaco, y la contaminación causada por la acumulación de excretas humanas y animales pueden contribuir a elevar la concentración de nitratos en agua. Generalmente, los nitratos son solubles, por lo que son movilizados con facilidad de los sedimentos por las aguas superficiales y subterráneas.

La presencia de nitratos y nitritos no es extraña, especialmente en aguas almacenadas en cisternas en comunidades rurales.

Las aguas normales contienen menos de 10 ppm de  $\text{NO}_3^-$ , y el agua de mar hasta 1 ppm, pero las aguas contaminadas, principalmente por fertilizantes, pueden llegar a varios centenares de ppm.

Aunque la toxicidad relativa de los nitratos es bien conocida, es difícil establecer cuál es el nivel de una dosis nociva. Los nitritos tienen mayor efecto nocivo que los nitratos, pero como generalmente en las aguas naturales no se presentan niveles mayores de 1 mg/l y la oxidación con cloro los convierte en nitratos, el problema prácticamente queda solucionado.

Los métodos tradicionales de floculación e incluso ablandamiento con cal no son efectivos para la remoción de nitratos. El más eficiente es el de resinas de intercambio iónico, que puede remover concentraciones tan altas como 30 mg/l y reducirlas hasta 0,5 mg/l en procesos continuos, pero no es un método económico en los procesos de potabilización en grandes volúmenes. Están en desarrollo procesos de eliminación biológicos.

Tanto el amonio, como los nitritos y nitratos se pueden determinar mediante espectrofotometría (absorción de la radiación UV por el ión nitrato) o empleando electrometría de electrodos selectivos.

Por sus efectos adversos para la salud de los lactantes y porque no se tienen procesos definitivos para su remoción, el contenido de nitratos en aguas de consumo público no debe exceder, según la EPA, de 10 mg/l. Puesto que los nitritos tienen un



efecto tóxico superior a los nitratos, el contenido no debe exceder de un mg/l; en ambos casos, medidos como nitrógeno.

La OMS establece un valor guía provisional de 50 mg/l (N-NO<sub>3</sub>) y 3 mg/l (N-NO<sub>2</sub>).

### **2.10.- Fosfatos**

El ión fosfato, PO<sub>4</sub><sup>-3</sup>, en general forma sales muy poco solubles y precipita fácilmente como fosfato cálcico. Al corresponder a un ácido débil, contribuye a la alcalinidad de las aguas.

Las especies químicas de fósforo más comunes en el agua son los ortofosfatos, los fosfatos condensados (piro-, meta- y polifosfatos) y los fosfatos orgánicos. Estos fosfatos pueden estar solubles como partículas de detritus o en los cuerpos de los organismos acuáticos.

El fósforo junto con el nitrógeno, son dos de los nutrientes fundamentales de todos los seres vivos, de forma que contenidos anormalmente altos de estos en las aguas pueden producir un crecimiento incontrolado de la biomasa acuática (eutrofización), con problemas de crecimiento de algas indeseables en embalses y lagos, con acumulación de sedimentos, etcétera.

Una acción importante de los fosfatos es la influencia en el transporte y retención de los metales en el agua, debido al fenómeno de complejación.

Concentraciones relativamente bajas de complejos fosforados afectan el proceso de coagulación durante el tratamiento del agua.

El contenido de fósforo en las aguas se debe a los *vertidos* urbanos (detergentes, fosas sépticas, etc.) y por otra parte a los *vertidos* de la industria agroalimentaria (abonos, piensos compuestos, etc.).

La fuente principal de los fosfatos orgánicos son los procesos biológicos. Estos pueden generarse a partir de los ortofosfatos en procesos de tratamiento biológico o por los organismos acuáticos del cuerpo hídrico.

En general no se encuentra en el agua más de 1 ppm, pero puede llegar a algunas decenas debido al uso de fertilizantes. No suele determinarse en análisis de rutina, pero puede hacerse colorimétricamente o por espectrofotometría, siendo necesaria la digestión previa de los polifosfatos (constituyentes de los detergentes) en fosfatos, para su análisis posterior.



Para una buena interpretación de la presencia de fosfatos en las fuentes de aguas crudas, es recomendable la diferenciación analítica de las especies químicas existentes en ellas.

Las normas de calidad de agua no han establecido un límite definitivo. Sin embargo, es necesario estudiar la concentración de fosfatos en el agua, su relación con la productividad biológica y los problemas que estos pueden generar en el proceso de filtración y en la producción de olores.

### **2.11.- Fluoruros**

El ión fluoruro,  $F^-$ , corresponde a sales de solubilidad en general muy limitada. No suele hallarse en proporciones superiores a 1 ppm.

Elemento esencial para la nutrición del hombre. Su presencia en el agua de consumo a concentraciones adecuadas combate la formación de caries dental, principalmente en los niños (0,8 a 1,2 mg/l), y por este motivo se añade a veces al agua potable. Sin embargo, si la concentración de fluoruro en el agua es alta, podría generar manchas en los dientes (“fluorosis dental”) y dañar la estructura ósea.

Debido al aumento de la fluoración de los abastecimientos de aguas, este control es cada vez más importante. Su límite está alrededor de 1mg/l. La determinación analítica suele hacerse por métodos colorimétricos.

Las principales fuentes de concentraciones contaminantes de flúor en el agua son los efluentes de fábricas de acero y metales o de fábricas de plásticos y fertilizantes.

Los procesos convencionales de coagulación con aluminio no son efectivos para la remoción de fluoruros, ya que para reducir la concentración de fluoruros en el agua de 3,6 a 1 mg/l se requieren 350 mg/l de aluminio. Se precipitan con cal ( $F_2Ca$ ).

### **2.12.- Sílice**

Aunque el cuarzo y las arcillas tienen una importancia enorme en las rocas (sobre todo en las sedimentarias), la sílice ( $SiO_2$ ) está en poca proporción en las aguas debido a su baja solubilidad (1-40 mg/l), pudiendo llegar a 100 ppm, especialmente si son aguas bicarbonatadas sódicas. Se encuentra fundamentalmente en forma de ácido silícico  $H_4SiO_4$ , y como materia coloidal. Contribuye ligeramente a la alcalinidad del agua. Se determina analíticamente por colorimetría.

La sílice tiene mucha importancia en los usos industriales porque forma incrustaciones en las calderas y sistemas de refrigeración, y forma depósitos insolubles sobre los álabes de las turbinas. Su eliminación se consigue parcialmente por

precipitación, pero fundamentalmente mediante resinas de intercambio iónico fuertemente básicas.

### **2.13.- Bicarbonatos y carbonatos**

Los bicarbonatos ( $\text{CO}_3\text{H}^-$ ) se presentan normalmente en concentraciones entre 50 y 400 mg/l y proceden de la disolución de minerales carbonatados y del  $\text{CO}_2$  del agua. Los carbonatos ( $\text{CO}_3^{2-}$ ) sólo aparecen en concentraciones apreciables en aguas con pH superiores a 8,5 y precipitan fácilmente en presencia de calcio. Estos iones contribuyen fundamentalmente a la alcalinidad del agua.

### **2.14.- Otros componentes aniónicos**

#### **• Sulfuros**

Los sulfuros ( $\text{S}^{2-}$ ) y el ácido sulfhídrico se encuentran en concentraciones variables en los distintos tipos de aguas, pero en general las aguas contienen mucho menos de 1 ppm. Su característica principal es el olor, por baja que sea su presencia. Son agentes reductores y por tanto originan una Demanda Inmediata de Oxígeno que disminuye el contenido de oxígeno de las aguas, siendo especialmente corrosivos para las aleaciones de cobre.

#### **• Fenoles**

Los compuestos fenólicos son hidroxiderivados del benceno y de compuestos aromáticos polinucleares. Su presencia en el agua está relacionada con la descomposición de hojas y materia orgánica, ácidos húmicos y fúlvicos, pero principalmente se los asocia a procesos de contaminación de las fuentes por desechos industriales, aguas servidas, fungicidas y pesticidas, hidrólisis y oxidación de pesticidas organofosforados, degradación bacteriológica de herbicidas del ácido fenoxialquílico, entre otros. Se determinan espectrofotométricamente a partir de compuestos de condensación del fenol con 4-amino antipirina, ya sea directamente o por extracción previa con cloroformo.

Los compuestos fenólicos y los fenoles halogenados son tóxicos para el hombre a concentraciones altas. Pero aun en cantidades muy pequeñas, cambian las condiciones organolépticas del agua debido a su intenso olor y sabor, ambos desagradables.

Los compuestos fenólicos son muy difíciles de remover con los tratamientos convencionales. Se recomienda que el contenido de los compuestos fenólicos no sea superior a 2  $\mu\text{g/l}$ .

Si un agua filtrada que contiene fenoles es sometida a la cloración, los derivados fenólicos clorados pueden cambiar el olor y el sabor del agua, lo que no necesariamente será percibido en la planta de tratamiento, pero sí puede manifestarse en las conexiones domiciliarias.

### • *Detergentes*

Los detergentes pueden ser de naturaleza aniónica, catiónica o neutra, siendo los primeros los más utilizados. Son sólo muy ligeramente tóxicos, pero presentan problemas de formación de espumas, y pueden interferir los procesos de floculación y coagulación, y afectar la oxigenación del agua. Su determinación se efectúa por formación de complejos estables con azul de metileno (contraíón catiónico) y extracción de estos con cloroformo, determinándose la concentración por espectroscopia UV-vis, por comparación con una curva de calibrado.

Entre los agentes espumantes se agrupa a todos los compuestos tensoactivos que, por su naturaleza, en mayor o en menor grado, producen espuma cuando el agua es agitada. La causa principal reside en la presencia de residuos de los detergentes domésticos, como el alquil-sulfonato lineal (LAS) y el alquil-sulfonato bencénico ramificado (ABS), entre los más comunes.

Asimismo, los “agentes tensoactivos” presentes en el agua pueden dispersar las sustancias insolubles o absorbidas, debido a la disminución de la tensión superficial del agua. Interfieren así en los procesos de coagulación, sedimentación y filtración.

Su acción más importante en las aguas superficiales está relacionada con la interferencia en el poder autodepurador de los recursos hídricos, debido a la inhibición de la oxidación química y biológica. Como consecuencia de esto, aun en aguas fuertemente contaminadas, la determinación de la carga orgánica biodegradable (DBO) suele presentar valores bajos. Esto se debe, entre otras causas, a que las bacterias en presencia de detergentes se rodean de una película que las aísla del medio e impide su acción.

Por otro lado, la solubilidad del oxígeno en aguas que contienen detergentes es menor que en aguas libres de ellos. Se disminuye, en consecuencia, la difusión del oxígeno del aire a través de la superficie del agua.

Frente a la presencia de aceites y grasas, los detergentes juegan un papel emulsionante, lo que depende fundamentalmente de la estructura del grupo liófilo del detergente.

Aunque los detergentes pueden tener estructuras químicas diversas o ser más o menos biodegradables, se ha demostrado que concentraciones menores de 0,5 mg/l no tienen efectos adversos en los procesos de tratamiento ni en la salud.





### • *Ácidos húmicos*

Los ácidos húmicos, generados por la descomposición de cierta materia vegetal, son sustancias orgánicas provenientes del lavado de los suelos que, en combinación con el cloro usado en la desinfección, da origen a la formación de trihalometanos, compuestos que últimamente están siendo asociados a la aparición de cáncer en animales de experimentación,

Los ácidos húmicos tienen un gran poder complejante, y pueden afectar a ciertos procesos de pretratamiento e intercambio iónico.

### **2.15.- Sodio**

El ión sodio,  $\text{Na}^+$ , corresponde a sales de solubilidad muy elevada y difíciles de precipitar, se ve muy afectado por el cambio iónico en arcillas. Suele estar asociado al ión cloruro. Abundante en las aguas subterráneas ligadas a rocas evaporíticas. Sus concentraciones normales, excepto en las zonas donde existen evaporitas, son de 10 a 150 mg/l, pero es fácil encontrar valores muy superiores, de hasta varios miles de mg/l. El agua de mar contiene cerca de 11.000 mg/l. Si se riega con aguas ricas en sodio se pueden provocar problemas de alcalinización o sodificación de suelos.

La determinación analítica se hace por fotometría de llama. En los análisis rutinarios el ión sodio no se determina sino que se calcula como diferencia entre el balance de aniones y cationes.

El sodio se elimina por intercambio iónico, pero como ión monovalente es una de las primeras sustancias que fugan de la columna catiónica o del lecho mixto.

### **2.16.- Potasio**

El ión potasio,  $\text{K}^+$ , corresponde a sales de solubilidad muy elevada y difíciles de precipitar. Las aguas dulces no suelen contener más de 10 ppm y el agua de mar contiene alrededor de 400 ppm, por lo cual es un catión mucho menos significativo que el sodio.

Procede sobretodo de evaporitas y también de algunos silicatos, en el agua es 10 veces menos abundante que en la corteza pues queda retenido en las arcillas de alteración de los silicatos.

Su determinación se hace por fotometría de llama. En los análisis rutinarios se asimila al sodio. Se elimina por intercambio iónico.



### **2.17.- Calcio**

El ión calcio,  $\text{Ca}^{++}$ , forma sales moderadamente solubles a muy insolubles. Es un elemento abundante en los materiales que componen la corteza terrestre (calcita, dolomita, yesos, en las rocas ígneas y metamórficas forma parte de las plagioclasas, anfíboles, piroxenos, etc.) y por tanto, en las aguas subterráneas. Precipita fácilmente como carbonato cálcico ( $\text{CO}_3\text{Ca}$ ); también puede sufrir reacciones de intercambio iónico. Contribuye de forma muy especial a la dureza del agua y a la formación de incrustaciones. Además es un elemento muy móvil, en aguas naturales suele estar en proporciones de 10 a 250 mg/l, o incluso 600 mg/l. El agua de mar contiene unos 400 mg/l.

La eliminación del calcio se realiza por precipitación e intercambio iónico. Se determina analíticamente por complexometría con ácido etilendiaminotetraacético (EDTA) o ácido nitrilotriacético (NTA).

### **2.18.- Magnesio**

El ión magnesio,  $\text{Mg}^{++}$ , tiene propiedades muy similares a las del ión calcio, pero sus sales son, en general, más solubles y difíciles de precipitar; por el contrario, su hidróxido,  $\text{Mg}(\text{OH})_2$ , es menos soluble. Las aguas dulces suelen contener entre 10 y 100 mg/l, y el agua de mar contiene unos 1.300 mg/l. Cuando el contenido en agua alcanza varios centenares, le da un sabor amargo y propiedades laxantes, que pueden afectar su potabilidad. Contribuye a la dureza del agua y a pH alcalino puede formar incrustaciones de hidróxido.

Su determinación analítica se realiza por complexometría.

Se puede precipitar como hidróxido, pero su eliminación se realiza fundamentalmente por intercambio iónico.

### **2.19.- Hierro**

Procede de menas metálicas y también es frecuente en silicatos. En las aguas subterráneas el hierro se encuentra en forma de  $\text{Fe}^{2+}$  en condiciones de potencial redox bajo. Si el potencial redox sube, el  $\text{Fe}^{2+}$  pasa a  $\text{Fe}^{3+}$  que precipita.

El hierro es un constituyente normal del organismo humano (forma parte de la hemoglobina). Por lo general, sus sales no son tóxicas en las cantidades comúnmente encontradas en las aguas naturales.

La presencia de hierro puede afectar el sabor del agua, producir manchas indelebles sobre los artefactos sanitarios y la ropa blanca. También puede formar



depósitos en las redes de distribución y causar obstrucciones, así como alteraciones en la turbiedad y el color del agua.

Tiene gran influencia en el ciclo de los fosfatos, lo que hace que su importancia sea muy grande desde el punto de vista biológico. En la naturaleza se presenta en dos formas: asimilable y no asimilable.

En las aguas superficiales, el hierro puede estar también en forma de complejos organoférricos y, en casos raros, como sulfuros. Es frecuente que se presente en forma coloidal en cantidades apreciables.

Las sales solubles de hierro son, por lo general, ferrosas ( $\text{Fe}^{2+}$ ) y la especie más frecuente es el bicarbonato ferroso:  $\text{Fe}(\text{HCO}_3)_2$ .

En contacto con el oxígeno disuelto en el agua, las sales ferrosas se convierten en férricas por oxidación y se precipitan en forma de hidróxido férrico. Esta precipitación es inmediata con un pH superior a 7,5.

Con un pH mayor de 2,2, el hidróxido férrico es insoluble. El ion ferroso lo es con un pH mayor de 6. De acuerdo con ello, las aguas subterráneas —que, por estar fuera del contacto con el aire, se encuentran en un medio natural fuertemente reductor— podrán tener en solución cantidades notables de hierro ferroso.

Este metal en solución contribuye con el desarrollo de microorganismos que pueden formar depósitos molestos de óxido férrico en la red de distribución.

Se determina analíticamente por colorimetría y espectrofotometría de absorción atómica, dando el hierro total que incluye las formas solubles, coloidal y en suspensión fina.

La remoción del hierro de las aguas crudas superficiales es relativamente fácil con los procesos comunes de remoción de la turbiedad, mediante los cuales su concentración puede bajar de 10 a 0,3 mg/l, que es la concentración recomendada para el agua de consumo. Por aeración del agua la forma ferrosa pasa a férrica y precipita, o bien se elimina por coagulación y filtración. También se puede emplear el intercambio catiónico. Sin embargo, es posible que haya problemas si el hierro está presente en complejos orgánicos inestables.

Por consideraciones de sabor y debido a que los tratamientos convencionales pueden eliminar el hierro en estado férrico pero no el hierro soluble  $\text{Fe}^{+2}$ , las guías de calidad de la OMS recomiendan que en las aguas destinadas al consumo humano no se sobrepase 0,3 mg/l de hierro.



## 2.20.- *Manganeso*

Tiene un comportamiento similar al Fe, con tres estados de valencia (+2, +3 y +4). En las aguas normalmente lo encontramos como  $Mn^{2+}$ , en condiciones oxidantes pasa  $Mn^{4+}$  y precipita como  $MnO_2$ . Igual que el hierro, forma compuestos orgánicos estables.

Su presencia no es común en el agua, pero cuando se presenta, por lo general está asociado al hierro. Rara vez el agua contiene más de 1 mg/l, y entonces requiere un pH ácido.

El manganeso es un elemento esencial para la vida animal; funciona como un activador enzimático. Sin embargo, grandes dosis de manganeso en el organismo pueden causar daños en el sistema nervioso central. En concentraciones superiores a 0,1 miligramo por litro también mancha las instalaciones de plomería y la ropa lavada, y produce en las bebidas un sabor desagradable. Además, como el hierro, puede producir que se acumulen depósitos en el sistema de distribución. Incluso, en ciertas concentraciones, suele ocasionar la aparición de un revestimiento en las tuberías que puede desprenderse en la forma de un precipitado negro ( $MnO_2$ ). Por otro lado, la presencia de manganeso en el agua provoca el desarrollo de ciertas bacterias que forman depósitos insolubles de estas sales, debido a que se convierte, por oxidación, de manganeso en solución al estado mangánico en el precipitado, lo que hace que el agua muestre problemas de sabor, olor y turbidez. Esta acción es similar en el hierro.

Se determina por oxidación a permanganato y colorimetría de la solución oxidada y espectrometría de absorción atómica

Por lo general, en el agua es más difícil de controlar el manganeso que el hierro. Su remoción se realiza formando sales insolubles, para lo cual, en muchos casos, es necesario el uso de oxidantes y un pH alto.

Las Guías de Calidad para Aguas de Consumo Humano de la OMS establecen como valor provisional 0,5 mg/l, pero algunos países recomiendan una concentración diez veces menor: 0,05 mg/l, por consideraciones principalmente relacionadas con el sabor y el olor del agua.

## 2.21.- *Metales tóxicos*

Los más comunes son el arsénico (As), el bario (Ba), el cadmio (Cd), el cobre (Cu), el cromo (Cr), el mercurio (Hg), la plata (Ag), el plomo (Pb) y el selenio (Se). Su presencia en agua es generalmente indicativa de un vertido de tipo industrial. Todos ellos deben ser estrictamente controlados en el origen de la contaminación. Las mediciones analíticas se realizan en general por espectrofotometría de absorción atómica o electrotermica. En algunos casos, como el del cromo puede realizarse el



análisis por otros métodos como espectroscopia UV-vis, electrometría de electrodo selectivo, teniendo siempre en cuenta las posibles interferencias entre diversos metales, así como los límites de detección de cada método.

La concentración máxima de cada uno, internacionalmente permitida, es de 1 mg/l. Aunque la concentración total de los metales tóxicos no debe nunca exceder de los 5 mg/l. En los sistemas municipales de alcantarillado el límite total máximo de metales tóxicos admitido es de 1 mg/l.

#### • *Arsénico*

Puede estar presente en el agua en forma natural. Es un elemento muy tóxico para el hombre. Se encuentra en forma trivalente o pentavalente, tanto en compuestos inorgánicos como orgánicos.

Las concentraciones de As en aguas naturales usualmente son menores de 10 µg/l. Sin embargo, en zonas mineras pueden encontrarse concentraciones entre 0,2 y 1 g/l.

La toxicidad del As es compleja, pues depende de la vía de exposición, del estado de valencia y de la forma química (inorgánica u orgánica) del compuesto. El arsénico inorgánico es el responsable de la mayoría de los casos de intoxicación en seres humanos.

En cuanto a las especies oxidadas, generalmente las sales inorgánicas de  $\text{As}^{3+}$  son más tóxicas que las de  $\text{As}^{5+}$  y la solubilidad de los compuestos de arsénico inorgánico está relacionada con su toxicidad; todos los compuestos solubles son tóxicos.

Se sospecha que el arsénico tiene efectos cancerígenos por la correlación encontrada entre la incidencia de hiperquetosis y cáncer de la piel por un lado y la ingestión de aguas con más de 0,3 mg/l de arsénico por otro.

El metabolismo del As se realiza principalmente en el hígado, aunque su mecanismo no está bien establecido.

La remoción de arsénico del agua se basa principalmente en su oxidación a su forma pentavalente antes de la coagulación con sulfato férrico a pH de 6 a 8, con alumbre a pH de 6 a 7 o ablandamiento con cal a pH 11. A escala experimental, este método ha permitido una remoción de 90% de arsénico.

Debido a sus efectos adversos sobre la salud y a la insuficiente información sobre su remoción del agua, el valor guía de la OMS para el agua de bebida es 0,01 mg/l.



### • **Bario**

Elemento altamente tóxico para el hombre; causa trastornos cardíacos, vasculares y nerviosos (aumento de presión arterial). Se considera fatal una dosis de 0,8 a 0,9 gramos como cloruro de bario (de 550 a 600 miligramos de bario)

La contaminación del agua por bario puede provenir principalmente de los residuos de perforaciones, de efluentes de refinerías metálicas o de la erosión de depósitos naturales.

Las concentraciones halladas en el agua son por lo general muy bajas; varían entre trazas y 0,05 mg/l.

Estudios realizados en las aguas de consumo muestran evidencias de que el bario puede ser absorbido por óxidos e hidróxidos de hierro y manganeso, lo cual explicaría su eliminación durante la coagulación. Sin embargo, existen pruebas que demuestran que el tratamiento convencional mediante coagulantes de aluminio y hierro, con filtración posterior, no es un método particularmente efectivo para la remoción de bario en el agua; eficiencia menor de 30% en pruebas de laboratorio.

Por otro lado, un control adecuado del pH en la planta de ablandamiento del agua mediante cal puede lograr una remoción de 90% del bario (*pH* 7,8).

Como un margen de seguridad en las fuentes de aguas de consumo humano, la OMS da un valor guía de 0,7 mg/l.

### • **Cadmio**

No es un elemento esencial para la vida del hombre. Este metal pesado es potencialmente tóxico, clasificado como un carcinógeno probable para los seres humanos, y su ingestión tiene efectos acumulativos en el tejido del hígado y los riñones.

En el organismo, algunos iones  $\text{Ca}^{2+}$  de los huesos pueden ser reemplazados por iones  $\text{Cd}^{2+}$ , pues ambos iones tienen el mismo estado de oxidación y casi el mismo tamaño. Esta sustitución puede causar fragilidad en los huesos y susceptibilidad a las fracturas.

La ingestión de agua y alimentos que contengan el metal representa de 5 a 10% del total de cadmio absorbido en el organismo. Estas concentraciones dependen de la ingestión de proteínas y de la presencia de vitamina D; incluso, se relaciona con la concentración en el organismo de algunos elementos, como Zn, Se y Ca, con los cuales compite el cadmio. El cadmio también reduce los niveles de hierro hepático.



La vida media del cadmio en el organismo es muy larga y se calcula entre 10 y 30 años, periodo en el cual permanece almacenado en varios órganos, en particular el hígado y los riñones.

La contaminación de las aguas superficiales con este metal pesado puede provenir de la corrosión de los tubos galvanizados, de la erosión de depósitos naturales, de los efluentes de refinerías de metales o de líquidos de escorrentía de baterías usadas o pinturas. Muchos pigmentos usados para la coloración de plásticos o la formulación de pinturas contienen concentraciones elevadas de cadmio.

Se ha encontrado que los procesos de coagulación remueven el cadmio, pero una variable importante es el pH. Al usar sales de aluminio y regular el pH, es posible la remoción de 90% de cadmio en aguas turbias. El sulfato de hierro puede remover 90% de cadmio a pH 7,5. El proceso de ablandamiento cal-soda puede tener una efectividad cercana a 100%, debido a que se lleva a cabo a pH alto.

La OMS recomienda como margen de seguridad un límite máximo permisible de 0,003 mg/l para aguas de consumo humano. Sin embargo, dado el poder bioacumulativo del cadmio, se recomienda que la concentración en el agua tratada sea la menor posible.

#### • *Cobre*

Con frecuencia se encuentra en forma natural en las aguas superficiales, pero en concentraciones menores a un mg/l. En estas concentraciones, el cobre no tiene efectos nocivos para la salud.

Las concentraciones de cobre en el agua de bebida suelen ser bajas, pero el hecho de que existan tuberías de este metal puede incrementarlas de manera considerable. Aunque la ingesta de cobre es necesaria para el organismo humano (esencial para la formación de la hemoglobina), en algunas personas, cuando la concentración del compuesto supera los tres miligramos por litro, se produce una irritación gástrica aguda y en adultos que padecen degeneración hepatolenticular, la regulación del cobre es defectuosa, por lo cual la ingestión prolongada puede provocar cirrosis. Finalmente, existe cierta inquietud por el hecho de que en los lactantes, el metabolismo del cobre no está bien desarrollado y, desde 1984, se ha discutido la posibilidad de que el cobre presente en el agua de bebida genere la aparición de cirrosis hepática durante la primera infancia en lactantes alimentados con biberón. El valor guía recomendado por la OMS para la presencia de cobre en el agua de consumo humano es 2 miligramos por litro.

En concentraciones altas, el cobre puede favorecer la corrosión del aluminio y el cinc y cambiar el sabor del agua.

En algunos sistemas se aplica sulfato de cobre en dosis controladas como mecanismo para combatir las algas en el agua. Las dosis van de 0,1 a 2 mg/l.



Pruebas de coagulación en laboratorio han reportado una eficiencia en la remoción del cobre de entre 60 a 90%, dependiendo del pH y la turbiedad.

#### • *Cromo*

De las especies normalmente presentes en las aguas superficiales, el  $\text{Cr}^{3+}$  es esencial para los seres humanos, pues promueve la acción de la insulina. En cambio, el  $\text{Cr}^{6+}$  es considerado tóxico por sus efectos fisiológicos adversos. No se conoce de daños a la salud ocasionados por concentraciones menores de 0,05 mg/l de  $\text{Cr}^{6+}$  en el agua.

El cromo metálico y los derivados del  $\text{Cr}^{6+}$  usualmente son de origen antropogénico. Por su naturaleza química, el  $\text{Cr}^{3+}$  difícilmente se encuentra con un pH mayor de 5, donde el cromo está, por lo general, en forma hexavalente.

La erosión de depósitos naturales y los efluentes industriales que contienen cromo (principalmente de acero, papel y curtiembres), se incorporan a los cuerpos de aguas superficiales. La forma química dependerá de la presencia de materia orgánica en el agua, pues si está presente en grandes cantidades, el  $\text{Cr}^{6+}$  se reducirá a  $\text{Cr}^{3+}$ , que se podrá absorber en las partículas o formar complejos insolubles. Estos complejos pueden permanecer en suspensión y ser incorporados a los sedimentos. La proporción de  $\text{Cr}^{3+}$  es directamente proporcional a la profundidad de los sedimentos.

En teoría, el  $\text{Cr}^{6+}$  puede resistir en este estado en aguas con bajo contenido de materia orgánica, mientras que con el pH natural de las aguas, el  $\text{Cr}^{3+}$  formará compuestos insolubles, a menos que se formen complejos. Se desconoce la proporción relativa de  $\text{Cr}^{3+}$  y  $\text{Cr}^{6+}$  en las aguas.

En el tracto gastrointestinal de los humanos y los animales, se absorbe menos de 1% del  $\text{Cr}^{3+}$  y alrededor de 10% del  $\text{Cr}^{6+}$ . La forma química, la solubilidad del compuesto en agua y el tiempo de permanencia en los órganos modifican la velocidad de la absorción.

Los compuestos de  $\text{Cr}^{6+}$ , que son fuertes agentes oxidantes, tienden a ser irritantes y corrosivos; también son considerablemente más tóxicos que los compuestos de  $\text{Cr}^{3+}$  si la dosis y la solubilidad son similares. Se ha postulado que esta diferencia en la toxicidad puede estar relacionada con la facilidad con la que el  $\text{Cr}^{6+}$  atraviesa las membranas celulares y con su subsecuente reducción intracelular e intermediarios reactivos.

Se ha demostrado que el  $\text{Cr}^{6+}$  es carcinógeno para los seres humanos, mientras que el  $\text{Cr}^0$  y los derivados de  $\text{Cr}^{3+}$  aún no pueden clasificarse respecto a su carcinogenicidad.

Debido a su gran solubilidad, el  $\text{Cr}^{6+}$  es más difícil de remover que el  $\text{Cr}^{3+}$ . La cloración puede convertir por oxidación el  $\text{Cr}^{3+}$  en  $\text{Cr}^{6+}$  y crear un problema en el





tratamiento del agua. A escala experimental, la remoción del cromo trivalente puede ser efectiva mediante la coagulación con alumbre o sulfato férrico, y en los sistemas de ablandamiento con cal. En este último proceso, el factor pH es muy importante. Con un pH entre 10,6 y 11,3, la remoción puede llegar a 98%, mientras que a 9,2, la eficiencia baja a 70%. La remoción del  $\text{Cr}^{6+}$  es muy difícil mediante el tratamiento convencional de coagulantes. Se ha encontrado que el sulfato ferroso es razonablemente efectivo como reductor del  $\text{Cr}^{6+}$  a  $\text{Cr}^{3+}$ . El ablandamiento cal-soda puede remover entre 80 y 90% de  $\text{Cr}^{3+}$ , pero el  $\text{Cr}^{6+}$  no se remueve a pH 9,5.

La OMS recomienda, como factor de seguridad, que el límite para cromo en fuentes de agua destinadas a consumo humano no exceda 0,05 mg/l como cromo total.

### • *Mercurio*

El mercurio es un metal pesado muy tóxico para el hombre en las formas aguda y crónica. En el tracto intestinal las sales mercuriosas son menos solubles que las mercúricas y, por lo tanto, son menos nocivas. Se considera que dosis de 20 y 50 mg/l en la forma mercúrica son fatales.

En el agua, el Hg se encuentra principalmente en forma inorgánica, que puede pasar a compuestos orgánicos por acción de los microorganismos presentes en los sedimentos. De estos, puede trasladarse al plancton, a las algas y, sucesivamente, a los organismos de niveles tróficos superiores como los peces, las aves rapaces e incluso al hombre. Se considera al mercurio un contaminante no deseable del agua.

El mercurio metálico y el inorgánico se convierten en mercurio metilado por medio de procesos biológicos que se producen en el agua contaminada con este metal. Tanto el dimetil mercurio  $\text{Hg}(\text{CH}_3)_2$  como el ion metilo de mercurio  $\text{HgCH}_3^+$  son absorbidos por los tejidos de los organismos vivos. Estas especies químicas se bioacumulan, permanecen durante largos periodos en los tejidos y pueden incorporarse en la cadena alimentaria biomagnificándose.

La permeabilidad del mercurio elemental en los lípidos es más alta que la de la forma ionizada y, en consecuencia, el  $\text{Hg}_0$  puede atravesar las barreras hematoencefálica y placentaria.

La absorción gastrointestinal de sales de mercurio divalente o monovalente a partir de los alimentos es de aproximadamente 20% del Hg ingerido.

En términos de su toxicidad y sus efectos adversos sobre la salud, el metilmercurio es la forma más importante de mercurio orgánico. Sus efectos son básicamente neurotóxicos y genotóxicos. Este metal afecta sobre todo al riñón, mientras que el metil-mercurio opera principalmente sobre el sistema nervioso central. El valor guía recomendado por la OMS para la presencia de mercurio en el agua de consumo humano es 0,001 miligramos por litro.



Los niveles aceptables de ingestión de mercurio se basan en evidencias epidemiológicas mediante las cuales se sabe que la menor concentración de metilmercurio en la sangre asociada con síntomas tóxicos es 0,2 microgramos por gramo de peso, que corresponde a una prolongada y continua ingestión de 0,3 mg/70 kilogramos por día.

Las pruebas realizadas en plantas piloto demuestran que la remoción de mercurio inorgánico depende del pH y de la turbiedad del agua y tienen poca dependencia de la concentración de mercurio, cuando se encuentra entre 0,003 y 0,016 mg/l. Experimentalmente, se ha comprobado que el tratamiento convencional de coagulación-filtración mediante aluminio o sulfato férrico puede remover entre 70 y 80% de mercurio inorgánico en aguas crudas turbias. Sin embargo, en aguas claras la remoción puede reducirse a la mitad o menos. La coagulación con sulfato férrico (17 mg/l) probó ser 66% efectiva con pH 7 y 97% con pH 8. El sulfato de aluminio es menos eficiente y logra solamente 38% de efectividad a pH 8. La turbiedad desempeña un papel importante en la reducción de las concentraciones de mercurio en el agua, pues experimentalmente se ha demostrado que con turbiedades mayores de 100 UNT, la eficiencia crece sustantivamente. Con respecto al mercurio orgánico, el proceso de ablandamiento con cal es moderadamente efectivo y dependiente del pH y llega a 30% con pH 9,4 y alcanza entre 60 y 80% con pH entre 10,7 y 11,4. Se ha probado experimentalmente que las resinas de intercambio iónico son efectivas en la remoción de mercurio hasta 98%, tanto en la forma orgánica como inorgánica.

#### • *Plata*

Se considera que en las personas que ingieren agua con cantidades excesivas de plata pueden presentar decoloración permanente e irreversible de la piel, los ojos y las membranas mucosas. No es un componente propio de las aguas naturales.

Todos los estudios que se han hecho sobre este elemento y sus posibles efectos son preliminares, por lo cual no se puede postular límites sobre los niveles que afectan la salud humana.

El proceso de floculación puede lograr una eficiencia de entre 70 y 80% mediante sulfato férrico con un pH entre 7 y 9 ó sulfato de aluminio con un pH entre 6 y 8. También ofrece buenos resultados el ablandamiento con cal con un pH entre 7 y 9.

Debido a que no hay suficiente información, las guías de algunos países consideran que el límite no debe excederse de 0,05 mg/l en agua de consumo humano. Sin embargo, la OMS considera que no es necesario recomendar un límite de concentración de plata en el agua de bebida, debido a que con concentraciones normalmente encontradas en ella, no se han detectado daños en la salud de los consumidores.

### • *Plomo*

Las fuentes naturales por lo general contienen plomo en concentraciones que varían notoriamente. Se pueden encontrar desde niveles tan pequeños como trazas hasta concentraciones importantes que contaminan definitivamente el recurso hídrico.

El plomo presente en el agua de consumo humano procede, en parte, de fuentes naturales por disolución, pero sobre todo de los sistemas de plomería doméstica. En instalaciones antiguas, la mayor fuente de plomo en el agua de bebida proviene de las tuberías de abastecimiento y de las uniones de plomo. Si el agua es ácida, puede liberar gran cantidad de plomo de las tuberías, principalmente en aquellas en las que el líquido permanece estancado por largo tiempo. Aun en el agua estancada por corto tiempo en una tubería de cobre-plomo, la concentración de este último metal puede llegar a hasta 100 µg Pb/l.

Es un elemento con gran capacidad de bioacumulación; afecta prácticamente a todos los órganos, tanto de los seres humanos como de los animales. Se trata de un tóxico general que se acumula en el esqueleto. Sus efectos negativos para la salud son más perjudiciales en mujeres embarazadas, niños hasta los seis años de edad y lactantes. Es tóxico para el sistema nervioso y existen datos certeros de que concentraciones en la sangre inferiores a 30 microgramos por decilitro afectan al sistema nervioso de los niños. Es causa de la enfermedad denominada *saturnismo*. El plomo está clasificado como un posible carcinógeno para los seres humanos.

Debido a que la exposición al plomo es muy común y por el peligro potencial que representa, las concentraciones de este metal en el agua deben ser las más bajas posibles. El valor guía recomendado por la OMS para la presencia de plomo en el agua de consumo humano es 0,01 miligramos por litro.

La remoción del plomo presente en el agua en los procesos convencionales de floculación o ablandamiento con cal se realiza formando hidróxidos y carbonatos de plomo insolubles. Mediante este método es posible llegar a una eficiencia de 98%. La coagulación con aluminio con un pH de 6,5 a 7 puede lograr una remoción de 60 a 80%. Con pH mayores de 9,5 la eficiencia de remoción sube a 90%. Cuando las aguas crudas de baja turbiedad contienen una alta concentración de plomo, el sulfato férrico puede ser más efectivo para su remoción. El ablandamiento cal-soda con un pH entre 7 y 11 puede remover por encima del 90% de plomo en el agua.

### • *Selenio*

Es raro encontrarlo disuelto en aguas naturales. Su origen, por lo general, está ligado a descargas de residuos mineros, petroleros e industriales, pero también puede provenir de la erosión de depósitos naturales.



Las especies más frecuentes son  $\text{Se}^{4+}$  y  $\text{Se}^{6+}$ . Ambas formas son muy estables e independientes una de la otra. Los métodos tradicionales de análisis no hacen una distinción especial entre ambas.

Los efectos del selenio en el hombre son similares a los del arsénico y, al igual que este, puede causar intoxicaciones agudas y crónicas que en algunos casos pueden llegar a ser fatales. Entre los principales síntomas que presentan los intoxicados con selenio están la caída del cabello y de las uñas, el adormecimiento de los dedos de las manos y los pies y problemas circulatorios.

Pruebas de laboratorio y en plantas piloto han demostrado que la remoción del selenio es moderada (70–80%) en el proceso de coagulación con sulfato férrico con un pH entre 6 y 7, y que es menos efectiva con sulfato de aluminio. Los reportes indican que el intercambio iónico o la ósmosis inversa mejoran la efectividad de remoción, que puede llegar a ser superior a 90%.

Debido a que en la práctica el tratamiento solo tiene un efecto moderado en la remoción del selenio y a que sus efectos nocivos sobre la salud son comprobados, la OMS recomienda que en aguas destinadas al consumo humano, este elemento no esté por encima de 0,01 mg/l.

## **2.22.- Gases disueltos**

El agua de precipitación disuelve los gases que existen en la atmósfera. La Ley de Henry establece que la concentración de los gases disueltos en el agua dependerá de la presión parcial del gas en la atmósfera.

Los gases más importantes para la composición hidroquímica del agua subterránea son el  $\text{O}_2$  y el  $\text{CO}_2$ . En el suelo, como consecuencia de los procesos de respiración de las raíces y animales y la degradación de la materia orgánica, la composición del aire es distinta a la atmosférica, la presión parcial del oxígeno es menor y la presión parcial del  $\text{CO}_2$ . Por ello el agua del subsuelo tiene una mayor concentración de  $\text{CO}_2$  y menor cantidad de  $\text{O}_2$  que el agua superficial.

Si el agua llega a la zona saturada del acuífero y se pierde el contacto con la atmósfera, el oxígeno se puede consumir completamente. Esto es importante para las reacciones de oxidación – reducción que se producen en el medio subterráneo.

El dióxido de carbono,  $\text{CO}_2$ , es un gas relativamente soluble que se hidroliza formando iones bicarbonato y carbonato, en función del pH del agua. Las aguas subterráneas profundas pueden contener hasta 1.500 ppm, pero en las aguas superficiales se sitúa entre 1 y 30 ppm. Un exceso de  $\text{CO}_2$  hace al agua corrosiva, factor importante en las líneas de vapor y condensados. Se elimina por aeración, desgasificación o descarbonatación.



El oxígeno,  $O_2$ , por su carácter oxidante juega un papel importante en la solubilización o precipitación de iones que presentan una forma insoluble. Su presencia es vital para todas las formas de vida superior y para la mayoría de microorganismos. Es el parámetro más importante en el control de la calidad de las aguas superficiales en cauces naturales. Provoca la corrosión de los metales, en líneas y equipos; pero su ausencia puede representar la presencia de otros gases objeccionables, tales como metano, sulfhídrico, etc. Se determina “in situ” mediante electrodo de membrana o por yodometría fijando el oxígeno con sulfato de magnesio, expresándolo como mg/l de oxígeno disuelto en la muestra de agua. Deben tomarse las debidas precauciones para no arrastrar ni disolver oxígeno del aire durante la manipulación de la muestra. El valor máximo de oxígeno disuelto (OD) es un parámetro muy relacionado con la temperatura del agua y disminuye con ella. La concentración máxima de OD en el intervalo normal de temperaturas es de aproximadamente 9 mg/l, considerándose que cuando la concentración baja de 4 mg/l, el agua no es apta para desarrollar vida en su seno. Se elimina por desgasificación, o mediante reductores como el sulfito sódico y la hidracina.

El ácido sulfhídrico,  $SH_2$ , causa un olor a huevos podridos y es causa de corrosión. Se puede eliminar por aeración u oxidarlos por cloración. También se elimina con un intercambiador aniónico fuerte.

El amoníaco,  $NH_3$ , es un indicador de contaminación del agua, y en forma no iónica es tóxico para los peces. Al clorar el agua a partir del amoníaco se forman cloraminas, también tóxicas. Provoca la corrosión de las aleaciones de cobre y zinc, formando un complejo soluble. Se puede medir con electrodos específicos o por colorimetría con el reactivo de Nessler. Se elimina por desgasificación, o intercambio catiónico. La OMS establece como valor guía para aguas de bebida 1,5 mg/l, referido más bien a criterios de aceptabilidad (olor y sabor).

### **3.- Parámetros indicativos de contaminación orgánica y biológica**

Las aguas naturales, además de sustancias minerales y disueltas, pueden llevar en suspensión sustancias orgánicas provenientes del lavado de los suelos o del metabolismo de los organismos que viven en ellos. Además, los cuerpos de aguas superficiales pueden recibir descargas de aguas residuales de origen doméstico o industrial, las cuales provocan la polución y la contaminación en niveles variables.

Las sustancias provenientes del lavado de suelos son principalmente ácidos húmicos, mientras que las producidas por el metabolismo de los organismos acuáticos son los hidratos de carbono, las proteínas, las aminas, los lípidos, etcétera, así como pigmentos, hormonas y vitaminas, que funcionan como catalizadores o inhibidores de las funciones biológicas.

Las sustancias provenientes de los desechos animales son principalmente derivados de la urea o úrea, la cadaverina y la putrescina, entre otros.

Por lo general, las aguas naturales no contaminadas presentan cantidades mínimas de materia orgánica, salvo aquellas que provienen de bosques o aguas estancadas.

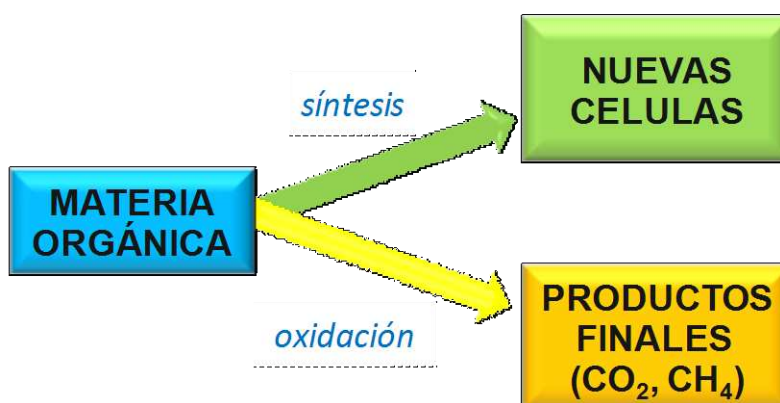
Los residuos domésticos contienen materias orgánicas en descomposición, detergentes y microorganismos. Los vertidos industriales contienen múltiples compuestos orgánicos, tales como aceites y disolventes. De la actividad agrícola resultan residuos de herbicidas y pesticidas, etc. La concentración de estos compuestos orgánicos en el agua no es constante, sino variable por múltiples causas, y obliga a ajustes permanentes en las plantas de tratamiento.

La materia orgánica puede ser, en muchos casos, la responsable del color, el olor y el sabor del agua, los cuales deben ser eliminados durante el tratamiento a fin de hacerla apta para el consumo humano.

Desde el punto de vista de la contaminación, y dentro de los procesos de tratamientos biológicos, los compuestos orgánicos se dividen en dos grandes grupos:

- Materia Orgánica Biodegradable.
- Materia Orgánica No-Biodegradable

Se define por **BIODEGRADABILIDAD**: “La característica de determinados compuestos para poder ser utilizados por los microorganismos como fuente de alimentación. Consecuentemente, como sustrato en procesos de oxidación para obtener la energía precisa para la vida, o bien en procesos de síntesis mediante la elaboración a partir de la mencionada materia orgánica (M.O.) de productos muchos más complejos (amino-ácidos, proteínas,...) que acabarán dando lugar por reproducción a nuevos microorganismos”.



### Concepto de Biodegradabilidad



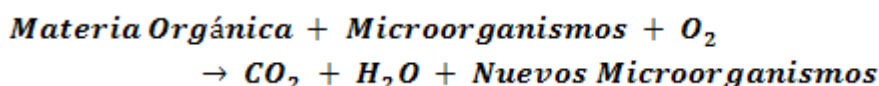
Estas sustancias orgánicas representan una fuente de alimentación para los organismos (autótrofos y heterótrofos) presentes en el agua. Tienden a desaparecer progresivamente por oxidación, y pasar a  $\text{CO}_2$ , amoníaco, nitritos, nitratos, etcétera.

La demanda de oxígeno de las aguas residuales es resultado de tres tipos de materiales: (1) materiales orgánicos carbónicos, utilizables como fuente de alimentación por organismos aeróbicos; (2) nitrógeno oxidable, derivado de la presencia de nitritos, amoníaco, y en general compuestos orgánicos nitrogenados que sirven como alimentación para bacterias específicas (*Nitrosomonas* y *Nitrobacter*); y (3) compuestos químicos reductores (ion ferroso, sulfitos, sulfuros, que se oxidan por oxígeno disuelto).

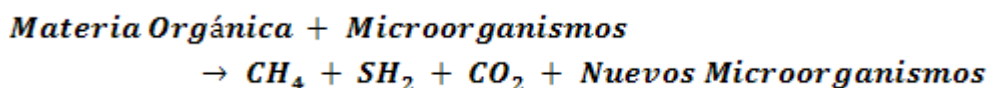
Para aguas residuales domésticas, prácticamente toda la demanda de oxígeno se debe a la materia orgánica Carbonosa.

Los tipos de reacciones bioquímicas que tienen lugar son:

- AEROBIAS (en presencia de oxígeno):



- ANAEROBIAS (en ausencia de oxígeno):



Entre los múltiples factores que afectan a la biodegradabilidad de un agua residual, se encuentran:

- Naturaleza de la materia orgánica.
- Tipo de microorganismos.
- Temperatura del agua residual.
- pH.
- Salinidad.
- Tiempo de reacción.
- Presencia de inhibidores y/o tóxicos.
- Concentración de nutrientes (Nitrógeno y Fósforo) y oligoelementos (Mg, Ca, Fe,...).



Los contaminantes orgánicos biodegradables son de fácil remoción y no constituyen problema durante el tratamiento, siempre y cuando se encuentren en concentraciones no excesivas. En este último caso, la precloración puede constituir una alternativa que debe ser cuidadosamente controlada para evitar la formación de contaminantes aún más peligrosos.

Los contaminantes orgánicos no biodegradables (hidrocarburos, pesticidas, productos aromáticos, etcétera) son un problema difícil de afrontar para plantas de tratamiento convencionales. En la mayoría de los casos, pueden ser controlados mediante la adición de carbón activado pulverizado o el uso de carbón activado granular dispuesto sobre los lechos de los filtros. Sin embargo, es necesario considerar que esto representa costos adicionales de tratamiento y un mayor control analítico, en la mayoría de los casos especializado, de los procesos de tratamiento en planta.

Como es muy difícil determinar analíticamente la presencia de estas sustancias orgánicas en el agua, se han establecido métodos globales de determinación menos específicos que los que miden radicales químicos, y que sin embargo permiten el control de las unidades de tratamiento. Los métodos analíticos para contaminantes orgánicos pueden clasificarse en dos grupos:

**Grupo 1: Métodos cuyo parámetro es el Oxígeno**

- Demanda teórica de oxígeno (DTeO)
- Demanda química de oxígeno (DQO)
- Demanda bioquímica de oxígeno (DBO)
- Demanda total de oxígeno (DTO)

**Grupo 2: Métodos cuyo parámetro es el Carbono:**

- Carbono orgánico total (COT)
- Carbono orgánico teórico (COTe)

De estos métodos de análisis, los más importantes y utilizados son el de demanda química de oxígeno (DQO) y el de demanda bioquímica de oxígeno en 5 días (DBO<sub>5</sub>).

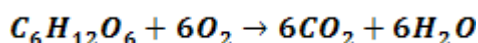
**3.1.- Métodos cuyo parámetro es el oxígeno**

**• Demanda teórica de oxígeno: DTeO**

Es la que corresponde a la cantidad estequiométrica de Oxígeno necesaria para oxidar completamente un determinado compuesto. Es la cantidad teórica de Oxígeno



requerida para transformar completamente la fracción orgánica de aguas residuales en gas carbónico (CO<sub>2</sub>) y agua (H<sub>2</sub>O). Así, la ecuación para la oxidación de la glucosa es:



- El peso molecular de la glucosa es igual a  $6 \times 12 + 12 \times 1 + 6 \times 16 = 180$
- El peso molecular el oxígeno es  $6 \times 2 \times 16 = 192$ .

Puede estimarse que la DTeO de una solución de 300 mg/l de glucosa corresponde a 320 mg/l, es decir,  $(192 / 180) \times 300$  mg/l.

La DTeO en la práctica no puede calcularse pero es aproximadamente igual a la DQO.

• ***Demanda química de oxígeno: DQO***

Para la cuantificación de la materia orgánica total, se emplea la DQO (Demanda Química de Oxígeno). Es la cantidad de oxígeno disuelto consumida por un agua residual durante la oxidación "por vía química" provocada por un agente químico fuertemente oxidante. Mide la capacidad de consumo de un oxidante químico y se expresa en ppm de O<sub>2</sub>. Indica el contenido en materias orgánicas oxidables y otras sustancias reductoras, tales como Fe<sup>++</sup>, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>, etc.

Los métodos utilizados son dos: uno con permanganato potásico (KMnO<sub>4</sub>) para el caso de aguas limpias, y otro con dicromato potásico (K<sub>2</sub>Cr<sub>2</sub>O<sub>7</sub>) para aguas residuales.

La ventaja de las mediciones de DQO es que los resultados se obtienen rápidamente, precisando su ensayo 1 ó 2 horas si la oxidación se efectúa en frío, o bien 20 ó 30 minutos si la oxidación se efectúa con dicromato en caliente, pero tienen la desventaja de que no ofrecen ninguna información de la proporción del agua residual que puede ser oxidada por las bacterias ni de la velocidad del proceso de biooxidación.

Teniendo en cuenta que la oxidación que se lleve a cabo en un laboratorio de ensayos o de análisis de DQO no se corresponde con la estequiométrica, el valor de la DQO no debe esperarse que sea igual al de la DTeO. Los análisis normalizados para determinación de la DQO dan valores que varían entre el 80 y el 85% de la DTeO, dependiendo de la composición química del agua residual que se está ensayando. Los análisis rápidos de la DQO dan valores que se acercan al 70% de la DTeO.

Las aguas no contaminadas tienen valores de la DQO de 1 a 5 ppm, o algo superiores. Las aguas con valores elevados de DQO, pueden dar lugar a interferencias

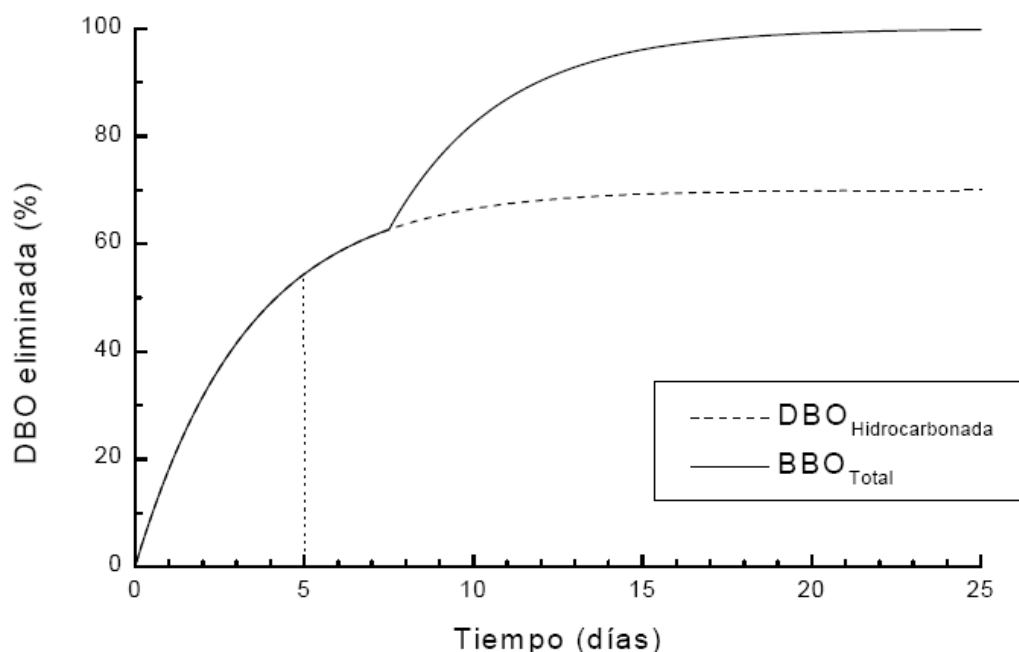
en ciertos procesos industriales. Las aguas residuales domésticas suelen contener entre 250 y 600 ppm. En las aguas residuales industriales la concentración depende del proceso de fabricación de que se trate.

### • *Demanda bioquímica de oxígeno: DBO*

Para la cuantificación de la materia orgánica biodegradable, se emplea la DBO (Demanda Biológica de Oxígeno). Es la cantidad de oxígeno disuelto consumida por un agua residual durante la oxidación «por vía biológica» de la materia orgánica biodegradable presente en dicha agua residual, en unas determinadas condiciones de ensayo (20° C, presión atmosférica, oscuridad y muestra diluida con agua pura manteniendo condiciones aerobias durante la prueba) en un tiempo dado.

El cálculo se efectúa mediante la determinación del contenido inicial de oxígeno disuelto (OD) de una muestra dada y lo que queda después de cierto tiempo en otra muestra semejante, conservada en un frasco cerrado a 20 °C. La diferencia entre los dos contenidos corresponde a la DBO.

Al observar la variación del OD en función del tiempo para una temperatura de 20 °C, se aprecia que ésta no sufre una variación constante, sino que al cabo de un periodo de aproximadamente 8 días, la velocidad a la que se consume el oxígeno aumenta bruscamente; esto se debe a que se ha iniciado la biodegradación de los compuestos orgánicos nitrogenados por efecto de las bacterias nitrificantes, con lo cual estamos observando la superposición de dos curvas, la de biooxidación de los compuestos hidrocarbonados (línea de trazo fino) y la de los compuestos nitrogenados orgánicos.



Variación de la demanda biológica de oxígeno (DBO) en función del tiempo a 20 °C

Como la DBO es un parámetro fuertemente influido por el tiempo, se suele determinar a dos tiempos diferentes:

- **DBO<sub>5</sub>**: variación de la OD determinada al cabo de cinco días en condiciones estándar, y que nos proporciona una idea del carbono orgánico biodegradable existente en la muestra. En estas condiciones de tiempo y temperatura se biooxidan aproximadamente los 2/3 del carbono orgánico biodegradable total de un agua residual urbana estándar.

- **DBO<sub>ult</sub>**: variación del OD determinada al cabo de más de 20 días en las condiciones estándar del ensayo, siendo la suma de la materia hidrocarbonada y nitrogenada biooxidable.

La DBO nos da información de la cantidad de materia orgánica biodegradable presente en una muestra, sin aportar información sobre la naturaleza de la misma. Hay que tener presente, que un bajo valor de DBO no tiene por qué ser indicativo de un bajo nivel de contaminación orgánica, dado que existen sustancias difícilmente biodegradables (sustancias refractarias) o que incluso inhiben el proceso biológico (tóxicos).

Las aguas subterráneas suelen contener un DBO<sub>5</sub> menor de 1 ppm. Un contenido superior es indicativo de contaminación. En las aguas superficiales su contenido es muy variable. En las aguas residuales domésticas se sitúa entre 100 y 350 ppm. En las aguas residuales industriales su concentración es totalmente dependiente del proceso de fabricación pudiendo alcanzar varios miles de ppm. Su eliminación se realiza por procesos fisicoquímicos y biológicos aerobios o anaerobios.

En muchos casos, tan importante o más que la determinación de la DBO de un efluente en mg/L, es conocer la carga contaminante total del mismo como kg de DBO por día, siendo función de la DBO<sub>5</sub> y del caudal Q de efluente, calculándose la misma mediante la siguiente expresión:

$$kg\ DBO/día = DBO_5\ (mg/L) \cdot Q\ (m^3/día) \cdot 10^{-3}$$

Como la DQO oxida toda la materia orgánica mientras que la DBO sólo la biodegradable, la relación DBO/DQO será siempre menor de la unidad; y es un indicativo de la biodegradabilidad de la materia contaminante. En aguas residuales un valor de la relación DBO/DQO menor que 0,2 se interpreta como un vertido de tipo inorgánico y si es mayor que 0,6 como orgánico.

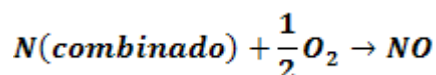
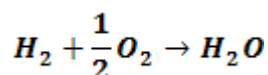
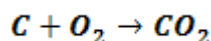
• ***Demanda total de oxígeno: DTO***

La utilidad de los métodos normalizados para establecimiento de la DQO se debe al hecho de que los resultados se obtienen en dos horas, en lugar de los 5 días necesarios para la medición de la DBO. Sin embargo, el método DQO se reconoce que no oxida ciertos contaminantes, como piridina, benceno, amonio, aunque la oxidación de la mayoría de los compuestos orgánicos se ha contrastado que llega a un 95-100% de la teórica.

En consecuencia, en la búsqueda de métodos analíticos mejorados para la determinación de la demanda de oxígeno se han encontrado técnicas, que son: (1) muy significativas y correlacionables con los parámetros de control y vigilancia; (2) rápidas, ya que los resultados se conocen en pocos minutos y no en horas y días, y (3) adaptables a la automatización y control en continuo.

Es un análisis instrumental en el que los compuestos orgánicos y algunos inorgánicos son transformados en productos estables, tales como CO<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>O, en una celda de combustión catalizada con platino. La DTO es determinada por la pérdida de oxígeno en el gas portador.

La DTO mide el total de oxígeno consumido basándonos en las siguientes reacciones químicas para el proceso de combustión catalítica:



Los resultados de los análisis de DTO para distintos compuestos indican que las demandas de oxígeno medidas están muy cercanas a las teóricas y en todo caso más que las señaladas en los métodos químicos. Ninguno de los iones normalmente encontrados en las aguas residuales causan interferencias apreciables con el análisis de la DTO.

La relación entre la DTO y la DQO y DBO<sub>5</sub> depende fundamentalmente de la composición del agua residual. Consecuentemente estas relaciones varían de acuerdo con el grado de tratamiento biológico al cual el agua residual ha sido sometido.

### 3.2.- Métodos cuyo parámetro es el carbono

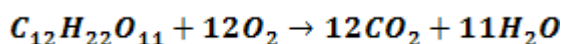
#### • *Carbono orgánico total: COT*

Indica la cantidad total de carbono orgánico presente en una muestra, expresada en mg/L. El carbono orgánico total (COT) y los ensayos correspondientes se basan en la oxidación del carbono de la materia orgánica a dióxido de carbono, y determinación del CO<sub>2</sub> por absorción en hidróxido potásico (KOH) o por análisis instrumental (análisis infrarrojo). Algunos compuestos orgánicos pueden resistir a la oxidación y dar valores ligeramente inferiores a los reales. En la actualidad existen equipos comerciales que proporcionan simultáneamente y como valores independientes el contenido total de carbono orgánico, junto al inorgánico y CO<sub>2</sub> disuelto. Es un método instrumental, basado en la combustión total del carbono por oxidación a CO<sub>2</sub> (T<sup>a</sup> > 900 °C) en presencia, si es necesario, de catalizadores de oxidación (V<sub>2</sub>O<sub>5</sub>). Es un método rápido, siendo su principal inconveniente el coste del equipo y que en la actualidad no es un parámetro aceptado en la legislación vigente para aguas, situación que puede modificarse en un futuro próximo. Los métodos de muestreo son similares a los empleados para la determinación de DQO y DBO, debiendo tener especial cuidado en no someter las muestras a la luz, lo cual favorecería la actividad biosintética, modificando los resultados obtenidos.

#### • *Carbono orgánico teórico: COTe*

Teniendo en cuenta que la demanda teórica de oxígeno (DTeO) mide oxígeno y que el carbono orgánico teórico (COTe) mide carbono, la relación entre la DTeO y COTe se calcula rápidamente de acuerdo con los cálculos estequiométricos de la ecuación de oxidación.

La ecuación nos representa la oxidación total de la sacarosa:



Peso molecular: (12 x 12)    (12 x 32)

$$DTeO/COTe = (12 \times 32)/(12 \times 12) = 2,67$$

La relación entre pesos moleculares de oxígeno y carbono es 2,67. De esta forma la relación teórica entre la demanda de oxígeno y el carbono orgánico se corresponde con la relación estequiométrica de oxígeno y carbono para la oxidación total de los compuestos orgánicos en consideración. La relación entre la DQO (o DBO) y la COT varía considerablemente de acuerdo con esta relación teórica.



### 3.3.- Demanda de cloro (*breakpoint*)

Es una medida del contenido en materia orgánica de un agua, obtenida al añadir cloro. Inicialmente se forman compuestos de cloro con materia orgánica, pero que se van destruyendo al aumentar la adición. El breakpoint, o punto de ruptura, corresponde al inicio de la destrucción de los compuestos clorados originalmente formados. No tiene interés en la caracterización de aguas subterráneas, pero sí para las aguas superficiales. Es importante en el tratamiento de aguas potables para determinar la cantidad de desinfectante a añadir. Se mide en ppm de  $\text{Cl}_2$ .

## 4.- Parámetros bacteriológicos

La bacteriología es el estudio de las bacterias. Las bacterias son microorganismos que se encuentran en el aire, en el suelo y en el agua. Pertenecen al reino de los protistas (organismos unicelulares o multicelulares sin diferencia tisular). Algunos autores las clasifican dentro del reino vegetal. Generalmente, son organismos de dimensiones microscópicas.

Las bacterias que usualmente se encuentran en las aguas de abastecimiento presentan de uno a cuatro micrómetros (un micrómetro = 0,001 mm), y su origen es:

- a) bacterias cuyo hábitat es el agua;
- b) bacterias provenientes del suelo y transportadas al agua por la escorrentía;
- c) bacterias presentes en la atmósfera y transportadas al agua por la lluvia, y
- d) bacterias provenientes de desagües o de residuos orgánicos arrojados al agua.

La investigación de organismos patógenos en el agua es muy compleja. Además de las dificultades técnicas propiamente dichas, estas bacterias se encuentran en el agua en cantidad reducida y su llegada es intermitente. Como índice de su posible presencia en el agua, usamos otros organismos: los pertenecientes al grupo coliforme.

Las bacterias del grupo coliforme se encuentran en el intestino, en las heces humanas y en las de animales de sangre caliente. Se denomina *organismos coliformes* a las bacterias gramnegativas en forma de bastoncillos, no esporuladas, aerobias y anaerobias facultativas y oxidasa negativa, capaces de crecer en presencia de sales biliares u otros compuestos tensoactivos; fermentan la lactosa a temperaturas de 35 °C a 37 °C con producción de ácido, gas y aldehído entre 24 y 48 horas. Pertenecen a este grupo los siguientes géneros: *Escherichia*, *Citrobacter*, *Enterobacter* y *Klebsiella*.

Los organismos coliformes no son en sí mismos perjudiciales y de hecho son interesantes para la degradación de la materia orgánica en los procesos de tratamiento.



Sin embargo, junto con los organismos coliformes el hombre descarga otros microorganismos patógenos tales como los que pueden causar fiebres tifoideas, disentería, diarrea, cólera, etc. Teniendo en cuenta que la población de estos microorganismos patógenos en las aguas residuales es pequeña y además difícil de localizar, se utiliza la presencia de organismos coliformes que son numerosos y fáciles de localizar como indicador de la presencia potencial de organismos patógenos.

Los coliformes son organismos indicadores de contaminación fecal debido a las siguientes razones:

- a) Normalmente se encuentran en el intestino del hombre y de los animales de sangre caliente.
- b) Existen en las heces en una proporción de 300 millones por gramo de heces (algunas bacterias del grupo también se originan en el suelo o en los vegetales).
- c) Debido a la prevalencia de los elementos del grupo coliforme en las aguas residuales, estos pueden ser rápidamente aislados en el agua recientemente contaminada por materia fecal.

De lo anterior se deduce que si el agua está contaminada por materia fecal, los agentes de enfermedades transmitidos por vía hídrica también podrán estar presentes en ella.

- d) La ausencia de coliformes es prueba de que el agua es potable desde el punto de vista bacteriológico.

El ensayo normal para bacterias coliformes está basado en su habilidad para fermentar lactosa produciendo gas. El método normal utilizado consiste en llevar a cabo cinco ensayos con series de tres muestras (un total de 15 ensayos). La secuencia de volúmenes para las muestras se toma con decrementos de 10 (10/1/0,1/0,01 ml).

El número de ensayos positivos y negativos que corresponden a cada volumen seleccionado se va anotando. El denominado número más probable (NMP) de organismos coliformes puede obtenerse a través de una tabla estadística basada en el número relativo de ensayos positivos y negativos para tres muestras (cinco ensayos por muestra). Las aguas con un NMP inferior a 1, son satisfactoriamente potables.

La presencia de microorganismos no tiene importancia en muchos procesos industriales pero la industria alimentaria requiere agua de calidad potable. La destrucción de las bacterias da lugar a sustancias llamadas pirógenos, de especial importancia en el agua empleada para la producción de inyectables en la industria farmacéutica. Los microorganismos también pueden dar lugar a la formación de limos, especialmente en los circuitos cerrados de refrigeración.



Según el destino del agua, la eliminación de bacterias se realiza por filtración, tratamiento biológico, o esterilización por luz ultravioleta, cloración u ozonización.

## **5.- Parámetros radiológicos**

Todas las aguas presentan una determinada radiactividad natural, como consecuencia de la presencia de los isótopos de los elementos. Este tipo de contaminación tiene su origen en aguas procedentes de hospitales, centros de investigación farmacéuticos, centrales nucleares, etc.

Se deben considerar dos tipos de contaminación radiológica: la natural y la provocada por el hombre.

Los radionúcleos naturales (emisores alfa) ocurren algunas veces en aguas subterráneas, pero el tratamiento con cal-soda empleado para el ablandamiento es suficiente para eliminarlos, así como la ósmosis reversa.

Los radionúcleos artificiales (emisores beta y gama) son el producto de residuos de plantas atómicas o de fallas en su control y, por lo tanto, son fácilmente controlables si se ejerce una vigilancia permanente sobre ellas, ya que para su eliminación se requieren estudios particulares en cada caso.

La presencia de materiales radioactivos en las aguas es un riesgo de importancia creciente. Al estar sometidas las fuentes de suministro a un creciente peligro de contaminación, las autoridades han establecido valores límites de aceptación. Suelen medirse las actividades alfa y beta mediante contadores de centello. Su importancia es más sanitaria que industrial.

## **2.5. Índices de calidad de las aguas**

La valoración de la calidad del agua puede ser entendida como la evaluación de su naturaleza química, física y biológica, en relación con la calidad natural, los efectos humanos y usos posibles. Para hacer más simple la interpretación de los datos de su monitoreo, es cada vez más frecuente el uso de índices de calidad de agua, los cuales son herramientas prácticas que reducen una gran cantidad de parámetros a una expresión sencilla dentro de un marco unificado.

Un índice se podría definir como el análisis conjunto de varios parámetros o variables dando lugar a una sola expresión numérica. Un índice posee características parecidas a las de un indicador, pero su carácter social está más acentuado.



La estructura de cálculo de la mayoría de los índices de calidad del agua (ICA) se basa en la normalización de los parámetros que los conforman de acuerdo con sus concentraciones, para su posterior ponderación en función de su importancia en la percepción general de la calidad agua; se calcula mediante la integración de las ponderaciones de los parámetros a través de diferentes funciones matemáticas

Las tabla siguiente muestra las ecuaciones de cálculo de los ICA, asociados por grupos de acuerdo con el tipo de ecuación utilizada.

Ecuaciones de Cálculo empleadas para la determinación de ICA			
Grupo	Índice	Ecuación	Observaciones
1	ICA NSF (EU) ICA Dinus (EU) IQA CETESB (Brasil) ICA Rojas (Colombia) ICAUCA (Colombia)	$ICA_{m} = \prod_{i=1}^n I_i^{W_i}$	Promedio geométrico ponderado: W <sub>i</sub> : peso o porcentaje asignado al i-ésimo parámetro I <sub>i</sub> : subíndice de i-ésimo parámetro
2	CCME-WQI (Canadá) DWQI (EU)	$ICA = 100 - \left[ \frac{\sqrt{F_1^2 + F_2^2 + F_3^2}}{1.732} \right]$	El índice incorpora tres elementos: Alcance (F <sub>1</sub> ): porcentaje de parámetros que exceden la norma. Frecuencia (F <sub>2</sub> ): porcentaje de pruebas individuales de cada parámetro que excede la norma. Amplitud (F <sub>3</sub> ): magnitud en la que excede la norma cada parámetro que no cumple.
3	UWQI (Europa)	$UWQI = \sum_{i=1}^n W_i I_i$	Promedio aritmético ponderado: W <sub>i</sub> : peso o porcentaje asignado al i-ésimo parámetro I <sub>i</sub> : subíndice de i-ésimo parámetro
4	ISQA (España)	ISQA = T (DQO + SS + OD + Cond)	T: Temperatura DQO: Demanda Química de Oxígeno OD: Oxígeno Disuelto Cond: Conductividad SS: Sólidos suspendidos A partir de 2003 el ISQA se empezó a calcular reemplazando la DQO por el carbono orgánico total (COT en mg/l)
5	IAP (Brasil)	IAP = ISTO x IQA CETESB ISTO = ST x SO ST=Mín-1 (q <sub>1</sub> , q <sub>2</sub> , ..., q <sub>n</sub> ) x Mín-2 (q <sub>1</sub> , q <sub>2</sub> , ..., q <sub>n</sub> ) SO=Media Aritmética (q <sub>a</sub> , q <sub>b</sub> , ..., q <sub>n</sub> )	Donde: IQA: Índice de Calidad del Agua adaptado del ICA NSF para las condiciones de Brasil ISTO: Índice de Sustancias Tóxicas y Organolépticas ST: Ponderación de los dos subíndices mínimos más críticos del grupo de sustancias tóxicas SO: Ponderación obtenida a través de la media aritmética de los subíndices del grupo de sustancias organolépticas

En cuanto a los parámetros, se recomienda seleccionar las cinco categorías más comúnmente reconocidas: nivel de oxígeno, eutrofización, aspectos de salud,



características físicas y sustancias disueltas. La tabla muestra los parámetros empleados en los ICA presentados.

Parámetros fisicoquímicos y microbiológicos empleados por diferentes ICA											
País	Estados Unidos		UNEP-GEMS		Unión Europea	España	Brasil		Colombia		Frecuencia
Índice	ICA NSF 1970	ICA Dinius 1987	DWQI		UWQ 12007	ISQA 1982	IAP		ICA Rojas 1991	ICAUCA 2004	
			UWQ 12007	AWQ 12007			IQA 1975	ISTO 2002			
Parámetro											
OD	x	x			x	x	x		x	x	0,70
pH	x	x		x	x		x		x	x	0,70
DBO	x	x			x		x		x	x	0,60
Nitratos	x	x	x		x						0,50
Coliformes Fecales	x	x					x		x	x	0,50
Temperatura	x	x				x	x				0,40
Turbiedad	x						x		x	x	0,40
Sólidos Disueltos Totales	x						x		x	x	0,40
Fósforo Total					x		x			x	0,30
Cadmio			x		x			x			0,30
Mercurio			x		x			x			0,30
Conductividad		x				x					0,20
Sólidos Suspendidos						x				x	0,20
Color		x								x	0,20
Nitrógeno Total							x			x	0,20
Cloruros		x		x							0,20
Plomo			x					x			0,20
Cromo Total			x					x			0,20
Arsénico			x		x						0,20
Fluoruro			x		x						0,20
Manganeso			x					x			0,20
Zinc				x				x			0,20
Coliformes Totales		x			x						0,20
DQO						x					0,10
Alcalinidad		x									0,10
Dureza		x									0,10
Nitritos			x								0,10
Amoniaco				x							0,10
Fosfatos	x										0,10
Sodio				x							0,10
Sulfatos				x							0,10
Hierro				x							0,10
Cobre			x								0,10
Boro			x								0,10
Níquel								x			0,10
Cianuro					x						0,10
Selenio					x						0,10
PFTHM								x			0,10
Aluminio Disuelto								x			0,10
Cobre disuelto								x			0,10
Hierro Disuelto								x			0,10
COT						x (2003)					0,10
Total Parámetros	9	12	18		12	5	20		6	10	

En la última columna de la tabla anterior se presenta la frecuencia de uso de cada parámetro en los diez ICA estudiados; se observa que los mayormente empleados



pertenecen a las categorías recomendadas, y son el oxígeno disuelto y el pH los parámetros de mayor uso (se usan en siete de diez ICA), seguidos en orden decreciente por la DBO, los nitratos y los coliformes fecales, la temperatura, la turbiedad y los sólidos disueltos totales. Otros parámetros como los metales pesados, los cuales están relacionados con el riesgo químico, son incluidos principalmente en los ICA desarrollados en los últimos años (DWQI, UWQI e IAP) y cuya evaluación se centra en la destinación del recurso para consumo humano previa potabilización.

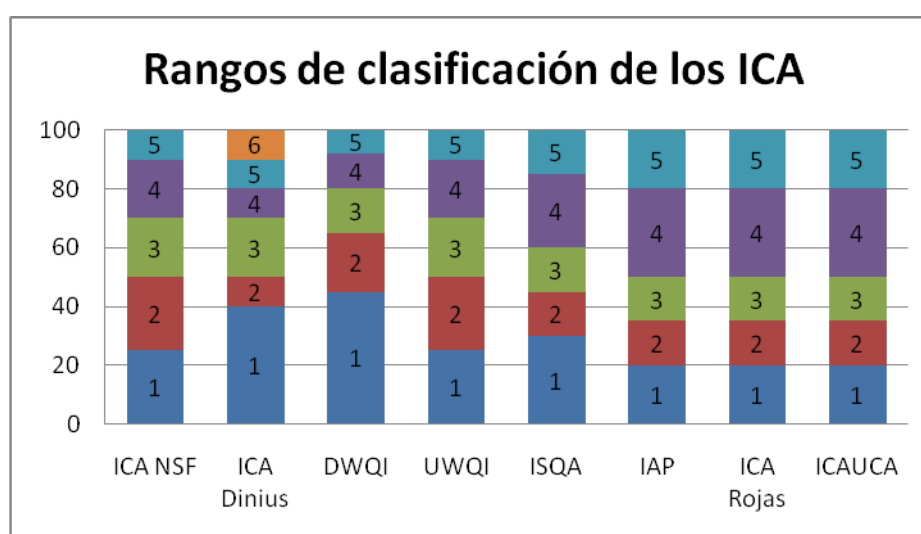
La asignación de pesos (ponderación) de cada parámetro tiene mucho que ver con la importancia de los usos pretendidos y la incidencia de cada variable en el índice. La tabla siguiente presenta los pesos asignados a los parámetros que conforman los ICA, de acuerdo con el grado de importancia dentro de cada uno de éstos.

<b>Pesos relativos asignados a los parámetros que conforman los ICA</b>					
<b>País</b>	<b>Estados Unidos</b>		<b>Unión Europea</b>	<b>Colombia</b>	
<b>Índice</b>	<b>ICA NSF</b>	<b>ICA Dinius</b>	<b>UWQI</b>	<b>ICA Rojas</b>	<b>ICAUCA</b>
<b>Parámetro</b>	<b>1970</b>	<b>1987</b>	<b>2007</b>	<b>1991</b>	<b>2004</b>
OD	0,17	0,109	0,114	0,25	0,21
pH	0,11	0,077	0,029	0,17	0,08
DBO	0,11	0,097	0,057	0,15	0,15
Nitratos	0,10	0,09	0,086		
Coliformes Fecales	0,16	0,116		0,21	0,16
Temperatura	0,10	0,077			
Turbiedad	0,08			0,11	0,07
Sólidos Disueltos Totales	0,07			0,11	0,07
Fósforo Total			0,057		0,08
Cadmio			0,086		
Mercurio			0,086		
Conductividad		0,079			
Sólidos Suspendidos					0,05
Color		0,063			0,05
Nitrógeno Total					0,08
Cloruros		0,074			
Arsénico			0,113		
Fluoruro			0,086		
Coliformes Totales		0,09	0,114		
DQO					
Alcalinidad		0,063			
Dureza		0,065			
Fosfatos	0,10				
Cianuro			0,086		
Selenio			0,086		

Los ICA mostrados en la tabla son lo que emplean asignación de pesos (W) a cada uno de los parámetros que los conforman; los restantes emplean estructuras de

cálculo que no requieren dicha asignación. Con relación al nivel de importancia de cada parámetro de acuerdo con el peso asignado, el oxígeno disuelto y los coliformes fecales tienen un alto grado de importancia, presentando en general los mayores pesos.

El valor del ICA permite clasificar el recurso a partir de rangos establecidos que son definidos considerando el o los usos a evaluar. Las categorías, esquemas o escalas de clasificación, son un punto de igual o mayor interés que el cálculo en sí del índice, pues es aquí donde finalmente el valor obtenido es transformado en una característica que define la calidad final del agua. A continuación se presentan los rangos de clasificación para cada uno de los ICA presentados.



Clasificación de los ICA								
Código	ICA NSF	ICA Dinius	DWQI	UWQI	ISQA	IAP	ICA Rojas	ICAUCA
1	Muy Mala Calidad	Inaceptable su consumo	Pobre	Pobre	No puede usarse	Pésima	Muy Mala	Pésima
2	Mala Calidad	Dudoso para consumo	Marginal	Marginal	Recreación y Refrigeración	Mala	Inadecuada	Inadecuada
3	Mediana Calidad	Tto. potabilización necesario	Regular	Regular	Consumo humano con tratamiento especial, Riesgo Industrial	Regular	Aceptable	Aceptable
4	Buena Calidad	Dudoso consumo sin Tto.	Buena	Buena	Consumo humano con tratamientos convencionales	Buena	Buena	Buena
5	Excelente Calidad	Tto. menor requerido	Excelente	Excelente	Todos los usos	Óptima	Óptima	Óptima
6	—	No requiere Tto. para consumo	—	—	—	—	—	—

Es decir, para conocer el grado de calidad de las aguas, independientemente del posible uso al que vayan a ser destinadas, se parte de la toma de muestras para la obtención de una serie de parámetros e indicadores. Estos datos, analizados y procesados, posteriormente se convierten en un valor numérico, que permite obtener una serie de índices que determinan el estado general de las aguas en función de unos rangos de calidades establecidos. Estos índices se pueden clasificar fundamentalmente en dos tipos: fisicoquímicos y biológicos.

Tradicionalmente, la calidad del agua se ha establecido mediante análisis fisicoquímicos, que son más precisos en valor absoluto, pero proporcionan información parcial y puntual, sin aportar información de su influencia en la vida acuática. La principal ventaja del control biológico es que proporciona una visión integrada y extendida en el tiempo sobre la calidad del agua, es decir, refleja las condiciones existentes tiempo atrás del muestreo, pero no señalan nada acerca del contaminante o los contaminantes responsables.

Por ello, lo más conveniente es combinar los análisis fisicoquímicos con la utilización de índices biológicos. De hecho, la Directiva Marco Europea del Agua (DMA 2000/60/CE) propone como medida de la calidad de los ecosistemas acuáticos establecer el estado ecológico del sistema estudiado mediante el empleo de indicadores biológicos, hidromorfológicos y fisicoquímicos.

### Parámetros del Estado Ecológico de la DMA

Características	Categorías	Parámetros
<b>Biológicas</b>		Flora acuática Invertebrados bentónicos Fauna piscícola
	Genéricos	Temperatura Oxígeno disuelto Sales (conductividad) Acidificación (pH, alcalinidad) Nutrientes
	Específicos	Sustancias prioritarias (tóxicas y peligrosas) Sustancias vertidas en cantidades significativas
<b>Hidromorfológicas</b>	Régimen hidrológico	Cantidad y dinámica del flujo Conexión con las aguas subterráneas
	Continuidad del río	
	Condiciones morfológicas	Profundidad y anchura Sustrato Estructura de la ribera

## 1.- Índices fisicoquímicos de calidad de las aguas

Históricamente, organizaciones de varias nacionalidades involucradas en el control del recurso hídrico, han usado de manera regular índices fisicoquímicos para la valoración de la calidad del agua. Esto ha sido más notorio desde la última década del siglo XX, en la que se dio un incremento importante en la aplicación de estos índices, lo que ha revertido, en la actualidad, a que exista una cantidad apreciable de formulaciones en diferentes latitudes y con propósitos que varían desde generales hasta específicos, producto de los esfuerzos y desarrollos investigativos tanto de agencias gubernamentales reguladoras de diferente orden, como de estudios de maestría y doctorado.

Mediante estos índices se va a obtener un valor numérico adimensional que engloba las magnitudes de ciertos parámetros individuales, cuyo número y tipo varía según el índice. Se usan para evaluar la calidad de un agua y su evolución con el tiempo y tienen como inconveniente su poca robustez debido a que simplifican mucho la calidad al definirla mediante un único valor numérico.

Los índices más recientes, cuyo objetivo fundamental es la evaluación de la calidad del agua para consumo humano previo tratamiento, incluyen dentro de su estructura parámetros fisicoquímicos y microbiológicos directamente relacionados con el nivel de riesgo sanitario presente en el agua. Los parámetros más comúnmente utilizados en los índices se exponen en la siguiente tabla:

PARÁMETROS UTILIZADOS EN LOS ÍNDICES FISICOQUÍMICOS DE CALIDAD DE AGUAS		
Parámetros organolépticos	Color	
	Turbidez	
	Olor	
	Sabor	
Parámetros físicos	Sólidos totales (residuo seco)	Sólidos suspendidos (sedimentables y no sedimentables)
		Sólidos filtrables (coloidales y disueltos)
	Temperatura	
	Conductividad	
	Radiactividad	
Parámetros químicos	Salinidad	
	Dureza	
	pH	
	Alcalinidad	
	Acidez	
	Oxígeno disuelto	
	Materia orgánica	
	DBO (demanda biológica de oxígeno)	
	DQO (demanda química de oxígeno)	
	COT (carbono orgánico total)	
	Bionutrientes (N,P)	
	Otros compuestos	Metales pesados
		Aniones y cationes
		Sustancias indeseables
		Sustancias tóxicas
Parámetros microbiológicos	Indicadores	Coliformes (totales y fecales)
		Estreptococos fecales
		Enterococos fecales
	Ensayos específicos (salmonela, legionela...)	

Los índices fisicoquímicos más utilizados a lo largo del tiempo en España son: el índice de calidad general (ICG), el índice simplificado de calidad de aguas (ISQA) y el índice automático de calidad de aguas (IAQA). También se describen los índices de estabilidad de las aguas carbonato-cálcicas, utilizados en el control de la formación de incrustaciones.

### 1.1.- *Índice de calidad general (ICG)*

Es el índice más empleado en España. Es una adaptación del índice Lamontagne y Provencher del Servicio de Calidad de las Aguas del Ministerio de Riquezas Naturales del Estado de Quebec (Canadá), en el que se utilizan 23 parámetros procesados mediante ecuaciones lineales, de los cuales 9 se utilizan siempre (básicos) y 14 según su influencia en la calidad (complementarios). Permite su tratamiento informático y enfoca el problema en su máxima generalidad, de forma que es posible definir un índice de calidad para cualquier uso posterior, simplemente determinando las especificaciones requeridas a efecto.

La finalidad que se pretende con el I.C.G., es deducir un número adimensional, como combinación o función de los datos analíticos de una muestra de agua, que refleje su calidad en orden a su utilización posterior, y que permita su comparación con los que se obtengan, por el mismo algoritmo, de otras muestras, tomadas en distintos lugares o épocas.

Su expresión matemática más general es:

$$ICG = \sum_{i=1}^n F_1(\lambda_i) \times F_2(\lambda_i)$$

En donde:

- $\lambda_i$ : variables o parámetros analizados.
- $n$ : número de parámetros que intervienen en el sumatorio.
- $F_1$ : función que transforma el valor analítico de cada parámetro en un valor adimensional. Se obtiene de esta forma el nivel de calidad ( $Q_i$ ).
- $F_2$ : función que pondera la influencia de cada parámetro en el global del índice. Se obtiene así el peso específico de cada parámetro ( $P_i$ ):

$$P_i = \frac{1 / a_i}{\sum_1^n 1 / a_i}$$

<b>a<sub>i</sub> = 1</b>	Parámetro muy importante
<b>a<sub>i</sub> = 2</b>	Parámetro de importancia media
<b>a<sub>i</sub> = 3</b>	Parámetro de importancia débil
<b>a<sub>i</sub> = 4</b>	Parámetro dudoso o poco significativo

Por tanto, el ICG se puede expresar finalmente como:

$$ICG = \sum_1^n (Q_i \cdot P_i)$$

Un parámetro complementario se utilizará si su  $Q_i < 60$ , es decir, si tiene una influencia negativa alta dentro de la calidad del agua.

Los parámetros de calidad de las aguas escogidos son los siguientes, con expresión de su coeficiente ponderal  $a$  y de su cualidad de básicos (x) o complementarios (y).

Parámetro	Coeficiente a	Tipo
Oxígeno disuelto	1	x
Materias en suspensión	1	x
pH	1	x
Conductividad	1	x
DQO	3	x
DBO <sub>5</sub>	1	x
Coliformes totales	1	x
Cloruros	2	y
Sulfatos	2	y
Fosfatos totales	3	x
Calcio	3	y
Magnesio	4	y
Sodio	4	y
Nitratos	3	x
Detergentes	1	y
Cianuros	1	y
Fenoles	1	y
Cadmio	1	y
Cobre	2	y
Cromo hexavalente	1	y
Mercurio	1	y
Plomo	1	y
Zinc	1	y



Se trata pues de nueve variables básicas y catorce complementarias, con las que se pretende que tanto la toxicidad, como la capacidad de albergar la vida, los fenómenos de eutrofización y determinados compuestos de origen industrial puedan reflejar combinadamente su presencia y tipificar una calidad en la que se conjuntan las contaminaciones, tanto naturales como artificiales.

Queda únicamente por matizar el significado del I.C.G. según los diferentes valores que puede presentar, es decir, graduar en palabras la *calidad* que corresponde a cada índice.

Para cualquier tipo de índice, calculado por el método expuesto, y por lo tanto para el I.C.G., es válida la siguiente clasificación:

<b>Calidad del Agua</b>	<b>ICG</b>
Excelente	entre 85 y 100
Buena	entre 75 y 85
Regular	entre 65 y 75
Deficiente	entre 50 y 65
Mala	menor que 50

Es conveniente también tener en cuenta, al trabajar con los índices de calidad, que si algún valor  $Q_i$  resultase *nulo* para un determinado parámetro, el agua es rechazable por ese solo concepto, aunque la media ponderada resultante pudiera tener un valor alto.

### **1.2.- Índice simplificado de calidad de aguas (ISQA)**

Queralt en el año 1982 desarrolló el índice simplificado de calidad del agua (ISQA) para las cuencas de Cataluña (España), el cual se basó en 5 parámetros fisicoquímicos y planteó una clasificación de la calidad del agua para 6 usos específicos del recurso, entre los cuales se destaca el abastecimiento para consumo humano.

Hasta el año 2006 la calidad fisicoquímica ha sido evaluada a partir del índice simplificado de la calidad del agua (ISQA). Índice muy fácil de utilizar que proporciona una idea rápida e intuitiva de la calidad, pero que precisa ser completado con otros índices para obtener una visión real de la situación. Se obtiene a partir de una sencilla fórmula que combina 5 parámetros fisicoquímicos:

$$ISQA = T \cdot (A + B + C + D)$$

En donde:

- T: temperatura del agua (t) en °C. Puede tomar valores comprendidos entre 0,8 y 1 según:
  - $T = 1$  si  $t \leq 20$  °C
  - $T = 1 - (t - 20) \cdot 0,0125$  si  $t > 20$  °C
- A: demanda química orgánica según la oxidabilidad al permanganato (a = DQO-Mn) expresada en mg/l. Puede tomar valores comprendidos entre 0 y 30 según:
  - $A = 30 - a$  si  $a \leq 10$  mg/l
  - $A = 21 - (0,35 \cdot a)$  si  $60 \text{ mg/l} \geq a > 10$  mg/l
  - $A = 0$  si  $a > 60$  mg/l
- B: sólidos en suspensión totales (SST en mg/l). Puede tomar valores comprendidos entre 0 y 25 según:
  - $B = 25 - (0,15 \cdot \text{SST})$  si  $\text{SST} \leq 100$  mg/l
  - $B = 17 - (0,07 \cdot \text{SST})$  si  $250 \text{ mg/l} \geq \text{SST} > 100$  mg/l
  - $B = 0$  si  $\text{SST} > 250$  mg/l
- C: oxígeno disuelto ( $\text{O}_2$  en mg/l). Puede tomar valores comprendidos entre 0 y 25 según:
  - $C = 2,5 \cdot \text{O}_2$  si  $\text{O}_2 < 10$  mg/l
  - $C = 25$  si  $\text{O}_2 \geq 10$  mg/l
- D: conductividad (CE en  $\mu\text{S/cm}$  a 18 °C). Si la conductividad se mide a 25 °C, para obtener la conversión a 18 °C se multiplicará por 0,86. Puede tomar valores comprendidos entre 0 y 20 según:
  - $D = (3,6 - \log \text{CE}) \cdot 15,4$  si  $\text{CE} \leq 4000$   $\mu\text{S/cm}$
  - $D = 0$  si  $\text{CE} > 4000$   $\mu\text{S/cm}$

A partir de enero de 2003, el factor **A** se calcula a partir del COT (carbono orgánico total), parámetro que, al igual que la oxidabilidad, mide la materia orgánica, pero es más reproducible y fiable, por lo que aporta unos valores de ISQA comparables

a los de la oxidabilidad. En este caso, el factor **A** se deduce a partir del COT (a) medido en mg/l y puede tomar valores comprendidos entre 0 y 30 según:

- $A = 30 - a$  si  $a \leq 5$  mg/l
- $A = 21 - (0,35 \cdot a)$  si  $12 \text{ mg/l} \geq a > 5$  mg/l
- $A = 0$  si  $a > 12$  mg/l

El índice ISQA, de manera similar a como lo hace el ICG, tiene valores máximos de 100 para una agua de excelente calidad y de 0 para una de calidad pésima. La clasificación del agua se muestra en la tabla siguiente:

<b>Clasificación de la calidad del agua según el índice ISQA</b>	
<b>Valor del Índice</b>	<b>Tipo de agua</b>
76-100	Aguas claras sin aparente contaminación.
51-75	Ligero color del agua, con espumas y ligera turbidez del agua, no natural.
26-50	Apariencia de aguas contaminadas y de fuerte olor.
0-25	Aguas negras, con procesos de fermentación y olor.

El *índice automático de calidad de aguas (IAQA)* es una variante del ISQA, en la que se utiliza siempre COT como parámetro A y turbidez como parámetro B. Los valores de los parámetros se obtienen de redes automáticas de control, lo que facilita resultados en tiempo real y en continuo.

### **1.3.- Índices de estabilidad de las aguas carbonato-cálcicas**

El principal objetivo en la utilización de estos índices es ajustar las aguas de refrigeración a condiciones no incrustantes.

Los índices más generalizados son los de Langelier, LSI, y de Ryznar, RSI, aunque existe otros índices, algunos de ellos adaptados a ciertas condiciones específicas.

Para dar una medida sobre la estabilidad de un agua, Langelier propuso el índice de saturación (LSI) el cual corresponde a la diferencia entre el pH del agua determinado directamente por el análisis y el pH de equilibrio o de saturación, y responde a la siguiente ecuación:

$$LSI = pH(\text{medido}) - pH_s$$

El índice de saturación de Langelier (LSI) es un modelo de estabilidad que deriva del concepto del equilibrio de solubilidad o saturación de sales poco solubles, y que proporcionan un indicador fiable del grado de saturación del agua con respecto al carbonato de calcio ( $\text{CaCO}_3$ ). El LSI correlaciona la solubilidad de las sales poco solubles con el pH como variable principal. “El LSI se puede interpretar como el cambio necesario de pH requerido para llevar el agua a su estado de equilibrio”.

Así, por ejemplo, el agua con un índice LSI de 1,0 es agua cuyo pH de saturación se halla una unidad de pH por encima de su pH de equilibrio; esto significa que la reducción de su pH en una unidad llevaría esta masa de agua nuevamente a su condición de equilibrio y la haría por lo tanto, no-corrosiva ni incrustante.

Es decir, este índice es indicativo del grado de inestabilidad del agua con respecto al depósito de solubilidad del carbonato de calcio ( $\text{CaCO}_3$ ). Langelier consideró que este índice es sólo una relación cualitativa de la agresividad del agua y que su valor no ayuda para juzgar sobre su actividad real. Un valor mayor del índice de Langelier no coincide necesariamente con una mayor agresividad del agua.

Se define el índice de estabilidad de Ryznar, como:

$$RSI = 2pH_s - pH(\text{medido})$$

Este índice ha sido propuesto como una medida más cuantitativa de la tendencia del agua a depositar (incrustación) o disolver (corrosión)  $\text{CaCO}_3$ .

La determinación de ambos índices, LSI y RSI, está basada en el cálculo del pH de saturación,  $pH_s$ , del carbonato cálcico.

$$pH_s = (pK_2 - pK_s) + pCa + pT_{AC}$$

siendo:

- $pK_2$  el logaritmo negativo de la constante de la segunda disociación del ácido carbónico
- $pK_s$  el logaritmo negativo de la constante del producto de solubilidad.
- $pCa$  el logaritmo negativo de la concentración de calcio.
- $pT_{AC}$  el logaritmo negativo de la alcalinidad.

Para el uso corriente el valor del  $pH_s$  puede determinarse mediante gráficos o por cálculo aproximado. Su cálculo requiere conocer los siguientes valores:

- Dureza cálcica (como  $\text{CO}_3\text{Ca}$ ).
- Alcalinidad total (como  $\text{CO}_3\text{Ca}$ ).
- Sólidos disueltos totales.
- Temperatura (máxima donde se teme incrustación).

y mediante tablas se determina el valor  $\text{pH}_s$  rápidamente como

$$\text{pH}_s = 9,30 + A + B - (C + D)$$

**Coeficientes para el cálculo de  $\text{pH}_s$**

SDT ppm	A	Temp ° C	B	Dureza cálcica (ppm $\text{CO}_3\text{Ca}$ )	C	$T_{AC} = m$ (ppm $\text{CO}_3\text{Ca}$ )	D
50	0,07	0	2,60	10	0,60	10	1,00
100	0,10	5	2,46	12	0,68	12	1,08
200	0,13	10	2,34	14	0,75	14	1,15
400	0,16	15	2,21	17	0,83	17	1,23
600	0,18	20	2,09	20	0,90	20	1,30
800	0,19	30	1,88	25	1,01	25	1,40
1000	0,20	40	1,71	30	1,06	30	1,48
2000	0,22	50	1,55	40	1,20	40	1,60
4000	0,25	60	1,40	50	1,30	50	1,70
		70	1,27	60	1,38	60	1,78
		80	1,16	80	1,51	80	1,90
				100	1,60	100	2,00
				150	1,78	150	2,18
				200	1,90	200	2,30
				300	2,08	300	2,48
				500	2,30	500	2,70
				700	2,45	700	2,85
				1000	2,60	1000	3,00

La derivación algebraica de  $\text{pH}_s$  da dos raíces de la cual la positiva se utiliza en los cálculos estándar, y es válida para un pH inferior a 10,5. Sin embargo para un pH superior a 10,5 aplica la raíz negativa. Es decir, que para el índice de Langelier:

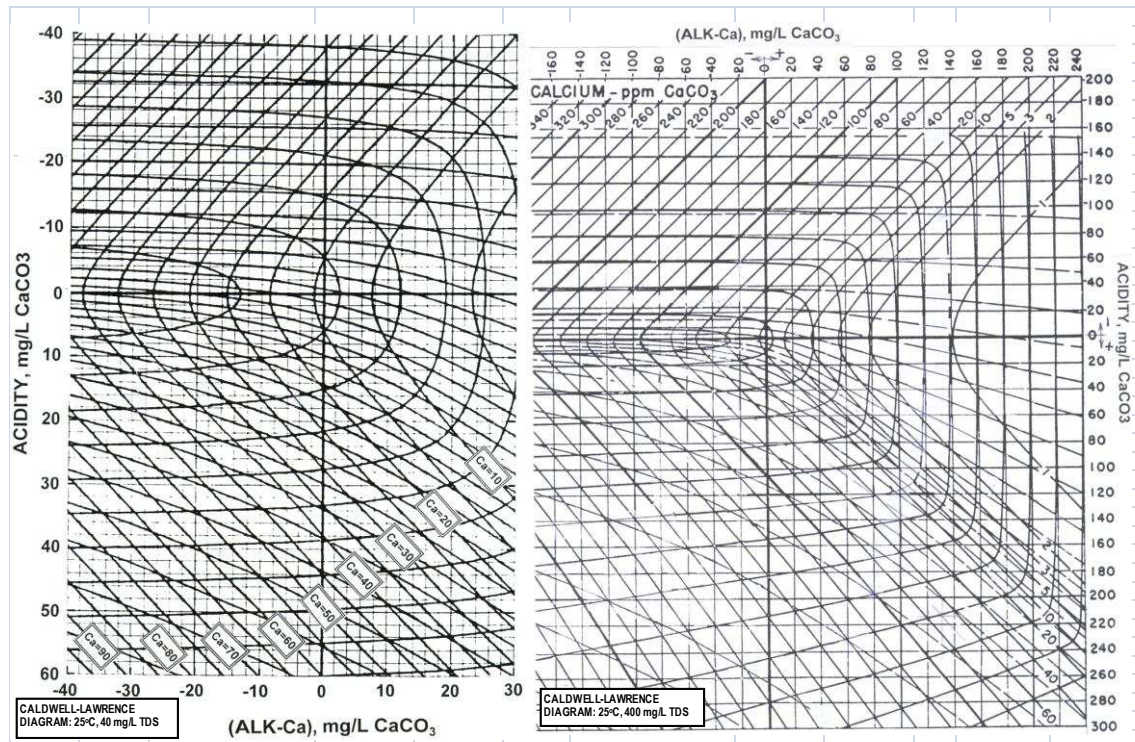
$$LSI = \text{pH} - \text{pH}_s \quad \text{si } \text{pH} < 10,5$$

$$LSI = \text{pH}_s - \text{pH} \quad \text{si } \text{pH} > 10,5$$

Esto significa que la tendencia a la incrustación crecerá al aumentar el pH, pero esta tendencia se invierte por encima de un  $\text{pH} = 10,5$ . Pocos textos mencionan esta



dualidad. Los diagramas de Caldwell-Lawrence son de los pocos que muestran las dos soluciones.



Los índices LSI y RSI han sido también empleados para indicar la corrosividad del agua de refrigeración, en particular para los aceros corrientes, lo cual ha conducido a serios errores. El trabajo original de Langelier se realizó para tuberías de hormigón y la agresividad se refería a la disolución de carbonato cálcico. La corrosión del acero depende de muchos factores: entre ellos el potencial galvánico, la presencia de iones cloruro, las especies microbiológicas presentes y el oxígeno disuelto. Por tanto los índices solamente indican la tendencia a formar incrustaciones, pero no garantizan la ausencia de corrosión.

Los valores obtenidos de LSI y RSI se interpretan como:

LSI	RSI	Condición
3	2,5	Extremadamente incrustante
2	4	Muy incrustante
1	5,5	Incrustante
0,5	6,5	Ligeramente incrustante
0	7	Agua estable
-0,5	8	Ligeramente agresiva
-1	9	Agresiva
-2	10,5	Fuertemente agresiva
-3	12	Muy fuertemente agresiva

## 2.- Índices biológicos de calidad de las aguas

Los métodos biológicos para determinar la calidad de las aguas, han sido usados en Europa desde principios de siglo XX, sin embargo, sólo en la década de los 50 se tuvo mayor consideración en las respuestas que ofrecían plantas y animales como evidencia directa de la contaminación.

Mediante los índices biológicos se obtiene un valor numérico que expresa el efecto de la contaminación sobre una comunidad biológica y se basan en la capacidad de los organismos de reflejar las características o condiciones ambientales del medio en el que se encuentran. La presencia o ausencia de una especie o familia, así como su densidad o abundancia es lo que se va a usar como indicador de la calidad. La mayor diferencia con los índices fisicoquímicos es que permiten indicar el estado del agua en un periodo prolongado de tiempo definido por la duración del ciclo vital de cada individuo, magnitud de colonias, etc., pero, por el contrario, es imposible identificar los agentes contaminantes existentes, por lo que su utilización es complementaria y no sustitutiva a los índices fisicoquímicos.

Desde su introducción han mostrado ser buenos instrumentos de control de los ecosistemas acuáticos y han complementado la información dada por los parámetros fisicoquímicos clásicos. De hecho, para poder aplicar la Directiva Marco del Agua (DMA 2000/60/CE) en su Anexo V, se requiere, entre otras cosas, poder identificar los elementos de calidad biológica (fitobentos, macrófitos, fitoplancton, fauna de invertebrados y peces), con el objetivo de establecer el estado ecológico de los sistemas acuáticos.

En la vigilancia y control de la contaminación en base a organismos como “bioindicadores”, existen multitud de metodologías que utilizan una amplia variedad de organismos: bacterias, protozoos, algas, macrófitos, marcoinvertebrados, peces, etc.

Los índices biológicos pueden ser de tres tipos:

- **Índices saprobicos:** reflejan los efectos de la contaminación por materia orgánica procedente de vertidos urbanos o agrícolas y su grado de descomposición, sobre los organismos.

- **Índices de diversidad:** basados en las variaciones de la composición específica de las comunidades de organismos y su estructura. En general, a una mayor biodiversidad le corresponde una mejor calidad del agua y viceversa.

- **Índices bióticos:** son los más utilizados y se basan en la clasificación de los organismos según su tolerancia a la contaminación, asignándoles una puntuación cuyo rango varía según el índice utilizado. El valor de calidad para el río estudiado resulta de la suma total de los valores de cada organismo presente.



## 2.1.- Índices saprobicos

El termino “saprobia” significa la dependencia de un organismo sobre las sustancias orgánicas descompuestas como fuente de alimento. Este índice parte del hecho de que algunos organismos (protozoos, bacterias, hongos y algas) desarrollan preferentemente en aguas con presencia de mucha materia orgánica. Este sistema fue propuesto por Kolkwitz y Marsson en 1909, constituyéndose en el primer intento para establecer un índice biológico que refleje los distintos estados de deterioro y progresiva recuperación de las comunidades de organismos como respuesta al efecto del enriquecimiento orgánico de las aguas producido por un vertido de esta naturaleza. El índice saprobico esta basado en la presencia de especies indicadoras que reciben un valor saprobico dependiente de su tolerancia frente a la polución; estos valores varían de 0 a 8 o sea de menor a mayor tolerancia. Conforme a este sistema la calidad del agua se distingue en 10 niveles basados en parámetros relacionados a la polución orgánica como el DBO, OD y H<sub>2</sub>S.

**Calidad del agua según el sistema de saprobiedad**

NIVEL	S	DESCRIPCION
Catarobica	-1	Aguas puras de ríos de montaña, agua potable
Xenosaprobica	0	Aguas no contaminadas
Oligosaprobica	1	Aguas poco contaminadas
β-mesosaprobica	2	Aguas medianamente contaminadas
α-mesosaprobica	3	Aguas muy contaminadas
Polisaprobica	4	Aguas fuertemente contaminadas
Isosaprobica	5	Aguas de alcantarilla, dominio de ciliados
Metasaprobica	6	Pozos sépticos, zona de H <sub>2</sub> S, dominio de flagelados
Hipersaprobica	7	Aguas industriales, descomposición fuerte, bacterias
Ultrasaprobica	8	Aguas abióticas no toxicas

El Índice Saprobio se calcula con la fórmula siguiente:

$$S = \frac{\sum_{i=1}^n s_i \cdot h_i \cdot g_i}{\sum_{i=1}^n h_i \cdot g_i}$$

con:

- S: Índice Saprobio de la prueba
- s<sub>i</sub>: Valor Saprobio de la especie i
- h<sub>i</sub>: Valor de la frecuencia de la especie i
- g<sub>i</sub>: Importancia Indicativa de la especie i
- n: Cantidad de las distintas especies



El Valor Saprobio  $s$  muestra el valor medio del rango de  $S$  en la cual prefiere vivir la especie. En la tabla siguiente se ven ejemplos para valores tomados de la literatura existente.

**Ejemplos para los datos del Valor Saprobio ( $s$ ) y la Importancia Indicativa ( $g$ )**

Familia	Organismo Indicativo	$s$	$g$
<b>Gambitas (Amphipodos)</b>	Asellus aquaticus	2,7	4
	Gammarus fossarum	1,6	8
	Gammarus pulex	2,1	4
	Gammarus roesili	2,0	8
<b>Friganias (Trichopteros)</b>	Anabolia nervosa	2,0	8
	Hydropsyche siltalai	1,8	8
	Odontocerum albicorne	1,4	4
	Philopotamus spp.	1,3	8
	Plectrocnemia spp.	1,5	4
	Rhyacophila spp.	2,0	4
	Sericostomatinae	1,5	8

Existen organismos que prefieren vivir solamente en un rango de contaminación muy pequeño. Ellos tienen una gran Importancia Indicativa  $g$  para la estimación de la situación biológica.

Para estimar la frecuencia de las especies se utiliza la siguiente tabla:

**Grados de la frecuencia de la especie**

Grado de la frecuencia	Cantidad de organismos encontrados
1 = muy poca	1 – 2 animales
2 = poca	3 – 10 animales
3 = poca a media	11 – 30 animales
4 = media	31 – 60 animales
5 = media a alta	61 – 100 animales
6 = alta	101 – 150 animales
7 = en masa	más que 150 animales

La contaminación del agua puede estimarse solamente si

$$\sum_{i=1}^n h_i \geq 15$$

En una mala calidad de agua viven solamente pocas especies, pero en grandes masas. Al revés en un buen estado de calidad de agua viven muchas especies, pero en menor cantidad.

Para controlar la exactitud del Índice Saprobio se calculan los Cuantiles SM con la siguiente fórmula:

$$SM = \pm \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (s_i - S)^2 \cdot h_i \cdot g_i}{(n - 1) \sum_{i=1}^n h_i \cdot g_i}}$$

con:

SM: Cuantiles del Índice Saprobio

La exactitud es suficiente si **SM ≤ 0,2**

## 2.2.- Índices de diversidad

Los índices de diversidad son expresiones matemáticas que usan tres componentes de la estructura de la comunidad: riqueza (numero de especies presentes), equitatividad (uniformidad en la distribución de los individuos entre las especies) y abundancia (numero total de organismos presentes), para describir la respuesta de una comunidad a la calidad de su ambiente. La suposición del planteamiento de la diversidad es que los ambientes no alterados se caracterizan por tener una alta diversidad o riqueza, una distribución uniforme de individuos entre las especies y una moderada a alta cantidad de individuos. En ambientes contaminados con desechos orgánicos degradables, la comunidad generalmente responde con un descenso de la diversidad con perdida de organismos sensibles, aumento en la abundancia de los organismos tolerantes las cuales ahora tienen una fuente enriquecida de alimentos, y por supuesto un descenso de la equitatividad. En contraste, la respuesta a tóxicos no degradables o polución ácida, se traduce en un descenso tanto de la diversidad como de la abundancia así como en la eliminación de organismos sensibles, además que no hay fuentes adicionales de alimento para las formas tolerantes.

Aunque el concepto de diversidad es muy atractivo en teoría, sus resultados pueden variar mucho con los métodos de muestreo, la naturaleza del sustrato y la época del año.

Los índices de diversidad mas utilizados para medir la calidad del agua son:

### 2.2.1.- Índice de diversidad de Shannon-Wiener (H)

Es muy utilizado el índice  $H$  como indicador de la diversidad de las especies, haciendo referencia a Shannon, Shannon-Weaver y Shannon-Wiener, lo que causa algún problema al inicial su estudio. Este índice se basa en la teoría de la información (mide el contenido de información por símbolo de un mensaje compuesto por  $S$  clases de símbolos discretos cuyas probabilidades de ocurrencia son  $p_1, \dots, p_S$ ) y es probablemente el de empleo más frecuente en ecología de comunidades.

Indudablemente el índice  $H$ , en su forma original, fue descrito en el libro “The mathematical theory of communication” (Shannon y Weaver, 1949-64), aunque la función  $H$  fue también derivada independientemente por Wiener. En un primer momento se usó para medir la diversidad de los peces sometidos a la contaminación del agua durante la década de 1960.

Este índice  $H$  que en un contexto ecológico, como índice de diversidad, mide el contenido de información por individuo en muestras obtenidas al azar provenientes de una comunidad ‘extensa’ de la que se conoce el número total de especies  $S$ . También puede considerarse a la diversidad como una medida de la incertidumbre para predecir a qué especie pertenecerá un individuo elegido al azar de una muestra de  $S$  especies y  $N$  individuos. Por lo tanto,  $H = 0$  cuando la muestra contenga solo una especie, y,  $H$  será máxima cuando todas las especies  $S$  estén representadas por el mismo número de individuos  $n_i$ , es decir, que la comunidad tenga una distribución de abundancias perfectamente equitativa. En la ecuación original se utilizan logaritmos en base 2, las unidades se expresan como *bits/ind.*, pero pueden emplearse otras bases como  $e$  (*nits/ind.*) o 10 (*decits/ind.*).

El índice de Shannon-Wiener ( $H$ ) toma en cuenta el número de especies y la equitatividad o uniformidad de la distribución del número de individuos en cada especie, es más sensible para especies raras y estima la diversidad de la comunidad en que fue tomada la muestra. Sin embargo, ha sido criticado debido a que no considera aspectos importantes como la periodicidad y el tipo de muestreo, el nivel de la resolución taxonómica y porque responde de manera irregular a los cambios naturales del medio acuático. Este índice subestima la diversidad específica si la muestra es pequeña.

Se calcula mediante la siguiente expresión:

$$H = - \sum_{i=1}^S (P_i \cdot \ln P_i)$$

En donde:

- $P_i$ : proporción total de la muestra que pertenece a la especie "i", con  $i = 1, 2, \dots, S$ ; en donde "S" es el número total de especies presentes en la muestra.

$$P_i = \frac{n_i}{N}$$

$n_i$  = número individuos especie i.

$N$  = número de todos los individuos de todas las especies.

El valor máximo que adquiere en los ríos para las comunidades de invertebrados benthicos es de 4,5. Valores inferiores a 2,4 - 2,5 indican que el sistema está sometido a tensión (vertidos, dragados, canalizaciones, regulación por embalses, etc.). Es un índice que disminuye mucho en aguas muy contaminadas. Por tanto, cuanto mayor valor tome el índice de Shannon-Wiener, mayor calidad tendrá el agua objeto de estudio.

### 2.2.2.- Índice de diversidad de Simpson-Gini (Y)

Este fue el primer índice de diversidad usado en ecología (Edward H. Simpson en su obra *Nature* en 1949). Expresa la probabilidad compuesta de que dos individuos extraídos al azar de una comunidad pertenecen a la misma especie. Si dicha probabilidad es alta la comunidad es poco diversa. Se calcula mediante la siguiente expresión:

$$Y = \left( 1 - \sum_{i=1}^S P_i^2 \right) \cdot 100 (\%)$$

En donde " $P_i$ " tiene el mismo significado que en la ecuación de Shannon-Wiener. El índice tomará valores comprendidos entre 0 % y 100 %. Valores inferiores al 20 % indican una calidad muy buena del agua, mientras que si la valoración supera el 60 % la calidad del agua será deficiente o mala. Es relativamente insensible para especies raras pero altamente sensibles para especies dominantes. Principalmente es indicador de los siguientes impactos: polución orgánica, degradación en la morfología del río y degradación general.

A través del índice de Simpson-Gini, es posible construir un estimador insesgado de la diversidad poblacional a partir de la muestra, y el error de muestreo es a

su vez susceptible de estimación y de control mediante la elección del tamaño muestral adecuado.

### 2.2.3.- Índice de Berger-Parker (B)

Mide la dominancia de la especie o taxón más abundante, siendo su expresión matemática la siguiente:

$$B = N_{m\acute{a}x}/N$$

En donde:

- $N_{m\acute{a}x}$ : número de individuos del taxón más abundante.
- $N$ : número total de individuos de la muestra.

Este índice adquiere valores comprendidos entre 0 y 1 (0 % y 100 %). Es indicador de los mismos impactos que el índice de Simpson-Gini: polución orgánica, degradación en la morfología del río y degradación general.

### 2.2.4.- Índice de diversidad de McIntosh

Trabaja los tamaños de las poblaciones de los distintos taxones, indicando la dominancia de alguno o algunos de ellos.

$$Mci = (N - n_i^2)/(N - \sqrt{N})$$

$n_i$  = número individuos especie i.

$N$  = número de todos los individuos de todas las especies.

### 2.2.5.- Índice de Margalef

El Índice de Margalef, o índice de biodiversidad de Margalef, es una medida utilizada en ecología para estimar la biodiversidad de una comunidad con base a la distribución numérica de los individuos de las diferentes especies en función del número de individuos existentes en la muestra analizada.

El índice de Margalef fue propuesto por el biólogo y ecólogo catalán Ramón Margalef y tiene la siguiente expresión  $I = (S - 1)/\ln N$ , donde  $I$  es la biodiversidad,  $S$

es el número de especies presentes, y  $N$  es el número total de individuos encontrados (pertenecientes a todas las especies). La notación  $\ln$  denota el logaritmo neperiano de un número.

Valores inferiores a 2,0 son considerados como relacionados con zonas de baja biodiversidad (en general resultado de efectos antropogénicos) y valores superiores a 5,0 son considerados como indicativos de alta biodiversidad.

Las limitaciones de este índice son grandes pues el resultado para un ecosistema de tres especies con 50 individuos de cada una de ellas, será el mismo que para un ecosistema con tres especies donde una de ellas tenga 120 individuos, los 30 restantes se repartan entre las otras dos especies. En ambos casos:

$$Diversidad = (3-1)/\ln 150$$

### 2.3.- Índices bióticos

Tomando en cuenta las desventajas de los otros índices, cabe pensar que el mejor método práctico para la determinación de la calidad biológica de un sistema acuático sería aquel que a partir de una muestra lo más completa posible, asocie datos cualitativos y cuantitativos. Así pues, un índice biótico será una combinación de la diversidad de ciertos grupos taxonómicos y la tolerancia a la polución en un solo índice o valor

Muchos autores han desarrollado diferentes índices especialmente en Europa, pero para regiones específicas aunque algunos de ellos han sido modificados para aplicarlos en otras regiones. Es decir, cualquier índice biótico puede modificarse para adecuarlo a las características particulares de una determinada región, bien ampliando los taxones considerados o reduciéndolos a unos pocos representativos de una determinada zona, procurando respetar la forma del índice original para que sirva de referencia al resto de los investigadores.

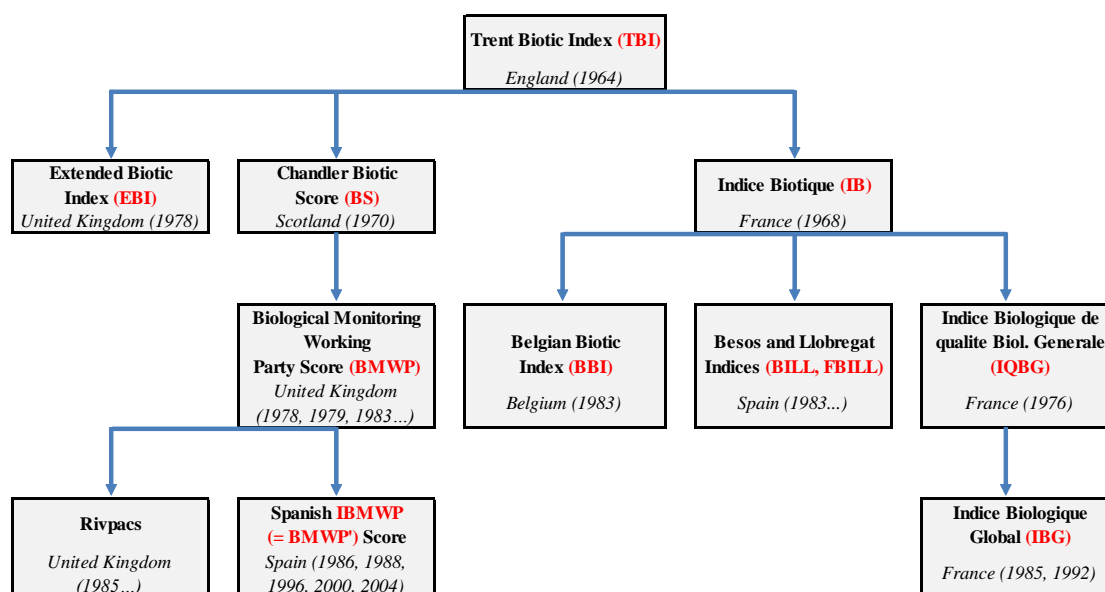
#### 2.3.1.- Índice biótico de Trent (TBI)

El Índice Biótico del río Trent (*Trent biotic Index*; **TBI**) desarrollado por Woodiwis (1964) y modificado posteriormente por Ghetti (1986), denominado como Índice Biótico Extendido, se utiliza para indicar el grado de tensión producido por las aguas residuales, en comunidades animales de río, a partir de las cantidades de taxones y la presencia de especies o grupos claves. Utiliza 6 taxones y la valoración final del agua varía entre 0 (mala) y 15 (buena). A partir de él se han desarrollado multitud de adaptaciones. En España se han diseñado diferentes índices bióticos, entre los que cabe citar el **BILL** y **FBILL** (el índice FBILL una modificación del índice BILL en el que el nivel taxonómico es la familia) para los ríos Besós y Llobregat, y otros ríos catalanes.

El índice FBILL es un índice de la calidad del agua de los ríos adaptados a los ríos de tierra baja mediterránea (FBILL es la abreviación de Foix, Besós y Llobregat ideado por Narcís Prat en 1983). Igual que con el IBMWP, los organismos se identifican en el grupo de familia y se les otorga una puntuación mayor o menor en función del grado de exigencia de la calidad del agua. Este índice, a diferencia del IBMWP, usa el poder discriminante de las familias ordenadas de mayor a menor calidad. Con su aplicación, se debe buscar la familia que indica mayor calidad en la muestra estudiada y se otorga al río el valor que nos indica el FBILL para esta familia. La puntuación final varía entre 0 y 10.

Este índice se utilizará siempre que se pueda en zonas reófilas (donde abundan piedras y la corriente de agua es elevada). En su aplicación, se seleccionarán los máximos hábitats reófilos para poder obtener la máxima biodiversidad. La mejor representatividad y diversidad de la muestra analizada aumenta el poder discriminante del índice. La puntuación final se puede agrupar en categorías que nos indicarán niveles de "salud" del río.

#### Desarrollo de los Índices Bióticos más extendidos en Europa



La diferencia entre índice y score es que este último considera a la abundancia. Los sistemas score demandan más esfuerzo y no son prácticos en su uso, pero proveen más información.

#### 2.3.2.- Índice Chandler

Utiliza 6 grupos, los mismos que Trent, y además emplea un factor de abundancia, en el que cada especie tiene una puntuación que varía según el número de individuos. Las valoraciones aplicadas son subjetivas. A diferencia del Índice del Río

Trent, tienen en cuenta todos los macroinvertebrados, aunque sean poco indicadores. Sin duda requiere más esfuerzo que los índices anteriores. Es necesaria una identificación taxonómica de los macroinvertebrados hasta el nivel de género o especie. La puntuación final del agua varía entre 0 (mala) y un límite superior no definido, aunque se puede decir que si el índice es menor de 300 el agua está contaminada y si está comprendido entre 300 y 3000 el agua está poco contaminada.

### 2.3.3.- Biological Monitoring Working Party (BMWP)

Existen multitud de adaptaciones mundiales de este índice creado en primer lugar por Hellawell (1978) para los ríos de Gran Bretaña. Alba-Tercedor y Sánchez-Ortega (1988) crearon la adaptación para la Península Ibérica que se denota por **BMWP'**. Una de las últimas adaptaciones para la Península Ibérica es la Iberian Biological Monitoring Working Party (**IBMWP**), de Alba-Tercedor (2002), creada tras acuerdo obtenido en el III Congreso Ibérico de Limnología debido a actualizaciones taxonómicas y modificación de alguna de las puntuaciones de las familias de macroinvertebrados.

En la actualidad se está calculando el IBMWP (siguiendo el procedimiento Guadalmed) en tramos fluviales identificados sin riesgo, según el análisis de presiones e impactos, y en otros cuyas condiciones ambientales son buenas (según indicadores de la estación de muestreo), y en los que podrían existir condiciones de referencia.

El procedimiento de muestreo del IBMWP en su origen (cuando se le denominaba BMWP') daba información cualitativa, y su aplicación no tenía en cuenta la abundancia. Como la DMA especifica la "abundancia" como parámetro descriptor de los elementos de calidad (artículo 1.1.1. del Anexo V de la DMA) se propuso realizar recuentos que permitan obtener la **abundancia relativa** de las familias en la muestra. Esta opción es la adoptada por Guadalmed para el estudio de las muestras procedentes de estaciones de referencia

Se basa en la asignación a las familias de macroinvertebrados acuáticos de valores de tolerancia a la contaminación comprendidos entre 1 (familias muy tolerantes) y 10 (familias intolerantes). La suma de los valores obtenidos para cada familia detectada en un punto nos dará el grado de contaminación del punto estudiado.

Se consideran macroinvertebrados bentónicos a aquellos organismos invertebrados que desarrollan alguna fase de su ciclo vital en el medio acuático, y cuyo tamaño es superior a los 2 mm. Abarca insectos, moluscos, crustáceos, turbelarios y anélidos principalmente. Las principales razones para su uso como indicadores biológicos son:



- Sensibilidad y rapidez en la reacción ante distintos contaminantes con una amplia gradación en la respuesta frente a un variado espectro de clases y grados de estrés.
- Ubicuidad, abundancia y facilidad de muestreo. Tamaño adecuado para su determinación en laboratorio.
- Carácter relativamente sedentario, reflejando las condiciones locales de un tramo fluvial.
- Fases del ciclo de vida suficientemente largas como para ofrecer un registro de la calidad medioambiental.
- Gran diversidad de grupos faunísticos con numerosas especies, entre las cuales siempre habrá alguna que reaccione ante un cambio ambiental.

Las puntuaciones asignadas a cada familia de macroinvertebrados según el IBMWP se resumen en la siguiente tabla:

PUNTUACIONES ASIGNADAS A LAS DIFERENTES FAMILIAS DE MACROINVERTEBRADOS ACUÁTICOS PARA LA OBTENCIÓN DEL IBMWP		
FAMILIAS	TAXÓN SUPERIOR	PUNTUACIÓN
Siphonuridae, Heptageniidae, Leptophlebiidae, Potamanthidae, Ephemeridae	Efemerópteros	10
Taeniopterygidae, Leuctridae, Capniidae, Perlodidae, Perlidae, Chloroperlidae	Plecópteros	
Aphelocheiridae	Heterópteros	
Phryganeidae, Molannidae, Beraeidae, Odontoceridae, Leptoceridae, Goeridae, Lepidostomatidae, Brachycentridae, Sericostomatidae	Tricópteros	
Athericidae, Blephariceridae	Dípteros	
Astacidae	Crustáceos	8
Lestidae, Calopterygidae, Gomphidae, Cordulegasteridae, Aeshnidae, Corduliidae, Libellulidae	Odonatos	
Psychomyiidae, Philopotamidae, Glossosomatidae	Tricópteros	7
Ephemerellidae	Efemerópteros	
Nemouridae	Plecópteros	
Rhyacophilidae, Polycentropodidae, Limnephilidae	Tricópteros	6
Neritidae, Viviparidae, Ancyliidae	Gasterópodos	
Hydroptilidae	Tricópteros	
Unionidae	Bivalvos	
Gammaridae, Corophiidae	Crustáceos	
Platycnemididae, Coenagrionidae	Odonatos	5
Oligoneuridae	Efemerópteros	
Dryopidae, Elmidae, Helophoridae, Hydrochidae, Hydraenidae, Clambidae	Coleópteros	
Hydropsychidae	Tricópteros	
Tipulidae, Simuliidae	Dípteros	
Planariidae, Dendrocoelidae, Dugesidae	Planarias	4
Baetidae, Caenidae	Efemerópteros	
Halipidae, Curculionidae, Chrysomelidae	Coleópteros	
Tabanidae, Stratiomyidae, Empididae, Dolichopodidae, Dixidae, Ceratopogonidae, Anthomyidae, Limoniidae, Psychodidae	Dípteros	
Sialidae	Megalópteros	
Hydracarina	Ácaros	3
Piscicolidae	Hirudineos	
Mesoveliidae, Hydrometridae, Gerridae	Heterópteros	
Nepidae, Naucoridae, Pleidae, Notonectidae, Corixidae	Coleópteros	
Helodidae, Hydrophilidae, Hygrobiidae, Dytiscidae, Gyrinidae	Gasterópodos	
Valvatidae, Hydrobiidae, Lymnaeidae, Physidae, Planorbidae, Bithyniidae, Bythinellidae, Sphaeriidae	Hirudineos	2
Glossiphoniidae, Hirudidae, Erpobdellidae	Crustáceos	
Asellidae, Cl. Ostracoda (todas las familias)	Dípteros	
Chironomidae, Culicidae, Ephydriidae, Thaumaleidae	Oligoquetos	1
Cl. Oligochaeta (todas las familias)		

Por lo tanto el valor del índice varía entre 0 (ausencia de invertebrados indicadores) y un máximo indeterminado, aunque no es normal que supere los 250 puntos.

Finalmente, tras la suma de los valores correspondientes a cada una de las familias presentes en la zona de estudio, se obtiene la calidad del agua, que se puede encuadrar en una de las cinco clases de calidades de agua (de I a V de mayor a menor calidad), permitiendo, en función del valor obtenido del índice, asignar una muestra de agua a una de las calidades establecidas, o bien visualizarla cartográficamente, ya que cada una de las clases se corresponden con un código de colores para su representación cartográfica.

CLASES Y CALIDADES DEL AGUA				
CLASE	CALIDAD	VALOR DEL IBMWP	SIGNIFICADO	COLOR
I	Buena	> 101	Aguas muy limpias, no contaminadas ni alteradas de modo apreciable.	
II	Aceptable	61 - 100	Aguas con algún signo evidente de contaminación.	
III	Dudosa	36 - 60	Aguas claramente contaminadas.	
IV	Crítica	16 – 35	Aguas muy contaminadas.	
V	Muy crítica	< 15	Aguas fuertemente contaminadas.	

## 2.4.- Modelo SCAF

Determina el estado ambiental combinando los índices de diversidad y el índice biótico BMWP'. Se basa en la teoría de la sucesión ecológica. Va a indicar el tipo de ambiente ecológico de la zona analizada, lo que permite hacer estudios de comparación o determinar qué impactos negativos sobre el ecosistema pueden estar afectando a la calidad del agua.

Con este modelo se determinan, por tanto, los distintos tipos de estado ambiental del ecosistema. A cada tipo le corresponderán, a su vez, unos usos potenciales, como queda reflejado en la siguiente tabla:

ESTADOS AMBIENTALES DEL AGUA SEGÚN EL MODELO SCAF			
Clase ambiental	Definición	Características	Usos potenciales
E1 (rojo)	Ambiente muy duro	Inmadurez extrema Aguas muy contaminadas	Aguas inutilizables No óptima para salmónidos y ciprínidos
E2 (marrón)	Ambiente duro	Madurez baja Aguas contaminadas	Potabilizable con tratamiento intensivo No óptima para salmónidos y ciprínidos
E3 (amarillo)	Ambiente fluctuante	Madurez media Eutrofización	Potabilizable con tratamiento normal y desinfección Riego Óptima para ciprínidos
E4 (azul)	Ambiente estable	Madurez notable Aguas limpias	Tratamiento físico simple y desinfección Recreativo, baño Óptima para salmónidos y ciprínidos
E5 (verde)	Ambiente maduro	Madurez plena y ambiente muy heterogéneo Aguas oligomesotróficas	Todos los usos Óptima para salmónidos y ciprínidos

El Modelo SCAF valora, además del Estado Ambiental, la desviación de las características de la masa respecto a su estado ecológico natural, tal y como exige la DMA. Para ello, determina los impactos producidos por la actividad humana (vertidos, embalses, canalizaciones, etc.) mediante el cálculo de los siguientes indicadores:

**IS:** cuantifica el impacto producido por la actividad antropogénica en pérdida de diversidad en número de taxones con respecto a las condiciones naturales.

**IH:** cuantifica el impacto producido por la actividad antropogénica en pérdida de diversidad en bits/ind.

**IP:** cuantifica el impacto producido por la actividad antropogénica en pérdida de heterogeneidad ambiental.

**IE:** cuantifica el impacto producido por la actividad antropogénica en grado de conservación del ecosistema acuático.

## 2.6. Aguas residuales

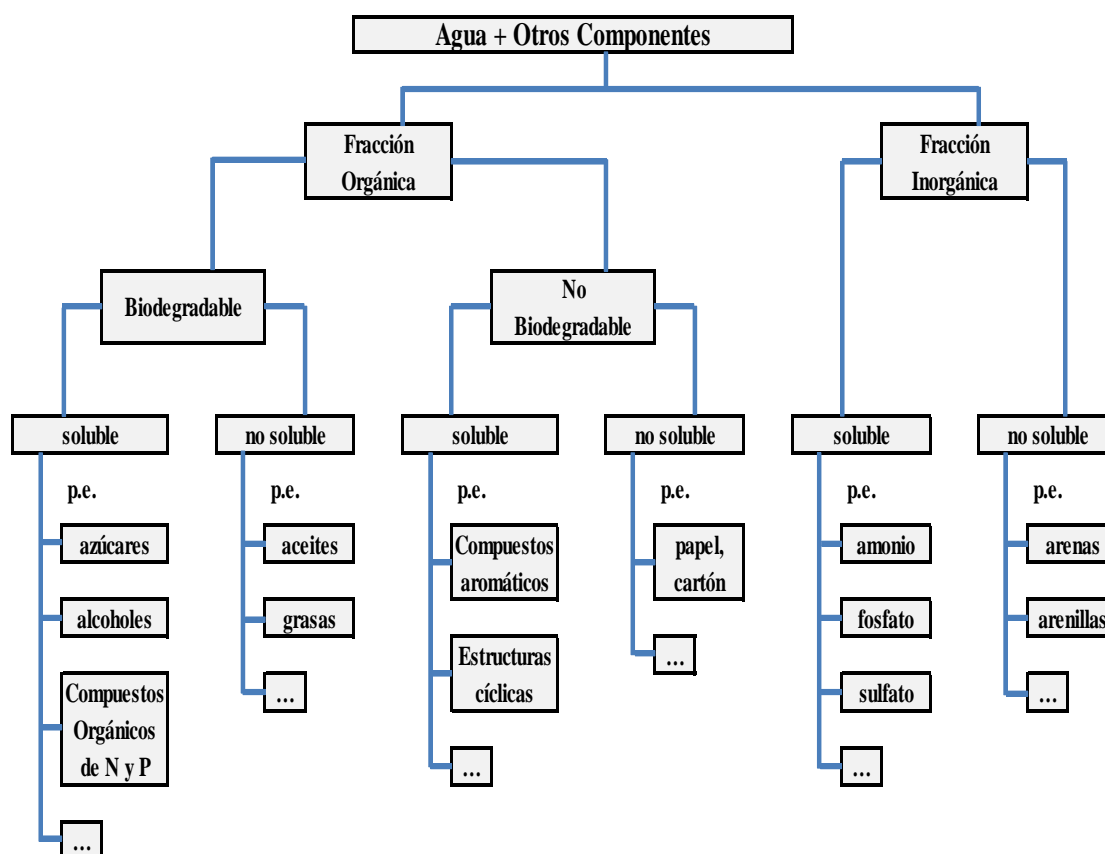
El agua que encontramos en la Naturaleza lleva disueltas, o en suspensión, determinadas sustancias adquiridas a lo largo del recorrido de parte de su ciclo, en la superficie o en el interior de la Tierra. Pero, además de los compuestos de origen natural, existen otros que tienen su origen en sustancias de desecho producidas como consecuencia de la actividad humana, bien arrojadas directamente al agua, usándola como vehículo para eliminar productos molestos, bien llegadas a ella como consecuencia del lavado por el agua de zonas que las contenían.

Pueden definirse las aguas residuales como el conjunto de aguas que lleva elementos extraños, bien por causas naturales, bien provocadas de forma directa o indirecta por la actividad humana, estando compuestas por una combinación de:

- Líquidos de desagüe de viviendas, comercios, edificios de oficinas e instituciones.
- Líquidos efluentes de establecimientos industriales.
- Líquidos efluentes de instalaciones agrícolas y ganaderas.
- Aguas subterráneas, superficiales y de lluvia que discurren por calles, espacios libres y tejados y azoteas de edificios que pueden ser admitidas y conducidas por las alcantarillas.

Las aguas residuales están formadas por un 99% de agua y un 1% de sólidos en suspensión y solución. Estos sólidos pueden clasificarse en orgánicos e inorgánicos.

## CARACTERIZACIÓN AGUA RESIDUAL



Los sólidos inorgánicos están formados principalmente por nitrógeno, fósforo, cloruros, sulfatos, carbonatos, bicarbonatos y algunas sustancias tóxicas como arsénico, cianuro, cadmio, cromo, cobre, mercurio, plomo y zinc.

Los sólidos orgánicos se pueden clasificar en nitrogenados y no nitrogenados. Los nitrogenados, es decir, los que contienen nitrógeno en su molécula, son proteínas, ureas, aminas y aminoácidos. Los no nitrogenados son principalmente celulosa, grasas y jabones. La concentración de orgánicos en el agua se determina a través de la  $DBO_5$ , la cual mide material orgánico carbonáceo principalmente, mientras que la  $DBO_{20}$  mide material orgánico carbonáceo y nitrogenado  $DBO_2$ .

Los efectos negativos que estas aguas residuales pueden producir en los cauces receptores son de varios tipos, siendo los más importantes:

- Olores y sabores desagradables motivados por las sustancias presentes en su seno y como consecuencia de su descomposición en ausencia de oxígeno, con desprendimiento de gases.
- Toxicidad de algunos compuestos minerales y orgánicos, con acción sobre la fauna y la flora del cauce receptor y los consumidores posteriores de este agua.
- Infecciones provocadas por la presencia de bacterias, virus u otros microorganismos, los cuales encuentran en las aguas residuales un modo de propagación. Se han aislado en aguas residuales microorganismos de las especies *Salmonella*, *Shigella*, *Escherichia coli*, *Campylobacter*, *Yersinia enterocolítica*, *Clostridium perfringens*, *Vibrio cholerae*, virus de la hepatitis A, la poliomielitis, rotavirus y enterovirus.
- Alteración estética de los medios receptores, como consecuencia de las variaciones de color o de la acumulación de variados productos de desecho.
- Polución térmica, que algunos efluentes de tipo industrial pueden provocar.
- Eutrofización de las masas de agua receptoras por altas concentraciones de compuestos como nitratos y ácidos ortofosfóricos, que estimulan el crecimiento de la microflora, disminuyendo el uso del agua para abastecimiento.

Dentro de las distintas clasificaciones que pueden establecerse de las aguas residuales, uno de los esquemas, más generalmente utilizado por su simplicidad, es el que las identifica por su procedencia:

- Drenaje
- Escorrentía
- Domésticas
  - fecales
  - limpieza
- Industriales
  - comerciales
  - industriales
- Agrarias
  - agrícolas
  - ganaderas



En base a ello, las aguas residuales se clasifican también en:

- *Aguas Pluviales*. Son las aguas de la escorrentía superficial provocada por las precipitaciones atmosféricas (lluvia, nieve, granizo...). Se caracterizan por grandes aportaciones intermitentes de caudal, y por una contaminación importante en los primeros 15-30 minutos. Las cargas contaminantes se incorporan al agua al atravesar la atmósfera y por el lavado de superficies y terrenos.

- *Aguas Blancas*. Son aguas procedentes de la escorrentía superficial y de drenajes. Se caracterizan también por grandes aportaciones intermitentes y su contaminación, además de su importancia en los primeros 15-30 minutos de las escorrentías, está igualmente determinada por la aportada con los caudales drenados (aguas salobres, filtraciones de alcantarillado, etc.).

- *Aguas Negras o Urbanas*. Son aguas recogidas en las aglomeraciones urbanas procedentes de los vertidos de la actividad humana doméstica, o a la mezcla de éstas con las procedentes de actividades comerciales, industriales y agrarias integradas en dicha aglomeración, y con las de drenaje y escorrentía de dicho núcleo. Sus volúmenes son menores que los de las aguas blancas y sus caudales y contaminación mucho más regulares.

- *Aguas Industriales*. Aguas procedentes de actividades industriales (preparación de materias primas, elaboración y acabado de productos, así como la transmisión de calor y frío).

Con independencia del posible contenido de sustancias similares a los vertidos de origen doméstico, pueden aparecer en las aguas industriales elementos propios de cada actividad industrial, entre los que pueden citarse: tóxicos, iones metálicos, productos químicos, hidrocarburos, detergentes, pesticidas, productos radioactivos, etc.

- *Aguas Agrarias*. Son aguas procedentes de actividades agrícolas y ganaderas. La denominación de aguas agrícolas se debe reservar a las procedentes exclusivamente de la actividad agrícola, aunque está muy generalizada (impropiamente) su aplicación también a las procedentes de actividades ganaderas. La contaminación de las aguas agrarias es muy importante, perjudicando sensiblemente las características del cauce o medio receptor.

Análogamente a las aguas industriales, las aguas agrarias, además del contenido en sustancias similares a los vertidos de origen doméstico, pueden contener elementos propios de las actividades agrarias: Fertilizantes, biocidas (plaguicidas, pesticidas, productos fitosanitarios,...), estiércol, residuos varios, etc. Con respecto a los fertilizantes es importante destacar que antes eran de origen orgánico y hoy han sido casi sustituidos por abonos de origen inorgánico, tales como sulfatos, nitratos, fosfatos, etc., de especial incidencia en la contaminación de las aguas.



Las aguas residuales regeneradas constituyen un recurso no convencional de agua que se ha desarrollado en los últimos decenios. No obstante, para poder proceder a reutilizar este recurso se requieren las tecnologías adecuadas y unos estudios previos detallados.

### 3. TRATAMIENTO DE AGUAS

#### 3.1. Introducción

Los objetivos del tratamiento del agua son la eliminación de cualquier materia tóxica, así como de organismos causante de enfermedades, obteniendo un agua de calidad consistente y estable.

Dependiendo del origen del agua y del tipo de consumo al que va destinada, los tratamientos se pueden clasificar en cuatro grandes grupos:

- Sin tratamiento
- Solo desinfección
- Tratamiento estándar
- Tratamiento especial

Tanto para producir un compuesto como para aislarlo o eliminarlo, el número de procesos industriales que existen es muy elevado. Sin embargo, cada uno de ellos se puede dividir en una serie de etapas, denominadas operaciones, que se repiten a lo largo de los distintos procesos. Estas operaciones, llamadas generalmente básicas o unitarias poseen técnicas comunes y, se basan en los mismos principios científicos. Además, se aplican igualmente a procesos físicos, químicos y biológicos.

El tratamiento de las aguas presupone la aplicación de unos procesos básicos u operaciones unitarias, cuya utilización y secuencia, vendrán definidas por las características del agua a tratar y el grado de depuración que se deba conseguir.

En este marco, el término **tratamiento** de aguas es el conjunto de operaciones unitarias de *tipo físico, químico o biológico* cuya finalidad es la eliminación o reducción de la contaminación o las características no deseables de las aguas, bien sean naturales, de abastecimiento, de proceso o residuales. La finalidad de estas operaciones es obtener unas aguas con las características adecuadas al uso que se les vaya a dar, por lo que la combinación y naturaleza exacta de los procesos varía en función tanto de las propiedades de las aguas de partida como de su destino final.

Un *sistema de tratamiento* está compuesto por una combinación de operaciones y procesos unitarios diseñados para reducir ciertos constituyentes del agua residual a un

nivel aceptable. Se pueden hacer muchas combinaciones de operaciones y procesos unitarios. No obstante que prácticamente todos los sistemas de tratamiento de aguas residuales son únicos en algunos aspectos, a través de los años ha evolucionado un agrupamiento general de operaciones y procesos unitarios de acuerdo con los contaminantes que constituyen “el blanco” del tratamiento.

Desde el punto de vista de los rendimientos alcanzables en los procesos de depuración, los sistemas de tratamiento de agua residual se dividen frecuentemente en *subsistemas* que se pueden clasificar en:

- Tratamientos previos o pretratamientos.
- Tratamientos primarios o físico-químicos.
- Tratamientos secundarios o biológicos.
- Tratamientos terciarios.
- Etapa de pulimento y/o desinfección.

Algunos autores llaman a los tratamientos previos y primarios unidos como tratamientos primarios.

Esta clasificación, que en principio era totalmente estanca, en la actualidad existen numerosas operaciones y procesos que podrían incluirse en varias de las agrupaciones. Mediante los tratamientos previo y primario, se eliminan fundamentalmente los sólidos en suspensión y algo de materia orgánica por impregnación; mediante el secundario, la materia orgánica biodegradable disuelta y restos de sólidos en suspensión que no fueron eliminados en el tratamiento primario.

Con el terciario se pretende la eliminación de contaminantes específicos y de todos aquellos contaminantes no retenidos en los tratamientos anteriores, fundamentalmente los contaminantes en forma de sólidos disueltos. Dentro de este último tratamiento se puede considerar incluida la desinfección, que elimina los gérmenes patógenos del agua (bacterias, virus,...), o bien, considerar una etapa posterior en la que se consideran las operaciones finales de pulido y/o desinfección.

### **3.2. Procesos básicos u operaciones unitarias**

Se conocen como operaciones unitarias a los métodos de tratamiento en los que predominan los fenómenos físicos, y como procesos unitarios a los métodos que la eliminación de los contaminantes se realiza en base a procesos químicos o biológicos. En la actualidad, estas operaciones y procesos unitarios se agrupan entre sí para constituir los así llamados tratamiento primario, secundario y terciario (o tratamiento avanzado).





Las operaciones unitarias físicas, así como los procesos unitarios químicos y biológicos más comunes empleados en el tratamiento de aguas son:

- Operaciones físicas:
  - Medición de caudales
  - Desbaste
  - Homogeneización de caudales
  - Mezclado
  - Sedimentación
  - Flotación
  - Filtración en medio granular
  - Transferencia de gases
  - Volatilización y arrastre de gases
  - Separación por membranas
- Procesos químicos:
  - Precipitación química
  - Coagulación-Floculación
  - Adsorción
  - Desinfección
  - Decoloración
  - Oxidación química
  - Neutralización
- Procesos biológicos:
  - Aerobio
  - Anaerobio
  - Anóxico
  - Combinados
  - Estanques

Los procesos anteriores de tratamiento de las aguas deben complementarse con un proceso de tratamiento de lodos, donde aparecerán los elementos retirados de las aguas.

### **3.2.1. Operaciones físicas**

Las operaciones que se realizan mediante la aplicación de fuerzas físicas se denominan operaciones físicas unitarias. Como el origen de estas operaciones estaba en

la aplicación de los fenómenos naturales directamente observable, fueron los primeros métodos de tratamiento utilizados. Aún hoy en día constituyen la base de la mayoría de los tratamientos.

A continuación se describen las operaciones físicas unitarias más habituales en el tratamiento de aguas:

## 1.- Medición de Caudales

El caudal se define como el volumen del líquido que pasa por una sección normal de una corriente de agua en una unidad de tiempo.

La medición de los caudales influye sobre la eficacia de la planta de tratamiento de aguas. Es imprescindible para tener el adecuado control y seguimiento de los procesos involucrados. Se suelen utilizar distintos medidores dependiendo si la medición se realiza en canales o en conducciones cerradas. Así, para el caso de los *canales abiertos*, o en conducciones parcialmente llenas, la determinación del caudal se lleva a cabo midiendo la pérdida de carga generada por la introducción de una obstrucción en la conducción, tal como un estrangulamiento o una placa vertedero, o por medida de la sección mojada y de la velocidad de flujo asociada. Posiblemente, el dispositivo más utilizado para la medición del caudal de agua residual sea el aforador Parshall. En la medición de los caudales en *conducciones en carga* las tres técnicas más empleadas son: (1) introducción de una obstrucción para crear una pérdida de carga o diferencial de presión; (2) medición de los efectos que provoca el fluido en movimiento (p.e. cambios de momento, transmisión de ondas de sonido, inversión de campos magnéticos), y (3) medición de unidades incrementales de volumen del fluido. Los diferenciales de presión que pueden traducirse en lecturas del caudal se consiguen mediante elementos tales como los tubos de flujo, orificios, tubos de pitot, rotámetros y venturis. En el segundo grupo se incluyen aparatos de medición de propiedades.

A la hora de elegir un medidor de caudal hay que tener en cuenta, entre otros, los siguientes factores: el tipo de aplicación, el dimensionado correcto, la precisión, la composición del fluido, la pérdida de carga, las necesidades de instalación y la facilidad de mantenimiento.

## 2.- Desbaste

Es una operación en la que se trata de eliminar sólidos de mayor tamaño que el que habitualmente tienen las partículas que arrastran las aguas. El objetivo es eliminarlos y evitar que dañen equipos posteriores del resto de tratamientos. Suele ser un tratamiento previo a cualquier otro.



Los equipos por los que se hace circular el agua con el objeto de retirar las materias de gran tamaño (ramas, troncos, bolsas de plástico...) pueden estar constituidos por barras, alambres o varillas paralelas, rejillas, telas metálicas o placas perforadas, y las aberturas pueden ser de cualquier forma, aunque normalmente suelen ser ranuras rectangulares u orificios circulares. Los equipos formados por varillas o barras paralelas reciben el nombre de rejas de barrote. El término tamiz se circunscribe al uso de placas perforadas y mallas metálicas de sección cuneiforme. La función que desempeñan las rejas y tamices se conoce con el nombre de desbaste, y el material separado en esta operación recibe el nombre de basuras o residuos de desbaste. Según el método de limpieza que se emplee, los tamices y rejas pueden ser de limpieza manual o automática. Generalmente, las rejas tienen aberturas (separación entre las barras) superiores a 15 mm, mientras que los tamices tienen orificios de tamaño inferior a este valor.

Si se prevé la existencia de grandes sólidos -voluminosos- o de una elevada presencia de arenas en el agua a tratar, se debe incluir en cabecera de la instalación, antes de cualquier otra operación, un *Pozo de Gruesos*. Consiste en un pozo situado a la entrada del colector a la instalación, con fondo tronco piramidal invertido y paredes muy inclinadas con el fin de concentrar los sólidos y las arenas decantadas en la zona central donde se extraerán mediante cucharas bivalvas anfibia de accionamiento electrohidráulico. Los residuos obtenidos se almacenan en contenedores para su posterior transporte a vertedero o incineración.

En otros casos, si el tipo de sólidos lo permite, se utilizan trituradoras, reduciendo el tamaño de sólidos y separándose posteriormente por sedimentación u otras operaciones.

### **3.- Homogeneización de caudales**

La homogeneización consiste simplemente en amortiguar por laminación las variaciones del caudal, con el objeto de conseguir un caudal constante o casi constante. Esta técnica puede aplicarse en situaciones diversas. Las principales aplicaciones están concebidas para la homogeneización de:

- Variación estacional en las aguas brutas.
- Variación estacional en las aguas residuales.
- Variación día-noche en las aguas residuales.

Aparte de la mejora de la mayoría de las operaciones y procesos de tratamiento, la homogeneización del caudal es una opción alternativa para incrementar el rendimiento de las plantas de tratamiento que se encuentran sobrecargadas.

En la disposición que recibe el nombre de «en línea», la totalidad del caudal pasa por el tanque de homogeneización. Este sistema permite reducir las concentraciones de

los diferentes constituyentes y amortiguar los caudales de forma considerable. En la disposición «en derivación», sólo se hace pasar por el tanque de homogeneización el caudal que excede un límite prefijado. Aunque con este segundo sistema se minimizan las necesidades de bombeo, la reducción de la concentración de los diferentes constituyentes no es tan alta como con el primero.

#### **4.- Mezclado**

El mezclado es una operación unitaria de gran importancia en muchas fases del tratamiento de aguas, entre las que podemos citar:

- Mezcla completa de una sustancia con otra.
- Mezcla de suspensiones líquidas.
- Mezcla de líquidos miscibles.
- Floculación.
- Transferencia.

La mayoría de las operaciones de mezclado relacionadas con el tratamiento de las aguas puede clasificarse en continuas y rápidas continuas (30 segundos o menos). Estas últimas suelen emplearse en los casos en los que debe mezclarse una sustancia con otra, mientras que las primeras tienen su aplicación en aquellos casos en los que debe mantenerse en suspensión el contenido del reactor o del depósito.

La mezcla rápida de productos químicos se puede llevar a cabo mediante diversos sistemas, entre los que destacan:

- Resaltos hidráulicos en canales
- Dispositivos Venturi
- Conducciones
- Por bombeo
- Mediante mezcladores estáticos
- Mediante mezcladores mecánicos

En los cuatro primeros, el mezclado se consigue como consecuencia de las turbulencias que se crean en el régimen de flujo. En los mezcladores estáticos, las turbulencias se producen como consecuencia de la disipación de energía, mientras que en los mezcladores mecánicos las turbulencias se consiguen mediante la aportación de energía con impulsores giratorios como las paletas, hélices y turbinas.

El mezclado continuo puede llevarse a cabo mediante diversos sistemas, entre los cuales se encuentran:

- Los mezcladores mecánicos
- Mecanismos neumáticos



- Mezcladores estáticos
- Por bombeo

El mezclado mecánico se lleva a cabo mediante los mismos procedimientos y medios que el mezclado mecánico rápido continuo. El mezclado neumático comporta la inyección de gases. Un canal con pantallas deflectoras es un tipo de mezclador estático que se emplea en el proceso de floculación.

## 5.- Sedimentación

Es una de las operaciones unitarias más utilizadas en el tratamiento de las aguas. Los términos sedimentación y decantación se utilizan indistintamente.

La sedimentación consiste en la separación, por la acción de la gravedad, de las partículas suspendidas cuyo peso específico es mayor que el del agua, en resumen, se fundamenta en una operación física en la que se aprovecha la fuerza de la gravedad que hace que una partícula más densa que el agua tenga una trayectoria descendente, depositándose en el fondo del sedimentador. Esta operación será más eficaz cuanto mayor sea el tamaño y la densidad de las partículas a separar del agua, es decir, cuanto mayor sea su velocidad de sedimentación, siendo el principal parámetro de diseño para estos equipos.

Realmente, este tipo de partículas (grandes y densas, como las arenas) se tienen en pocas ocasiones en aguas industriales. Lo más habitual es encontrar sólidos poco densos, por lo que es necesario, para hacer más eficaz la operación, llevar a cabo una coagulación-floculación previa, que como se explicará más adelante, consiste en la adición de ciertos reactivos químicos para favorecer el aumento del tamaño y densidad de las partículas.

La sedimentación puede producirse en una o varias etapas o en varios de los puntos del proceso de tratamiento. En ocasiones, la sedimentación es el único tratamiento al que se somete el agua.

En función de la concentración y de la tendencia a la interacción de las partículas, se pueden producir cuatro tipos de sedimentación: discreta, floculenta, retardada (también llamada zonal), y por compresión.

La sedimentación discreta se produce cuando la concentración de sólidos es baja y las partículas sedimentan como entidades individuales. La floculenta se produce en una suspensión bastante diluida donde las partículas se agregan y, como consecuencia de ello sedimentan. La retardada o zonal se refiere a concentraciones intermedias, la sedimentación se produce por la formación de una unidad de masa de partículas. La sedimentación por compresión se origina en suspensiones muy concentradas, de tal forma que se produce una estructura, y ésta solo sedimenta mediante compresión.



En la mayoría de los casos, el objetivo principal es la obtención de un efluente clarificado, pero también es necesario producir un fango cuya concentración de sólidos permita su fácil tratamiento y manejo. En el proyecto de tanques de sedimentación, es preciso prestar atención tanto a la obtención de un efluente clarificado como a la producción de un fango concentrado.

La forma de los equipos donde llevar a cabo la sedimentación es variable, en función de las características de las partículas a sedimentar (tamaño, forma, concentración, densidad, etc.).

- *Sedimentadores rectangulares*: La velocidad de desplazamiento horizontal del agua es constante y se suelen utilizar para separar partículas densas y grandes (arenas). Este tipo de sedimentación se denomina discreta, dado que las partículas no varían sus propiedades físicas a lo largo del desplazamiento hacia el fondo del sedimentador. Suelen ser equipos poco profundos, dado que, al menos teóricamente, este parámetro no influye en la eficacia de la separación, siendo el principal parámetro el área horizontal del mismo.

- *Sedimentadores circulares*: Son más habituales. En ellos el flujo de agua suele ser radial desde el centro hacia el exterior, por lo que la velocidad de desplazamiento del agua disminuye al alejarnos del centro del sedimentador. Esta forma de operar es adecuada cuando la sedimentación va acompañada de una floculación de las partículas, en las que el tamaño de flóculo aumenta al descender las partículas, y por lo tanto aumenta su velocidad de sedimentación.

- *Sedimentadores lamelares*: Han surgido como alternativa a los sedimentadores poco profundos, al conseguirse una mayor área de sedimentación en el mismo espacio. Consisten en tanques de poca profundidad que contienen paquetes de placas (lamelas) o tubos inclinados respecto a la base, y por cuyo interior se hace fluir el agua de manera ascendente. En la superficie inferior se van acumulando las partículas, desplazándose de forma descendente y recogándose en el fondo del sedimentador.

Asimismo, los sedimentadores (también llamados clarificadores o decantadores) se pueden clasificar según su fondo en: fondo *poco inclinado*, fondo *inclinado*, fondo *con pozos* en forma de tolva. Y según el sentido del flujo: *horizontal* y *vertical*.

Las partículas depositadas en el fondo de los equipos (denominados fangos) se arrastran mediante rasquetas desde el fondo donde se “empujan” hacia la salida. Estos fangos, en muchas ocasiones y en la misma planta de tratamiento, se someten a distintas operaciones para reducir su volumen y darles un destino final. Los sedimentadores según el sistema de eliminación de lodos se clasifican en: *mecanizados* y de *limpieza manual*.

La sedimentación, como se ha visto, se produce debido a la acción de la fuerza de la gravedad dentro de un campo de aceleraciones constante. La eliminación de



partículas sedimentables también puede llevarse a cabo aprovechando las propiedades de un campo de aceleraciones variable (*sedimentación acelerada*).

Para la eliminación de arenas del agua se han desarrollado numerosos aparatos que aprovechan tanto la acción de las fuerzas gravitacionales, como la acción de la fuerza centrífuga y las velocidades inducidas. En estos principios se basa uno de estos aparatos, conocido como Teacup separator (separador en forma de taza de té). A primera vista, el separador tiene forma de cilindro achatado; el agua residual se introduce tangencialmente cerca del fondo del cilindro, y se extrae por la parte superior del mismo, también tangencialmente. La arena se extrae por una abertura dispuesta en el fondo del elemento.

Dentro del separador, debido a que la parte superior está cerrada el flujo giratorio crea un vórtice libre. La principal característica de un vórtice libre es que el producto de la velocidad tangencial por el radio es constante.

$$V \cdot r = cte$$

donde  $V$  = velocidad tangencial,  $m/s$

$r$  = radio,  $m$ .

Por tanto, cuanto menor sea el radio en el separador, mayor será la velocidad tangencial en esos puntos, y mayor será la fuerza centrífuga. De hecho, la reducción del radio a una quinta parte de su valor inicial, implica multiplicar por 125 el valor de la fuerza centrífuga.

Debido a la magnitud de la fuerza centrífuga en la proximidad de la abertura de salida de las arenas, algunas partículas quedarán retenidas en el interior del vórtice libre mientras que otras escapan con el flujo de salida del aparato. Este diferente comportamiento de las partículas depende de su tamaño, densidad y resistencia al arrastre: las partículas de arena quedarán retenidas, mientras que las partículas orgánicas quedarán libres y saldrán del separador por la parte superior del mismo. La velocidad de sedimentación de una partícula de arena suele ser del orden de magnitud entre cuatro y ocho veces más grande que una partícula orgánica, con lo que las fuerzas de arrastre de las partículas orgánicas serán entre 16 y 64 veces superiores. Esto provoca que las partículas orgánicas tiendan a moverse solidarias con el fluido y sean transportadas fuera del separador. Las partículas retenidas en el vórtice acabarán sedimentando debido a la acción de la fuerza de la gravedad.

## 6.- Flotación

La flotación es una operación unitaria que se emplea para la separación de partículas sólidas o líquidas de una fase líquida. La separación se consigue



introduciendo finas burbujas de gas, normalmente aire, en la fase líquida. Las burbujas se adhieren a las partículas, y la fuerza ascensional que experimenta el conjunto partícula-burbuja de aire hace que suban hasta la superficie del líquido, de donde son arrastradas y sacadas del sistema. Obviamente, esta forma de eliminar materia en suspensión será adecuada en los casos en los que las partículas tengan una densidad inferior o muy parecida a la del agua, así como en el caso de emulsiones, es decir, una dispersión de gotas de un líquido inmiscible, como en el caso de aceites y grasas. En este caso las burbujas de aire ayudan a “flotar” más rápidamente estas gotas, dado que generalmente la densidad de estos líquidos es menor que la del agua.

Los equipos utilizados para llevar a cabo esta operación unitaria, son los Flotadores o Unidades de Flotación.

El rendimiento de esta operación se expresa como la relación existente entre los kilos de aire utilizados y los kilos de sólidos separados. Valores usuales de esta relación son 0,005-0,09, dependiendo de factores tales como: presión de trabajo, concentración de sólidos, características del agua residual y características de los sólidos a eliminar.

En el tratamiento de aguas se utiliza aire como agente de flotación, y en función de cómo se introduzca en el líquido, se tienen dos sistemas de flotación:

- *Flotación por aire disuelto (DAF)*: En este sistema el aire se introduce en el agua residual bajo una presión de varias atmósferas. Los elementos principales de estos equipos son la bomba de presurización, el equipo de inyección de aire, el tanque de retención o saturador y la unidad de flotación propiamente dicha, donde tiene lugar la reducción brusca de la presión, por lo que el aire disuelto se libera, formando multitud de microburbujas de aire.

- *Flotación por aire inducido*: La operación es similar al caso anterior, pero la generación de burbujas se realiza a través de difusores de aire, normalmente situados en la parte inferior del equipo de flotación, o bien inducidas por rotores o agitadores. En este caso el tamaño de las burbujas inducidas es mayor que en el caso anterior.

Históricamente la flotación se ha utilizado para separar la materia sólida o líquida flotante, es decir, con una menor densidad que el agua. Sin embargo la mejora en la generación de burbujas adecuadas y la utilización de reactivos para favorecer la operación (por ejemplo sustancias que disminuyen la tensión superficial) ha hecho posible la utilización de esta operación para la eliminación de materia más densa que el agua. Así se utiliza en el tratamiento de aguas procedentes de refinerías, industria de la alimentación, pinturas, etc. Una típica aplicación es también, aunque no sea estrictamente tratamiento de aguas, el espesado de fangos. En esta operación se trata de “espesar” o concentrar los fangos obtenidos en operaciones como la sedimentación.



La principal ventaja del proceso de flotación frente al de sedimentación consiste en que permite eliminar mejor y en menos tiempo las partículas pequeñas o ligeras cuya deposición es lenta.

## **7.- Filtración en medio granular**

La filtración es una operación en la que se hace pasar el agua a través de un medio poroso, con el objetivo de retener la mayor cantidad posible de materia en suspensión. El medio poroso tradicionalmente utilizado es un lecho de arena, de altura variable, dispuesta en distintas capas de distinto tamaño de partícula, siendo la superior la más pequeña y de entre 0.15 y 0.3 mm. Es una operación muy utilizada en el tratamiento de aguas potables, así como en el tratamiento de aguas para reutilización, para eliminar la materia en suspensión que no se ha eliminado en anteriores operaciones (sedimentación). En aguas industriales hay más variedad en cuanto al material filtrante utilizado, siendo habitual el uso de Tierra de Diatomeas. También es habitual, para mejorar la eficacia, realizar una coagulación-floculación previa.

Los principales tipos de configuración de los lechos filtrantes empleados actualmente para la filtración de aguas se pueden clasificar en función del número de capas de material filtrante, lo cual da lugar a los filtros de una única capa, los de doble capa y los filtros multicapa. En filtros de flujo descendente convencionales, los tamaños de los granos de cada capa se distribuyen, de menor a mayor, después del lavado a contracorriente. En los filtros que cuentan con más de una capa, el grado en que se mezclan los materiales de las diferentes capas depende de la densidad y de la diferencia de tamaños entre los granos del material que compone cada una de las capas.

Los lechos filtrantes de doble y triple capa, así como los de capa única profundos, se desarrollaron para permitir que los sólidos en suspensión presentes en el líquido a filtrar puedan penetrar a mayor profundidad dentro del lecho filtrante, con lo cual se aprovecha más la capacidad de almacenamiento de sólidos dentro del filtro. En cambio, en los filtros de capa única poco profundos, se ha podido comprobar que gran parte de la eliminación de sólidos en suspensión se produce en los primeros milímetros de la capa filtrante. El hecho de que los sólidos penetren a mayor profundidad, también permite ciclos de filtración más largos, puesto que se reduce el ritmo de aumento de las pérdidas de carga producidas.

La operación completa de filtración consta de dos fases: filtración y lavado o regeneración (comúnmente llamada lavado a contracorriente). Mientras la descripción de los fenómenos que se producen durante la fase de filtración es, prácticamente, idéntica para todos los sistemas de filtración que se emplean para las aguas, la fase de lavado es bastante diferente en función de si el filtro es de funcionamiento continuo o semicontinuo. Tal como expresan sus nombres, en los filtros de funcionamiento semicontinuo la filtración y el lavado son fases que se dan una a continuación de la otra,



mientras que en los filtros de funcionamiento continuo ambas fases se producen de forma simultánea.

La fase de filtración se realiza haciendo circular la suspensión a través de un lecho granulado, con o sin adición de productos químicos. Dentro del filtro, la eliminación de las partículas se hace a través de un proceso que incluye tamizado, intercepción, impacto, sedimentación y adsorción. El lavado se suele realizar en contracorriente y normalmente se emplea una combinación de agua y aire.

Hay muchas clasificaciones de los sistemas de filtración. Así se pueden clasificar en función de:

- la fuerza impulsora (gravedad o presión)
- la velocidad de filtrado (lenta, rápida o variable)
- la forma del filtro que se use (en torta o en profundidad)

- *Filtración por gravedad*: El agua circula verticalmente y en descenso a través del filtro por simple gravedad. Dentro de este tipo, podemos hablar de dos formas de operar, que nos lleva a tener una filtración lenta, apenas utilizados actualmente, o una filtración rápida. El mecanismo de la separación de sólidos es una combinación de asentamiento, retención, adhesión y atracción, por lo que se eliminan partículas mucho menores que el espacio intersticial. Es un sistema muy utilizado en tratamiento para aguas potables.

- *Filtración por presión*: Normalmente están contenidos en recipientes y el agua se ve forzada a atravesar el medio filtrante sometida a presión. También en este caso puede haber filtración lenta, en la que en la superficie del filtro se desarrolla una torta filtrante donde la filtración, a través de esa superficie, es por mecanismos físicos y biológicos. Por otro lado, en la filtración rápida se habla de filtración en profundidad, es decir, cuando la mayor parte de espesor de medio filtrante está activo para el proceso de filtración y la calidad del filtrado mejora con la profundidad. Esta filtración a presión se suele utilizar más en aguas industriales.

En la actualidad y en algunas de sus aplicaciones, estos métodos están siendo desplazados por operaciones con membranas, especialmente por microfiltración.

## **8.- Transferencia de gases**

Como su nombre indica, en esta operación se produce una transferencia de gases normalmente desde la fase gaseosa hacia la fase líquida. Es una componente esencial de gran número de los procesos de tratamiento del agua. La aplicación más común es la transferencia de oxígeno (a veces llamada aireación puesto que se realiza desde este medio). Los sistemas de aireación más comúnmente empleados se citan así:



Para crear interfases gas-agua adicionales, el oxígeno se puede suministrar en forma de burbujas de aire o de oxígeno puro. En la mayoría de las plantas de tratamiento de aguas, la aireación se lleva a cabo mediante la dispersión de burbujas sumergidas a profundidades de hasta 10 m. En algunos diseños europeos se han llegado a introducir las burbujas a profundidades superiores a los 30 m. Los diferentes sistemas de aireación incluyen placas y tubos porosos, tubos perforados, y diferentes configuraciones de difusores metálicos y de plástico. También se pueden emplear aparatos de cizalladura hidráulica, que rompen las burbujas en burbujas de menor tamaño al hacer circular el fluido a través de un orificio. Los mezcladores de turbina se pueden emplear para dispersar burbujas de aire introducidas en el tanque bajo el centro del elemento impulsor.

Los aireadores de superficie, método alternativo para la introducción de grandes cantidades de oxígeno, consisten en turbinas de alta o de baja velocidad o en unidades flotantes de alta velocidad que giran en la superficie del líquido parcialmente sumergidas. Estos aireadores se proyectan, tanto para mezclar el contenido del tanque, como para exponer el líquido a la acción de la atmósfera en forma de pequeñas gotas.

## 9.- Volatilización y arrastre de gases

En los últimos años se han detectado en el agua compuestos orgánicos volátiles (COV). Estos compuestos pasan a la atmósfera, volatilizándose, a través de la fase gaseosa presente en las aguas. Por tanto, para eliminar los COV del agua, ésta se pone en contacto con una corriente de aire puro para conseguir la mayor efectividad.

Los principales mecanismos que gobiernan el proceso de liberación de compuestos orgánicos volátiles en el tratamiento de aguas son:

- *Volatilización*: La liberación de COVs de la superficie de las aguas a la atmósfera se conoce con el término de volatilización. La liberación de compuestos orgánicos volátiles se produce al distribuirse entre la fase líquida y la fase gaseosa hasta alcanzarse las concentraciones de equilibrio. La transferencia de masa (movimiento) de un constituyente entre las dos fases depende de la relación entre la concentración en cada una de las fases respecto de la concentración de equilibrio. Por tanto, la transferencia entre fases de un determinado constituyente será mayor cuanto más alejada de la concentración de equilibrio sea la concentración en alguna de las fases. Debido a que la concentración de compuestos orgánicos volátiles en la atmósfera es extremadamente baja, la transferencia de COVs suele producirse desde el agua a la atmósfera.

- *Arrastre por gas (Gas Stripping)*: La eliminación de COVs por arrastre se produce cuando un gas (normalmente aire) queda atrapado temporalmente en el agua, o cuando se introduce de manera expresa para conseguir determinados objetivos de

tratamiento. Cuando se introduce un gas en el agua, se produce la transferencia de COVs del agua al gas. Las fuerzas que gobiernan la transferencia de moléculas entre las dos fases son las mismas que se en el caso de la volatilización. Por ello, la mayor efectividad en la eliminación de COVs por arrastre se consigue poniendo en contacto aguas residuales contaminadas con aire puro. En el tratamiento de aguas residuales, la eliminación por arrastre por gas se suele producir en desarenadores aireados, procesos de tratamientos biológicos aireados y en canales aireados de interconexión entre procesos.

## 10.- Separación por membranas

Las membranas son barreras físicas semipermeables que separan dos fases, impidiendo su íntimo contacto y restringiendo el movimiento de las moléculas a través de ella de forma selectiva. Este hecho permite la separación de las sustancias contaminantes del agua, generando un efluente acuoso depurado.

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. El transporte de componentes a través de la membrana se realiza siempre aplicando una fuerza impulsora. Esta fuerza impulsora puede ser debida a gradientes de concentración, presión, temperatura o 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 permeabilidad selectiva viene determinada por la medida de la partícula, la afinidad química con el material de la membrana y/o la movilidad de los componentes a través de la membrana (movimiento difusivo o convectivo).

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.

La filtración de membrana se puede dividir en micro y ultra filtración por una parte y en nanofiltración y ósmosis inversa (OI 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 desalar el agua, se aplican la nanofiltración y la ósmosis inversa. La nanofiltración y las membranas de OI 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 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.

En cambio, tiene como desventajas importantes el *fouling* o ensuciamiento de la membrana, que hace disminuir el flujo, con lo que el tiempo de filtración aumenta y se puede favorecer el crecimiento de microorganismos en la membrana, lo que requiere una limpieza más frecuente e incrementa el coste y el tiempo entre filtraciones.

En general, las membranas se pueden clasificar de acuerdo con:

- el mecanismo de separación (porosas, no porosas y de intercambio iónico)
- la morfología (asimétricas y mixtas)
- su geometría (plana y cilíndrica)
- su naturaleza química (orgánica e inorgánica)

La rápida expansión, a partir de 1960, de la utilización de membranas en procesos de separación a escala industrial ha sido propiciada por dos hechos: la fabricación de membranas con capacidad para proporcionar elevados flujos de permeado y la fabricación de dispositivos compactos, baratos y fácilmente intercambiables donde disponer grandes superficies de membrana.

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

### **3.2.2. Procesos químicos**

Cuando en un tratamiento, las transformaciones llevadas a cabo se producen mediante una reacción química, estas reciben el nombre de procesos químicos. La mayoría de estos procesos son aditivos, es decir, para eliminar una sustancia se requiere

añadir otra y por tanto, se produce un aumento neto de materia no deseada en el medio. Otra desventaja de este tipo de procesos es que tienen un coste de funcionamiento importante.

En general, los tratamientos químicos suelen ir acompañados de operaciones físicas, descritas anteriormente, en las que tiene lugar la separación de fases o componentes del residuo, conociéndose el proceso global como tratamiento físico-químico.

## 1.- Precipitación química

Algunos autores incluyen en este apartado la coagulación-floculación. Sin embargo, el término precipitación se utiliza más para describir procesos como la formación de sales insolubles, o la transformación química de un ión en otro con mayor o menor estado de oxidación que provoque la formación de un compuesto insoluble.

Consiste en la dosificación de determinados productos químicos al agua a tratar, con el fin de llevar a cabo una reacción con un contaminante o grupo de ellos, obteniéndose unos compuestos insolubles que por posterior sedimentación o filtración son eliminados del medio. En algunos casos, la alteración es pequeña, y la eliminación se logra al quedar atrapados dentro de un precipitado voluminoso constituido, principalmente, por el propio coagulante. Otra consecuencia de la adición de productos químicos es el incremento neto en los constituyentes disueltos del agua residual. Es necesario realizar ensayos en el laboratorio para conocer el consumo de reactivos, y en consecuencia, llevar a cabo el diseño correcto de los equipos de dosificación. Los equipos empleados son los *Precipitadores*.

A lo largo de los años, se han empleado muchas sustancias y de diversa naturaleza, como agentes de precipitación, las más comunes son:

- Sulfato de alumina.-  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$  a  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 14\text{H}_2\text{O}$
- Cloruro férrico.-  $\text{FeCl}_3$
- Sulfato férrico.-  $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$  ó  $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$
- Cal.-  $\text{Ca}(\text{OH})_2$

El grado de clarificación resultante depende tanto de la cantidad de productos químicos que se añade como del nivel de control de los procesos. Mediante precipitación química, es posible conseguir efluentes clarificados básicamente libres de materia en suspensión o en estado coloidal y se puede llegar a eliminar del 80 al 90 por 100 de la materia total suspendida, entre el 40 y el 70 por 100 de la  $\text{DBO}_5$ , del 30 al 60 por 100 de la DQO y entre el 80 y el 90 por 100 de las bacterias. Estas cifras contrastan con los rendimientos de eliminación de los procesos de sedimentación simple, en los

que la eliminación de la materia suspendida sólo alcanza valores del 50 al 70 por 100 y en la eliminación de la materia orgánica sólo se consigue entre el 30 y el 40 por 100.

Las principales aplicaciones en el tratamiento de aguas se centra en la eliminación de: Fosfatos, Compuestos tóxicos (metales pesados) y Fluoruros.

- *Fosfatos*: Se precipitan con sales de aluminio o hierro (generalmente sulfatos).

- *Metales pesados*: Se precipitan en medio básico con hidróxido cálcico. Se suele hacer a dos niveles de pH:

- pH= 8 Precipitan: Fe, Al,  $\text{Cr}^{3+}$ , Cu
- pH= 10,5 Precipitan: Pb, Mn, Hg, Ni, Cd, Zn

- *Fluoruros*: Se precipitan con cal.

## 2.- Coagulación-Floculación

Es el proceso que permite separar los sólidos en suspensión de tamaño muy pequeño, coloides y/o grasas y aceites emulsionados o finamente divididos, que no han sido separados en otros procesos. La pequeña dimensión ( $10^{-6} - 10^{-9}$  m) de las partículas coloidales presentes en el agua residual, así como la existencia de cargas negativas repartidas en su superficie, proporcionan una gran estabilidad a las suspensiones coloidales. Por tanto tienen una velocidad de sedimentación extremadamente lenta, por lo que haría inviable un tratamiento mecánico clásico. Para romper estas suspensiones y producir la aglomeración de partículas, se recurre al tratamiento de coagulación-floculación. Son dos procesos claramente diferenciados.

- *Coagulación*: Es el fenómeno de desestabilización de las partículas coloidales, que puede conseguirse especialmente a través de la neutralización de sus cargas eléctricas con la adición de un coagulante (reactivo químico). Es fundamental en este proceso conseguir una distribución rápida y homogénea del coagulante (agitación fuerte), para aumentar las oportunidades de contacto entre las partículas y el reactivo químico. El tiempo de residencia es < de 3 minutos. Los principales coagulantes utilizados son las sales de aluminio y de hierro.

- *Floculación*: Es la agrupación de las partículas descargadas, al ponerse en contacto unas con otras. Esta agrupación es favorecida por algunos productos químicos llamados floculantes. Los flóculos son retenidos en una fase posterior del tratamiento (decantación o flotación). En esta etapa, a diferencia de la anterior, es necesaria una agitación también homogénea y muy lenta, con objeto de no romper los flóculos que se forman. El tiempo de residencia es de 10-30 min.

Los equipos en los que se lleva a cabo este proceso (*Coaguladores* y los *Floculadores*), suelen constar de dos partes bien diferenciadas: Una primera donde se adicionan los reactivos, y se somete el agua a una fuerte agitación y durante un corto periodo de tiempo, con el objetivo de conseguir una buena y rápida mezcla de reactivos y coloide para llevar a cabo la coagulación. A continuación se pasa a una zona donde la agitación es mucho menos intensa y donde el agua permanece más tiempo. En este caso el objetivo es que se produzca la floculación. De esta forma la materia en suspensión tiene unas características mucho más adecuadas para su eliminación mecánica.

Los coagulantes suelen ser productos químicos que en solución aportan carga eléctrica contraria a la del coloide. Habitualmente se utilizan sales con cationes de alta relación carga/masa ( $\text{Fe}^{3+}$ ,  $\text{Al}^{3+}$ ) junto con polielectrolitos orgánicos, cuyo objetivo también debe ser favorecer la floculación:

- *Sales de  $\text{Fe}^{3+}$* : Pueden ser  $\text{Cl}_3\text{Fe}$  o  $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ , con eficacia semejante. Se pueden utilizar tanto en estado sólido como en disoluciones. La utilización de una u otra está en función del anión, si no se desea la presencia de cloruros o sulfatos.

- *Sales de  $\text{Al}^{3+}$* : Suele ser  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$  ó policloruro de aluminio. En el primer caso es más manejable en disolución, mientras que en el segundo presenta la ventaja de mayor porcentaje en peso de aluminio por kg dosificado.

- *Polielectrolitos*: Pueden ser polímeros naturales o sintéticos, no iónicos (poliacrilamidas) aniónicos (ácidos poliacrílicos) o catiónicos (polivinilaminas). Las cantidades a dosificar son mucho menores que para las sales, pero tanto la eficacia como el coste es mucho mayor.

No hay reglas generales en cuanto a qué coagulante es más eficaz en cada caso. Normalmente, para un agua residual concreta, se hace un denominado “ensayo de jarras” (*Jar Test*) donde se analiza la eficacia de los distintos productos (o mezclas de los mismos) así como el pH y dosificación óptima.

Por otro lado, la *electrocoagulación* es otra forma de llevar a cabo el proceso, ampliamente utilizada en el caso de tratamiento de aguas industriales. Consiste en la formación de los reactivos *in situ* mediante la utilización de una célula electrolítica. El ánodo suele ser de aluminio, formándose cationes de  $\text{Al}^{3+}$ , mientras en el cátodo se genera  $\text{H}_2$ , siendo útil si la separación posterior de la materia es por flotación.

### 3.- Adsorción

Es un tratamiento muy específico y de aplicación a casos muy concretos. De costes elevados, tanto de implantación como de mantenimiento, hace que no se utilice demasiado en el campo de tratamiento de aguas. Sólo se aplica para eliminar color, olor y sabor, así como restos de materia orgánica del tratamiento biológico o contaminantes



muy específicos (fenoles, hidrocarburos aromáticos nitrados, derivados clorados, ...), principalmente en aguas industriales más que en urbanas.

El proceso de adsorción consiste, en términos generales, en la captación de sustancias solubles presentes en la interfase de una solución. Esta interfase puede hallarse entre un líquido y un gas, un sólido, o entre dos líquidos diferentes. A pesar de que la adsorción también tiene lugar en la interfase aire-líquido en el proceso de flotación, en esta sección sólo se considerará la adsorción en la interfase entre líquido y sólido.

Consecuentemente con lo anterior, el proceso de adsorción se basa en la retención sobre la superficie de un sólido de las moléculas en disolución, por acción de fuerzas químicas o físicas. Un parámetro fundamental es este caso será la superficie específica del sólido, dado que el compuesto soluble a eliminar se ha de concentrar en la superficie del mismo. Las moléculas absorbidas reciben el nombre de "*adsorbato*" y el material que las retiene "*adsorbente*". Cuando la unión es de tipo químico, el proceso es irreversible; si es física, es reversible. La adsorción se rige por la "Ley de Freundlich y Langmuir".

Entre los factores que afectan a la adsorción tenemos:

- Solubilidad: Menor solubilidad, mejor adsorción.
- Estructura molecular: Más ramificada, mejor adsorción.
- Peso molecular: Grandes moléculas, mejor adsorción.
- Problemas de difusión interna, pueden alterar la norma.
- Polaridad: Menor polaridad, mejor adsorción.
- Grado de saturación: Insaturados, mejor adsorción.

Los adsorbentes más utilizados son: Gel de sílice, Alúmina, Resinas Orgánicas y Carbón activo (granular y polvo). Existen adsorbentes específicos para determinados compuestos, pero el más utilizado es el carbón activo, aunque recientemente se están desarrollando diversos materiales sólidos que mejoran, en ciertas aplicaciones, las propiedades del carbón activo.

Los equipos utilizados son los *Adsorbedores*, que adoptan la disposición en columnas de relleno.

El proceso de adsorción tiene lugar en tres etapas: macrotransporte, microtransporte y sorción. El macrotransporte engloba el movimiento por advección y difusión de la materia orgánica a través del líquido hasta alcanzar la interfase líquido-sólido. Por su parte, el microtransporte hace referencia a la difusión del material orgánico a través del sistema de macroporos del carbón activado granular (CAG) hasta alcanzar las zonas de adsorción que se hallan en los microporos y submicroporos de los gránulos de carbón activado.

La adsorción se produce en la superficie del gránulo y en sus macroporos y mesoporos, pero el área superficial de estas zonas del CAG es tan pequeña comparada con el área de los micro y submicroporos, que la cantidad de material adsorbido en ellos se considera despreciable. El uso del término sorción se debe a la dificultad de diferenciar la adsorción física de la adsorción química, y se emplea para describir el mecanismo por el cual la materia orgánica se adhiere al CAG. El equilibrio se alcanza cuando se igualan las tasas de sorción y desorción, momento en el que se agota la capacidad de adsorción del carbón. La capacidad teórica de adsorción de un determinado contaminante por medio del carbón activado se puede determinar calculando su isoterma de adsorción.

La cantidad de adsorbato que puede retener un adsorbente es función de las características y de la concentración del adsorbato y de la temperatura. En general, la cantidad de materia adsorbida se determina como función de la concentración a temperatura constante, y la función resultante se conoce con el nombre de isoterma de adsorción.

Hay dos formas clásicas de utilización de carbón activo, con propiedades diferentes y utilizadas en diferentes aplicaciones:

- *Carbón activado granular (GAC)*. Se suele utilizar una columna como medio de contacto entre el agua a tratar y el carbón activado, en la que el agua entra por la parte inferior y asciende hacia la superior. El tamaño de partícula en este caso es mayor que en el otro. Se suele utilizar para eliminar elementos traza, especialmente orgánicos, que pueden estar presentes en el agua, y que habitualmente han resistido un tratamiento biológico. Son elementos, que a pesar de su pequeña concentración, en muchas ocasiones proporcionan mal olor, color o sabor al agua.

- *Carbón activo en polvo (CAP)*. Este tipo de carbón se suele utilizar en procesos biológicos, cuando el agua contiene elementos orgánicos que pueden resultar tóxicos. También se suele añadir al agua a tratar, y pasado un tiempo de contacto, normalmente con agitación, se deja sedimentar las partículas para su separación previa. Suelen ser operaciones llevadas a cabo en discontinuo.

La viabilidad económica de este proceso depende de la existencia de un medio eficaz de regeneración del sólido una vez agotada su capacidad de adsorción. El GAC se regenera fácilmente por oxidación de la materia orgánica y posterior eliminación de la superficie del sólido en un horno. Las propiedades del carbón activo se deterioran, por lo que es necesario reponer parte del mismo por carbón virgen en cada ciclo. Por otro lado el CAP es más difícil de regenerar, pero también es cierto que es más fácil de producir.

El coste es un parámetro importante a la hora de la elección del adsorbente. Alternativas al carbón activo son las zeolitas, arcillas (montmorillonita, sepiolita,



bentonita, etc.), los denominados adsorbentes de bajo coste, procedentes en su mayor parte de residuos sólidos orgánicos. Recientemente se están desarrollando derivados de polisacáridos (biopolímeros derivados del almidón).

La necesidad de una mayor calidad de las aguas está haciendo que este tratamiento esté en auge. Es considerado como un tratamiento de refino, y por lo tanto al final de los sistemas de tratamientos más usuales, especialmente con posterioridad a un tratamiento biológico.

#### 4.- Desinfección

Es el proceso mediante el cual se eliminan los *gérmenes patógenos* de un agua residual. No debe confundirse con la esterilización, que consiste en la eliminación total de todos los microorganismos.

La desinfección tiene como objetivo la destrucción selectiva de bacterias y virus patógenos presentes en el agua residual, utilizándose cuando la masa de agua receptora puede tener un uso recreativo, de baño, o incluso de abastecimiento. Se puede realizar mediante la adición de productos químicos como cloro, bromo, yodo o permanganato potásico, lo cual puede entrañar una serie de riesgos para el medio receptor por lo que dichos productos deben utilizarse con precaución.

De hecho, el agente de más amplio uso es el cloro, que presenta graves desventajas no sólo en lo que al medio concierne, sino también en lo que respecta a cuestiones de Salud Pública. Así, si el agua a desinfectar con cloro o sus derivados contiene materias orgánicas o contaminantes químicos, se pueden originar compuestos tóxicos o que menoscaban las características organolépticas del agua.

Las *características* de un buen desinfectante son:

- Capacidad de destrucción de los microorganismos patógenos presentes en el agua.
- Ser inocuo y no tener sabor y olor desagradables.
- Fácil manipulación y manejo.
- Determinación rápida y fácil, de su concentración en agua (automatismo).
- Permanencia en el agua, cuando su demanda sea nula.
- Precio asequible en el mercado vigente.
- Rapidez de actuación e independencia del pH, concentración, temperatura y variación de las condiciones físicas.

Los desinfectantes pueden ser químicos como el cloro y sus derivados, el ozono, el yodo, el bromo, los alcoholes, los metales pesados, los jabones, ácidos y bases, etc. También hay desinfectantes físicos como el calor y la luz (solar o ultravioleta),



desinfectantes mecánicos como tamices, desarenadores, sedimentadores, filtros, etc. Y, por último se puede realizar la desinfección mediante radiación electromagnética, acústica y la radiación de partículas. El más utilizado es el hipoclorito sódico (lejía). Los equipos utilizados son las *Arquetas de desinfección*.

### **1.- Métodos físicos**

1.1.- *Filtración*: Ayuda a eliminar bacterias, pero por sí solo, no puede garantizar la potabilidad del agua.

1.2.- *Ebullición*: Método excelente para destruir los microorganismos patógenos que suelen encontrarse en el agua: bacterias, quistes y huevos. Para que sea efectiva, debe ser turbulenta. El desprendimiento de burbujas a veces se confunde con la ebullición. Es conveniente hervir el agua en el mismo recipiente en que haya de enfriarse y almacenarse procurando usarlo exclusivamente para estos propósitos.

1.3.- *Rayos ultravioleta*: Su empleo es muy limitado, ya que se necesita de un aparato especial que requiere energía eléctrica para su funcionamiento. Su efectividad es muy reducida en aguas turbias.

### **2.- Métodos químicos**

2.1.- *Ozono*: Es un oxidante poderoso. No deja olor pero sí sabor, aunque no desagradable. Es difícil regular su aplicación. No tiene acción residual.

2.2.- *Yodo*: Muy buen desinfectante, necesita un tiempo de contacto de media hora. Es muy costoso para emplearse en abastecimientos públicos.

2.3.- *Plata*: En forma coloidal o iónica es bastante efectiva; no da sabor ni olor al agua, tiene una acción residual muy conveniente. Su efectividad disminuye con la presencia de ciertas sustancias, como cloruros, que se encuentran a veces en exceso en el agua.

2.4.- *Cloro*: El cloro es indudablemente el elemento más importante que existe para la desinfección del agua. Se suele usar en una dosis de 0,0001% que destruye todos los microbios en cuatro minutos. Además se usa para:

- Eliminar olores y sabores.
- Decolorar.
- Ayudar a evitar la formación de algas.
- Ayudar a quitar el hierro y manganeso.
- Ayudar a la coagulación de materias orgánicas.

Como ya se ha comentado anteriormente, de todos los desinfectantes empleados, el cloro es quizás el más universalmente utilizado. La razón de este hecho hay que buscarla en que satisface la mayoría de los requisitos.

La adición de cloro más allá del breakpoint, producirá un aumento del cloro libre disponible directamente proporcional al cloro añadido (hipoclorito sin reaccionar). La razón principal para añadir suficiente cloro como para obtener cloro residual libre radica en que se asegura que se alcanzará la desinfección. En ocasiones, debido a la formación de tricloruro de nitrógeno y de sus compuestos afines, las operaciones de cloración al breakpoint han presentado problemas de olores. La presencia de compuestos adicionales durante la cloración da lugar a la reacción con la alcalinidad del agua residual y, en casi todos los casos, la reducción del pH será pequeña. La presencia de compuestos adicionales que reaccionen con el cloro puede alterar significativamente la forma de la curva del breakpoint. La cantidad de cloro que se debe añadir para alcanzar un nivel de cloro residual determinado recibe el nombre de demanda de cloro.

La eficacia de una correcta desinfección depende de los siguientes *factores*:

- Tipo y concentración de los microorganismos a destruir.
- Tipo y concentración del desinfectante.
- Tiempo de contacto entre agua y agente desinfectante.
- Características físicas y químicas del agua a tratar ( $T^a$ )

En resumen, la utilización de desinfectantes persigue tres finalidades: producir agua libre de patógenos u organismos vivos, evitar la producción de subproductos indeseables de la desinfección y mantener la calidad bacteriológica en la red conducción posterior.

## 5.- Decloración

La decloración es la práctica que consiste en la eliminación de la totalidad del cloro combinado residual presente en el agua después de la cloración, para reducir los efectos tóxicos de los efluentes descargados a los cursos de agua receptores o destinados a la reutilización.

La cloración es uno de los métodos más comúnmente utilizados para la destrucción de los organismos patógenos y otros organismos perjudiciales que puedan poner en peligro la salud humana. Sin embargo, como se ha señalado anteriormente, algunos de los compuestos orgánicos presentes en el agua residual pueden causar interferencias en el proceso de cloración. Muchos de estos compuestos pueden reaccionar con el cloro para formar compuestos tóxicos, que pueden tener efectos adversos a largo plazo sobre los usos de las aguas a las que se descargan. A fin de minimizar los efectos de esta toxicidad potencial del cloro residual sobre el medio ambiente, se ha considerado necesario declorar el agua residual previamente clorada.

El producto químico que más se emplea para llevar a cabo la decoloración, tanto si es necesaria para cumplir las limitaciones de vertidos, como si se aplica para mejorar la calidad del efluente de la cloración al breakpoint en la eliminación del nitrógeno amoniacal, es el dióxido de azufre. También se ha empleado con este fin el carbón activado, el sulfito de sodio y el metabisulfito de sodio.

## 6.- Oxidación química

En una oxidación participan siempre dos componentes: la sustancia a oxidar y el oxidante. El oxidante capta electrones, reduciéndose, mientras que la sustancia a oxidar cede los electrones.

La oxidación de sustancias orgánicas tiene lugar por etapas, con formación de productos intermedios. En caso de una oxidación completa de sustancias orgánicas, éstas se transforman en los productos finales inorgánicos, agua y dióxido de carbono.

Los principales procesos de oxidación química empleados en el tratamiento de aguas son:

- *La oxidación en fase homogénea con agentes químicos*: como el  $\text{Fe} + \text{H}_2\text{O}_2$ ,  $\text{KMnO}_4$ ,  $\text{ClO}_2$ , etc. Emplean condiciones suaves de temperatura y presión, pero la relación oxidante/contaminante es muy alta (del orden de 2 a 100 oxidante / 1 de contaminante, en peso), lo que supone un coste muy elevado de reactivo cuando se tratan corrientes residuales de elevado caudal.

- *Incineración*: Consiste en la oxidación térmica completa del residuo en fase gas y a temperatura elevada. Es un método útil únicamente cuando se trata de pequeñas cantidades de aguas con una concentración elevada de contaminantes oxidables y los residuos son especialmente tóxicos, ya que requiere temperaturas superiores a  $800^\circ\text{C}$ . En caso contrario, los costes de operación asociados a la necesidad de utilizar un combustible auxiliar, se vuelven excesivos. Aunque los costes de inmovilizado son elevados, la tecnología está bien establecida. Puede ser una buena elección tecnológica cuando se utiliza en combinación con una operación de separación previa que concentre el contaminante, por ejemplo una ultrafiltración. Aún así, en el tratamiento de efluentes líquidos resulta una técnica costosa además de impopular.

- *Oxidación húmeda no catalítica (WAO)*: La oxidación húmeda es un proceso clásico de tratamiento que se ha venido aplicando desde hace más de cincuenta años y en el cual la materia orgánica, soluble o en suspensión, se oxida con oxígeno disuelto procedente de aire o corrientes gaseosas enriquecidas en oxígeno. La química del proceso transcurre por vía radicalaria, de forma que son los radicales formados a partir del oxígeno, los que reaccionan con la materia orgánica. Por este motivo, la oxidación húmeda, tanto catalítica como no catalítica, se incluye a veces entre los procesos avanzados de oxidación, cuya característica definitoria es la implicación de radicales

hidroxilo como agentes oxidantes indirectos. Aquí se ha reservado, sin embargo, la denominación de avanzados para los procesos basados específicamente en la promoción de radicales hidroxilo. Los demás, que pueden incluir hidroxilos entre las especies oxidantes, pero cuyo diseño no está determinado por su generación, se han clasificado como procesos de oxidación directa. Una característica esencial de los procesos de oxidación húmeda no catalítica es la formación de ácidos carboxílicos como productos finales no mineralizables y que esencialmente corresponden a los ácidos fórmico, acético y oxálico. La proporción de estos compuestos es variable en función de los parámetros de diseño del proceso, pero típicamente representan el 5-10% del carbono orgánico total (Total Organic Carbon = TOC) del efluente de partida. Puesto que se trata de compuestos biodegradables, es posible limitar la extensión de la oxidación teniendo en cuenta que se trata de compuestos que no presentan problemas de toxicidad en depuradoras. Si, por el contrario, las concentraciones de contaminante son bajas y no es posible utilizar la oxidación como pretratamiento antes de un sistema de depuración biológica, es necesario utilizar catalizadores con el fin de evitar temperaturas de proceso prohibitivas. La temperatura de tratamiento de los procesos de oxidación húmeda es función de la naturaleza de los compuestos que se deben degradar, pero en general oscila entre 150 y 350°C con una presión de operación entre 20 y 200 bar dependiendo esencialmente de la temperatura. El rendimiento de la oxidación, medido como porcentaje de demanda química de oxígeno oscila entre el 75 y el 90%. La oxidación húmeda se puede aplicar en corrientes cuyo contenido en materia oxidable oscile entre 500 y 15.000 mg/L de demanda química de oxígeno y se vuelve autotérmica para valores de demanda química de oxígeno superiores a 20 g/L.

- *Oxidación húmeda catalítica (CWAO)*: En casos en los que sea necesario alcanzar una tasa de mineralización alta, el proceso de oxidación húmeda se puede llevar a cabo en presencia de catalizadores con el fin de acelerar la velocidad de la reacción de degradación de los compuestos orgánicos. La oxidación húmeda catalítica (CWAO) es capaz de mineralizar la práctica totalidad de los contaminantes orgánicos junto con compuestos inorgánicos tales como cianuros y amoníaco y como la oxidación húmeda, puede utilizar aire u oxígeno como agente oxidante. El catalizador hace posible la operación en condiciones de temperatura y presión más moderadas que las de la oxidación húmeda no catalítica y, por tanto, mejorar el balance económico del proceso. Los catalizadores suelen ser metales u óxidos metálicos soportados, pero también se han estudiado otras sustancias, tanto en sistemas homogéneos como heterogéneos. La oxidación húmeda catalítica permite llevar a cabo la oxidación de compuestos orgánicos en agua a presión moderada (en cualquier caso superior a la presión de vapor del agua y en general en el rango 15-50 bar.) y a una temperatura comprendida entre 120°C y 250°C, que es función esencialmente del tipo de catalizador. La eficacia del proceso en cuanto a la reducción de DQO puede oscilar entre el 75% y el 99%: el catalizador permite alcanzar grados de oxidación elevados o trabajar con menores tiempos de residencia a eficacia reducida, un equilibrio que decide el tipo de contaminante a eliminar. La oxidación húmeda catalítica está particularmente indicada en el caso de efluentes concentrados (demandas químicas de oxígeno mayores que 10.000 mg/L, para

las cuales el proceso no requiere aporte externo de energía) o que contengan compuestos no biodegradables o tóxicos para los sistemas biológicos de depuración. El proceso no es eficaz económicamente frente a los procesos avanzados de oxidación en el caso de efluentes con baja carga orgánica (demandas químicas de oxígeno menores que 5.000 mg/L).

- *Oxidación húmeda supercrítica (SWAO)*: En los procesos de oxidación húmeda mencionados hasta ahora el oxidante primario debe atravesar la interfase gas-líquido. Esto impone limitaciones al diseño de reactores puesto que debe de tenerse en cuenta una posible limitación a la velocidad de transferencia de materia. Si se rebasa el punto crítico del agua (647.096 K, y 22.064 MPa) desaparece la diferencia entre fases a la vez que los coeficientes de transporte alcanzan valores elevados, lo que permite operar con velocidades de oxidación elevadas. De esta forma, los compuestos orgánicos tóxicos y refractarios a la oxidación pueden degradarse con gran eficacia a temperaturas comprendidas entre 400 y 650° C con tiempos de residencia muy pequeños (30-90 s). Además, el proceso permite tratar efluentes con contaminantes muy diversos, incluyendo metales, que son transformados en sus óxidos. Por otro lado, la presión que requiere la oxidación supercrítica es muy elevada y en las condiciones de presión y temperatura de la operación existe una fuerte incidencia de la corrosión debida a la oxidación de halógenos, fósforo y azufre, factores ambos que fuerzan a utilizar materiales costosos. Finalmente, en agua supercrítica la solubilidad de muchos compuestos inorgánicos es pequeña, por lo que las sales tienden a depositarse en el reactor y en las conducciones ocasionando problemas de erosión y taponamiento. De nuevo es conveniente indicar, que la diferencia entre procesos de oxidación directa y procesos avanzados de oxidación es bastante arbitraria y que se ha reservado la denominación de “avanzados” para los procesos basados en la generación de radicales hidroxilo en su versión más restrictiva.

- *Procesos de oxidación avanzada*: Los procedimientos avanzados de oxidación (Advanced oxidation processes = AOP) se definen como “aquellos procesos de oxidación que implican la generación de radicales hidroxilo en cantidad suficiente para interaccionar con los compuestos orgánicos del medio”. La característica fundamental de los radicales es la existencia de un electrón libre único en lugar de una pareja de electrones. Este electrón confiere al radical  $\text{HO}^\cdot$  su gran reactividad. Los radicales  $\text{HO}^\cdot$  son agentes oxidantes muy potentes que son capaces de oxidar casi cualquier sustancia orgánica. Se trata de una familia de métodos que utilizan la elevada capacidad oxidante de los radicales  $\text{HO}^\cdot$  y que se diferencian entre sí en la forma en la que los generan. Los más comunes utilizan combinaciones de ozono ( $\text{O}_3$ ), peróxido de hidrógeno ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ), radiación ultravioleta y fotocatálisis. Una consecuencia de la elevada reactividad del agente oxidante es que los procesos avanzados de oxidación se caracterizan también por su baja selectividad; pero lo que en un proceso de producción puede ser una desventaja, es sin embargo una característica deseable en el caso de la eliminación de contaminantes de aguas residuales.



Por otro lado, se trata de procesos que utilizan reactivos costosos tales como el agua oxigenada o el ozono, por lo que su utilización debe restringirse a situaciones en las que otros procesos más baratos, como los biológicos, no sean posibles. Su máximo potencial se explota cuando se consiguen integrar con otros tratamientos, como la adsorción o los tratamientos biológicos, a fin de conseguir la máxima economía de oxidante.

Una característica común a todos los procesos avanzados de oxidación es su capacidad para tratar efluentes con concentraciones menores que 5 g/L de demanda química de oxígeno. Para mayores concentraciones, el elevado consumo de agente oxidante y la mejora en el balance energético del proceso, hacen preferibles las técnicas de oxidación directa tales como la oxidación húmeda.

La oxidación avanzada se puede combinar también con procesos biológicos. En este caso, las sustancias orgánicas se oxidan primero químicamente para formar productos intermedios biodegradables.

## **7.- Neutralización**

A veces las aguas residuales contienen ácidos o álcalis con un pH muy alto o muy bajo, cuya acción debe ser neutralizada antes de su vertido o del tratamiento biológico:

- La neutralización en el caso de vertido debe ser tal que cumpla los límites marcados por la legislación aplicable al cauce receptor.
- En el caso del tratamiento biológico, debe ser tal que el pH resultante esté comprendido entre 6,5-8,5, para no perturbar la actividad biológica.

Para un correcto diseño del equipo de neutralización es necesario conocer además del caudal y la acidez-alcalinidad, el pH promedio en 24 horas.

El proceso de neutralización se realiza en un depósito de forma cúbica o cilíndrica, siendo en este caso el diámetro igual a la altura de líquido, dependiendo el volumen total del depósito de la velocidad de neutralización. Si se emplea sosa o ácidos fuertes, la neutralización es instantánea y con un tiempo de retención de 3 minutos sería suficiente.

Dado que el pH tiene una variación logarítmica cuando los valores son altos o bajos, es preciso realizar la neutralización en varias etapas, o lo que es lo mismo, escalonadamente a través de varios tanques escalonados en serie. Los neutralizantes más usados por su bajo coste, inocuidad y fácil manejo son: sosa cáustica, cal, caliza y ácido sulfúrico. Otros, más caros o con problemas de corrosión, gases tóxicos... son: ácido nítrico, ácido clorhídrico, carbonato sódico y amoníaco.



La neutralización de aguas ácidas también produce la precipitación de metales, una vez que estos son usualmente solubles en bajo pH. En este caso, los metales se precipitan en forma de hidróxidos, que forman un material coloidal que tiende a permanecer en suspensión; es preciso entonces promover la separación de los hidróxidos de la fase líquida, lo que puede conseguirse con la agregación de floculantes. El empleo de reactivos con calcio, por otra parte, produce la precipitación de carbonato de sodio ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ), formando un lodo (sludge) en el fondo del tanque de neutralización.

### 3.2.3. Procesos biológicos

Cuando en un tratamiento de descontaminación intervienen seres vivos (microorganismos, algas, plantas), los procesos realizados se denominan biológicos. Aplican las leyes naturales de autodepuración de los cauces receptores, bajo condiciones controladas.

Un proceso biológico de tratamiento o depuración de aguas residuales es un sistema en el cual se mantiene un cultivo de microorganismos (*biomasa*) que se alimenta de las impurezas del agua residual (*sustrato* o alimento). Estas impurezas son la materia orgánica biodegradable, el amonio, el nitrato, el fosfato y otros contaminantes a menor concentración.

Constituyen una serie de importantes procesos de tratamiento que tienen en común la utilización de microorganismos (entre las que destacan las bacterias) para llevar a cabo la eliminación de componentes indeseables del agua, aprovechando la actividad metabólica de los mismos sobre esos componentes. La aplicación tradicional consiste en la eliminación de materia orgánica biodegradable, tanto soluble como coloidal, así como la eliminación de compuestos que contienen elementos nutrientes (N y P). Es uno de los tratamientos más habituales, no solo en el caso de aguas residuales urbanas, sino en buena parte de las aguas industriales.

En general, el tratamiento biológico implica: (1) la conversión de la materia orgánica carbonosa disuelta y coloidal en productos finales y en tejido celular, (2) la formación de los flóculos biológicos compuestos de células y del material coloidal orgánico no biodegradable e inorgánico presente en el agua residual influente, y (3) la eliminación subsecuente de los flóculos biológicos mediante un proceso de separación de éstos del agua tratada.

El lugar donde se ponen en contacto la biomasa con el agua residual para llevar a cabo el tratamiento se denomina reactor biológico, o biorreactor, y puede ser de diferentes tipos. Hay que remarcar que en la mayoría de los casos la biomasa se genera espontáneamente en el reactor biológico, a partir de pequeñas concentraciones de



microorganismos presentes en el agua residual o en el aire, y de las reacciones biológicas que en el diseño y operación de la planta se procura favorecer.

Hay cinco grupos principales de procesos: aerobios, anaerobios, anóxicos, combinación de los tres anteriores, y los estanques. Además, estos procesos se pueden subdividir en función de si el tratamiento se lleva a cabo en sistemas de cultivo en suspensión, en sistemas de cultivo fijo o en sistemas resultantes de la combinación de ambos.

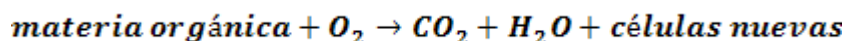
Los procesos aerobios son los tratamientos que tienen lugar en presencia de oxígeno, los anaerobios y los anóxicos se dan en ausencia de oxígeno. Los sistemas de cultivo en suspensión se caracterizan porque los microorganismos responsables del tratamiento se mantienen en suspensión dentro del líquido que constituye el agua procesada. En el caso de los sistemas de cultivo fijo, los microorganismos están fijados a un medio inerte y, el agua se hace pasar sobre este lecho para que las bacterias puedan eliminar la materia orgánica.

Teniendo en cuenta todos estos aspectos, existe una gran variedad de formas de operar, dependiendo de las características del agua, así como de la carga orgánica a tratar.

## 1.- Aerobio

En los procesos aerobios, los microorganismos requieren de la presencia de oxígeno para sus actividades metabólicas y por lo tanto para la degradación de la contaminación orgánica. Existen procesos aeróbicos estrictos, que son aquellos que solamente pueden funcionar si hay oxígeno, y los procesos aeróbicos facultativos, que son los que pueden alternar con anaeróbicos, de acuerdo a la concentración de  $O_2$  disponible.

De manera general, los procesos aeróbicos tienen la siguiente reacción:



Como se puede apreciar en la ecuación anterior, el metabolismo aeróbico se encarga de catalizar moléculas más grandes en  $CO_2$  y agua, fundamentalmente. Los diferentes grupos de microorganismos tienen metabolismos diferentes, y por lo tanto son capaces de catalizar una amplia gama de sustancias, aunque algunas veces se obtienen otros productos secundarios además de los mencionados.

Los principales microorganismos presentes en un proceso aerobio son, por lo general, los siguientes:



*Bacterias:* Constituyen el 95% de la biomasa (formadoras de flóculo, filamentosas, nitrificantes, etc.)

*Hongos:* Son poco comunes en los sistemas de tratamientos de aguas residuales urbanas. Su presencia en abundancia se asocia, por lo general, a condiciones de pH demasiado bajos. Pueden ser usuales en procesos industriales.

*Protozoos:* Son heterótrofos, y se encuentran libremente en la naturaleza, son predadores de las bacterias, son: Flagelados, Rizópodos (Amebas), Ciliados (pedunculados, libre nadadores, libres reptantes, suctores, etc.).

*Algas:* Su importancia estriba, no tanto por su capacidad de depuración sino por su capacidad fotosintética, aportando oxígeno. Por ser autótrofas permiten el aumento de la materia orgánica sintetizando el carbono mineral.

*Metazoos:* Son animales pluricelulares, muy abundantes en los sistemas que emplean soporte fijo. Se alimentan de sustrato y de bacterias. (Rotíferos, Nematodos, Oligoquetos, etc.).

Los procesos aeróbicos son muy eficientes, funcionan con una amplia gama de sustancias posibles de degradar, en ciclos relativamente sencillos. Su aplicación a aguas residuales puede estar muy condicionada por la baja solubilidad del oxígeno en el agua.

Existen procesos aerobios fijos y en suspensión:

▪ Cultivos en Suspensión: Los principales procesos de tratamiento **aerobio de cultivo en suspensión** empleados para la eliminación de la materia orgánica carbonosa son: (1) el proceso de fangos activados (lodos activados); (2) las lagunas aireadas; (3) el reactor de flujo discontinuo secuencial (SBR), y (4) el proceso de digestión aerobia. De todos ellos, el proceso de fangos activados es, con mucho, el más ampliamente empleado entre los procesos aeróbicos en suspensión. Este consiste en una suspensión de microorganismos, vivos y muertos, activados por oxígeno y capaces de estabilizar la materia orgánica presente en el agua residual.

- *Proceso de fangos activados:* Este proceso fue desarrollado en Inglaterra en 1914 por Arden y Lockett, y su nombre proviene de la producción de una masa activada de microorganismos capaz de estabilizar un residuo por vía aerobia. En la actualidad, existen muchas versiones del proceso original, pero son todas fundamentalmente iguales.

En la mayoría de los procesos de lodos activos se van a potenciar los procesos biológicos de síntesis y oxidación de la materia orgánica, si bien en algunos casos (procesos de baja carga másica) se van a potenciar más los procesos de endogénesis.



En el caso de las reacciones de oxidación se obtienen unos productos finales estables inertes ( $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{CO}_2$ , etc.), y en el proceso de síntesis, nuevos microorganismos, los cuales pueden separarse fácilmente por decantación posterior del agua, siempre y cuando no crezcan de forma dispersa sino floculenta.

En los procesos de respiración endógena se va a producir una oxidación de parte del material celular sintetizado, bien por consumo de reservas, bien debido a la muerte de los microorganismos, oxidación que va a dar lugar a la formación de productos estables inorgánicos como  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$  y material orgánico residual no biodegradable.

En este proceso, los microorganismos se encuentran en suspensión en las aguas residuales. La aireación del agua residual en el tanque de aireación mediante el uso de difusores o de aireadores mecánicos, que también sirven para mantener el líquido en estado de mezcla completa, suministra oxígeno a los microorganismos aerobios. El contenido del reactor se conoce con el nombre de «líquido mezcla». Como resultado del metabolismo, los microorganismos se agrupan en flóculos, que constituyen el llamado lodo activado. Al cabo de un periodo determinado de tiempo, la mezcla de las nuevas células con las viejas se conduce hasta un tanque de sedimentación, denominado tanque de clarificación, para su separación del agua residual tratada. Con la corriente de agua residual salen del tanque de aireación más lodos activados de los que se pueden formar de nuevo en el mismo periodo de tiempo. Para compensar esta pérdida de biomasa, una parte del lodo activado se devuelve al tanque de aireación (lodo de retorno). La parte no recirculada (lodo en exceso) es un residuo del proceso. El nivel al que se debe mantener la masa biológica depende de la eficacia deseada en el tratamiento y de otras consideraciones relacionadas con la cinética del crecimiento.

El sistema básico comprende, pues, un tanque de aireación y un tanque de clarificación por los que se hace pasar los lodos varias veces. Los dos objetivos principales del sistema de lodos activados son (1º) la oxidación de la materia biodegradable en el tanque de aireación y (2º) la floculación que permite la separación de la biomasa nueva del efluente tratado. Este sistema permite una remoción de hasta un 90% de la carga orgánica pero tiene algunas desventajas: en primer lugar requiere de instalaciones costosas y la instalación de equipos electromecánicos que consumen un alto costo energético. Por otra parte produce un mayor volumen de lodos que requieren de un tratamiento posterior por medio de reactores anaeróbicos y/o su disposición en rellenos sanitarios bien instalados.

- *Lagunas aireadas*: Las lagunas aireadas (a veces denominadas «estanques aireados»), se desarrollaron a partir de estanques de estabilización facultativos en los que se instalaron aireadores de superficie para eliminar los olores que se producían al estar sometidas a sobrecargas orgánicas.

El proceso del lagunaje aireado es esencialmente el mismo que el de fangos activados de aireación prolongada convencional, excepto que se usa como reactor un

depósito excavado en el terreno. El oxígeno necesario en el proceso se suministra mediante difusores o aireadores superficiales. En una laguna aerobia, la totalidad de los sólidos se mantienen en suspensión. En el pasado, las lagunas aireadas se operaban como los sistemas de fangos activados sin recirculación, y solían ir seguidas de grandes estanques de sedimentación. Para conseguir los niveles de tratamiento secundario, en la actualidad, se utilizan muchas lagunas aireadas complementadas con instalaciones de sedimentación e incorporando recirculación de sólidos biológicos.

En los sistemas de lagunas aireadas es posible llevar a cabo el proceso de nitrificación, tanto de forma estacional como en continuo. El grado de nitrificación depende del diseño y de las condiciones de funcionamiento del sistema, así como de la temperatura del agua residual. Generalmente, cuanto más alta sea la temperatura de ésta y cuanto menores las cargas (aumento del tiempo de retención del fango), mayor será el grado de nitrificación alcanzable.

- *Reactor discontinuo secuencial (SBR)*: El proceso de fangos activados, en ocasiones ha sido modificado para mejorar eficiencias o disminuir costos, pero básicamente el principio es el mismo. Así, el proceso llamado Reactor Discontinuo Secuencial, conocido como SBR (Sequencing Batch Reactor), corresponde a un sistema de lodo activado modificado en su diseño con el fin de que ambas etapas (aireación y sedimentación) sean realizadas dentro del mismo tanque.

Un reactor discontinuo secuencial (SBR) es un sistema de tratamiento de fangos activados cuyo funcionamiento se basa en la secuencia de ciclos de llenado y vaciado. Los procesos unitarios que intervienen son idénticos a los de un proceso convencional de fangos activados. En ambos sistemas intervienen la aireación y la sedimentación-clarificación. No obstante, existe una diferencia importante entre ambos. En las plantas convencionales los procesos se llevan a cabo simultáneamente en tanques separados, mientras que en los SBR, los procesos tienen lugar secuencialmente en el mismo tanque.

Los sistemas SBR tienen cinco etapas que tienen lugar de forma secuencial: (1) llenado; (2) reacción (aireación); (3) sedimentación (clarificación); (4) extracción (vaciado por decantación), y (5) fase inactiva.

- *Digestión aerobia*: En la digestión aerobia, el fango se airea durante un largo periodo de tiempo en un tanque abierto, sin calefacción, empleando difusores convencionales o aireadores superficiales. El proceso se puede llevar a cabo de manera continua o discontinua. En plantas de pequeño tamaño se emplea el sistema discontinuo, en el que el fango se airea y se mezcla completamente durante un largo periodo de tiempo, dejándose sedimentar a continuación en el interior de la misma cuba. En los sistemas continuos, la decantación y concentración del fango se realiza en un tanque independiente. La digestión con oxígeno de gran pureza es una modificación del proceso de digestión aerobia en el que se sustituye el aire por oxígeno de gran pureza.

El fango que resulta es parecido al que se obtiene en los procesos de digestión aerobia convencionales.

La digestión aerobia termófila representa un refinamiento adicional del proceso de, digestión aerobia. Este proceso puede permitir conseguir altos rendimientos de eliminación de la fracción biodegradable (superiores al 80 por 100) en tiempos de detención cortos (3 a 4 días) mediante la acción de bacterias termófilas a temperaturas entre 25 y 50 °C superiores a la temperatura ambiente.

▪ Cultivos Fijos: Los procesos de tratamiento *aerobios de cultivo fijo* se emplean, normalmente, para eliminar la materia orgánica que se encuentra en el agua residual. También se pueden emplear para llevar a cabo el proceso de nitrificación (conversión del nitrógeno amoniacal en nitrato). Los procesos de cultivo fijo incluyen los filtros percoladores (también conocido como lechos bacterianos o filtros biológicos), los filtros de pretratamiento o desbaste, los reactores biológicos rotativos de contacto o biodiscos (RBC) y los reactores de nitrificación de lecho fijo. El proceso de filtros percoladores es el más comúnmente empleado.

- *Filtros percoladores*: El primer filtro percolador se puso en funcionamiento en Inglaterra en 1893. El concepto de filtro percolador nació del uso de los filtros de contacto, que eran estanques impermeables rellenos con piedra machacada. En su funcionamiento, el lecho de contacto se llenaba con el agua residual por la parte superior y se permitía el contacto del agua con el medio durante un corto espacio de tiempo. A continuación, se dejaba drenar el lecho y se permitía un cierto tiempo de reposo antes de repetir el ciclo. Un ciclo típico exigía un total de 12 horas, de las cuales 6 se destinaban al reposo del filtro. Las limitaciones del filtro de contacto incluían una posibilidad relativamente alta de obturaciones, la duración del periodo de reposo, y la carga que podía emplearse, que era relativamente baja.

El filtro percolador moderno consiste en un lecho formado por un medio sumamente permeable al que se adhieren los microorganismos y a través del cual percola el agua residual, fenómeno del que recibe el nombre el proceso. El medio filtrante suele estar formado por piedras (en ocasiones también se emplean escorias), o diferentes materiales plásticos de relleno. En el caso de filtros percoladores con medio filtrante de piedra, el diámetro de las piedras oscila entre 2,5 y 10 cm. La profundidad del lecho varía en cada diseño particular, pero suele situarse entre 0,9 y 2,5 metros, con una profundidad media de 1,8 metros. Los filtros de piedra suelen ser circulares, y el agua residual se distribuye por la parte superior del filtro mediante un distribuidor rotatorio.

La aireación del filtro percolador se realiza normalmente mediante convección natural. El fundamento para ello son las diferencias de temperatura entre el aire exterior y el interior del filtro biológico.

- *Filtros de desbaste*: Los filtros de desbaste son filtros percoladores especialmente diseñados para trabajar con cargas hidráulicas elevadas. Los filtros de desbaste se usan, principalmente, para reducir la carga orgánica aplicada a los procesos posteriores y para obtener una nitrificación estacional, caso en el que se emplean para reducir la carga orgánica aplicada al proceso biológico situado a continuación en el proceso, con el objetivo de que se pueda conseguir la nitrificación en los meses de verano.

Los filtros de desbaste se suelen emplear con cargas hidráulicas elevadas, por lo que necesitan altas tasas de recirculación. El hecho de que las cargas hidráulicas sean tan elevadas, hace que el fenómeno de arrastre de la capa biológica se produzca, casi, de forma continua. Si se emplea un efluente no sedimentado para la recirculación, los sólidos biológicos presentes en el caudal de recirculación pueden contribuir a la eliminación de materia orgánica como si se tratara de un sistema de cultivo en suspensión. Cuando se produce este mecanismo, se pueden alcanzar rendimientos superiores a los previstos mediante un modelo de cultivo fijo.

- *Reactores biológicos rotativos de contacto (RBC)*: Un reactor biológico rotativo de contacto consiste en una serie de discos circulares de poliestireno, o cloruro de polivinilo, situados sobre un eje, a corta distancia unos de otros. Los discos están parcialmente sumergidos en el agua residual y giran lentamente en el seno de la misma.

En el funcionamiento de un sistema de este tipo, los crecimientos biológicos se adhieren a las superficies de los mismos. La rotación de los discos pone la biomasa en contacto, de forma alternativa, con la materia orgánica presente en el agua residual y con la atmósfera, para la adsorción de oxígeno. La rotación del disco induce la transferencia de oxígeno y mantiene la biomasa en condiciones aerobias. La rotación también es el mecanismo de eliminación del exceso de sólidos en los discos por medio de los esfuerzos cortantes que origina y sirve para mantener en suspensión los sólidos arrastrados, de modo que puedan ser transportados desde el reactor hasta el clarificador.

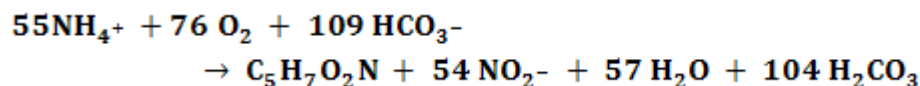
- *Reactores de lecho compacto*: Existe otro proceso de cultivo fijo, que es el reactor de lecho compacto, utilizado tanto para la eliminación de la DBO carbonosa como para la nitrificación. Típicamente, un reactor de lecho compacto consiste en un tanque (reactor) en el que existe un medio al que se adhieren los microorganismos. El agua residual se introduce en el tanque por su parte inferior mediante un sistema de distribución adecuado o mediante una cámara de alimentación. El aire u oxígeno puro necesario para el proceso se introduce conjuntamente con el agua residual a tratar.

La eliminación de nitrógeno se hace en varias fases. En primer lugar, durante el tratamiento biológico habitual, la mayor parte de los compuestos orgánicos de nitrógeno se convierten en amoníaco (amonificación). A continuación hay que conseguir que el amoníaco se convierta a nitratos (nitrificación) por la acción de bacterias nitrificantes (Nitrosomonas y Nitrobacter) que son aerobias. Los Nitrosomonas oxidan el amoníaco

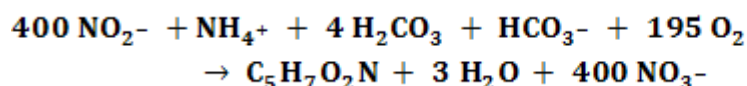


en nitrito, producto intermedio, mientras que los Nitrobacter transforman el nitrito en nitrato. La no acumulación de nitrito en el sistema evidencia que la conversión de amoníaco a nitrito tiene lugar por medio de una serie de complejas reacciones que gobiernan el proceso de conversión global. De forma aproximada, las reacciones que tienen lugar se pueden expresar de la siguiente manera:

Para los Nitrosomonas, la ecuación es la siguiente:



Para los Nitrobacter, la ecuación es:



Este proceso de nitrificación necesita de reactores de mayor volumen que los necesarios para eliminar carbono orgánico, aireación de grandes masas de agua y recirculación de fangos que complican y encarecen todo el proceso de depuración.

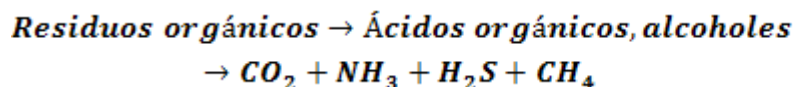
Los sistemas de lecho fijo retienen la biomasa dentro del confinamiento del reactor, eliminando de esta forma la necesidad de reciclado de los VSS (sólidos volátiles en suspensión). Debido a que las bacterias nitrificantes en los sistemas de crecimiento en suspensión tienden a ser eliminadas, a no ser que se disponga de un tiempo de residencia de los sólidos considerable, los sistemas de lecho fijo son muy prometedores como mecanismos de nitrificación.

La nitrificación es el primer paso en la eliminación del nitrógeno por el proceso de nitrificación-desnitrificación. No obstante, en este paso, el nitrógeno apenas ha cambiado de forma y no se ha eliminado, aunque sí permite eliminar su demanda de oxígeno. En el segundo paso, la desnitrificación, el nitrato se convierte en un producto gaseoso que es eliminado (proceso anóxico).

## 2.- Anaerobio

Estos procesos se realizan en ausencia de oxígeno, que son realizados por dos grupos de bacterias heterótrofas, que en un proceso de licuefacción/gasificación convierten un 90% de la materia orgánica, primero en intermediarios y luego en metano y CO<sub>2</sub> gaseosos. Algunas veces se obtienen productos secundarios como H<sub>2</sub>S, que es lo que genera los malos olores.

La ecuación general que describe el proceso es:



El tratamiento anaerobio es un proceso biológico ampliamente utilizado en el tratamiento de aguas residuales. Cuando éstas tienen una alta carga orgánica, se presenta como única alternativa frente al que sería un costoso tratamiento aerobio, debido al suministro de oxígeno. Es un proceso en el que pueden intervenir diferentes tipos de microorganismos pero que está dirigido principalmente por bacterias. El tratamiento anaerobio se caracteriza por la producción del denominado “biogás”, formado fundamentalmente por metano (60-80%) y dióxido de carbono (40-20%) y susceptible de ser utilizado como combustible para la generación de energía térmica y/o eléctrica. Además, solo una pequeña parte de la DQO tratada (5-10%) se utiliza para formar nuevas bacterias, frente al 50-70% de un proceso aerobio. Ello implica que sólo una pequeña fracción del residuo orgánico biodegradable es transformada en nuevas células, la mayor parte es convertida en metano, un gas combustible, lo que lo convierte en un producto final útil. Esto significa que se tiene una menor acumulación de lodo producido por el proceso de digestión anaeróbica. Sin embargo, la lentitud del proceso anaerobio obliga a trabajar con altos tiempos de residencia, por lo que es necesario diseñar reactores o digestores con una alta concentración de microorganismos.

Realmente, es un complejo proceso en el que intervienen varios grupos de bacterias, tanto anaerobias estrictas como facultativas, en el que, a través de una serie de etapas y en ausencia de oxígeno, se desemboca fundamentalmente en la formación de metano y dióxido de carbono. Cada etapa del proceso la llevan a cabo grupos distintos de bacterias, que han de estar en perfecto equilibrio. El proceso de digestión puede ser clasificado en cuatro etapas principales íntimamente relacionadas: Hidrólisis, Acidogénesis, Acetogénesis y Metanogénesis.

La bacteria fermentadora realiza las dos primeras etapas de degradación de la materia orgánica (hidrólisis y acidogénesis). Un segundo grupo de bacterias, acetogénicas, sintetiza los productos de la acidogénesis, dando lugar principalmente al acetato entre otros compuestos como  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2$ . La bacteria metanogénica convierte este acetato y el  $\text{H}_2$  en metano consumiendo  $\text{CO}_2$  para ello. Ésta también transforma otros compuestos como metanol, formato, monóxido de carbono y metilaminas, que son de menor importancia en la mayoría de los procesos de digestión anaeróbica. Únicamente las bacterias acetogénicas y metanogénicas son estrictamente anaeróbicas, las hidrolíticas y acidogénicas se componen de bacterias facultativas y anaerobias. Las bacterias facultativas son aquellas que pueden vivir tanto en la presencia de oxígeno como en su ausencia.

El desarrollo del tratamiento anaerobio ha sido paralelo al desarrollo del tipo de reactor donde llevar a cabo el proceso. Dado el bajo crecimiento de las bacterias metanogénicas y la lentitud con la que llevan a cabo la formación de metano, es necesario desarrollar diseños en los que se consiga una alta concentración de microorganismos (SSV) en su interior si se quiere evitar el utilizar reactores de gran tamaño. Para conseguirlo, habitualmente es necesario que el tiempo de retención hidráulico (TRH) sea inferior al tiempo de retención de sólidos (TRS) y esto se puede hacer por distintos medios. A todos estos reactores se les denomina de alta carga, dado que son los únicos que pueden tratar aguas con elevada carga orgánica de una forma viable.

Existen procesos anaerobios fijos y en suspensión:

- Cultivos en Suspensión: De todos ellos, el más común de los procesos ***anaerobios de cultivo en suspensión*** es el proceso de digestión anaerobia de mezcla completa, aunque también se describirán el proceso de contacto anaerobio y el proceso anaerobio de manto de fango de flujo ascendente (UASB).

- *Digestión anaerobia*: La digestión anaerobia es uno de los procesos más antiguos empleados en la estabilización de fangos. En este proceso se produce la descomposición de la materia orgánica e inorgánica en ausencia de oxígeno molecular. Sus principales aplicaciones han sido, y siguen siendo hoy en día, la estabilización de fangos concentrados producidos en el tratamiento del agua residual y de determinados residuos industriales. Sin embargo, recientemente se ha demostrado que los residuos orgánicos diluidos también se pueden tratar anaeróbicamente.

En el proceso de digestión anaerobia, la materia orgánica contenida en la mezcla de fangos primarios y biológicos se convierte biológicamente, bajo condiciones anaerobias, en metano ( $\text{CH}_4$ ) y dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ). El proceso se lleva a cabo en un reactor completamente cerrado. Los fangos se introducen en el reactor de forma continua o intermitente, y permanecen en su interior durante periodos de tiempo variables. El fango estabilizado que se extrae del proceso de forma continua o intermitentemente, tiene un bajo contenido en materia orgánica y patógenos, y no es putrescible.

Los dos tipos de digestores anaerobios más empleados son los de alta y baja carga. En el proceso de digestión de baja carga, no se suele calentar ni mezclar el contenido del digestor, y los tiempos de detención oscilan entre 30 y 60 días. En los procesos de digestión de alta carga, el contenido del digestor se calienta y mezcla completamente. El tiempo de detección necesario suele ser de 15 días o menos. La combinación de estos dos procesos se conoce con el nombre de proceso de doble etapa. La función de la segunda etapa consiste en separar los sólidos digeridos del líquido

sobrenadante, aunque puede tener lugar una digestión adicional y una cierta producción de gases.

El proceso de digestión anaerobia de mezcla completa es fundamental en la estabilización de la materia orgánica y de los sólidos biológicos.

- *Proceso anaerobio de contacto*: En el proceso anaerobio de contacto, los residuos que se quiere tratar se mezclan con los sólidos del fango recirculado y se digieren a continuación en un reactor cerrado para evitar la entrada de aire. El contenido del reactor se mezcla completamente y, tras la digestión, la mezcla se separa en un clarificador o una unidad de flotación al vacío. El sobrenadante del proceso, normalmente, es sometido a un tratamiento posterior. El fango anaerobio sedimentado se recircula para servir de siembra al agua residual entrante. Debido a la baja tasa de síntesis de los microorganismos anaerobios, el exceso de fango a evacuar es mínimo.

- *Reactor UASB (Upflow Anaerobic Sludge Blanket Reactor)*: En éste, el afluente es bombeado hacia el sistema de distribución interno por la parte inferior del reactor, entrando en contacto con la cama de lodo anaeróbico. Cada ramal tiene aperturas a través de las cuales fluye el afluente. Estos recorren todo el fondo del reactor. La reducción del DQO provoca la expansión/fluidización de la cama de lodo que es elevada por la velocidad ascendente producto de la generación de biogás (mezcla de gases entre el  $\text{CO}_2$  de la respiración anaeróbica de las bacterias y el metano producto de la combustión y degradación del DQO) y la velocidad del líquido. Cuando el gránulo libera el biogás adherido a su superficie, el lodo vuelve a caer a la zona inferior del reactor, el biogás es colectado en las cámaras para tal fin, y el agua residual tratada abandona el reactor por rebose. Esta dinámica ocurre continuamente dentro del reactor. El biogás generado da lugar a una agitación interior que interviene en la formación y mantenimiento de los gránulos, removiendo la cama de lodos y permitiendo el intercambio de estos con el agua residual. El elemento en donde se separan biogás, agua residual tratada y lodo es llamado separador trifásico. Este consta de varias cámaras separadas por deflectores, en las que el gas es recolectado.

- *Reactor IC (Internal Circulation)*: El concepto del IC está basado en la tecnología del UASB, con dos etapas de separadores trifásicos. Estos son de una mayor relación entre altura y diámetro. En efecto, el IC consiste en dos compartimentos tipo UASB colocados uno sobre el otro (el inferior es altamente cargado, mientras que el superior es poco cargado de materia orgánica).

En el IC el afluente es bombeado hacia el sistema de distribución interno, donde el lodo recirculado y parte del efluente son mezclados para lograr la dilución directa y acondicionamiento del afluente. La primera etapa contiene un manto concentrado y expandido de lodo granular, donde la mayor parte del DQO es convertido en biogás. Esto provoca la expansión/fluidización de la cama de lodo que es elevada por la velocidad ascendente producto de la mezcla del afluente, recirculación interna y flujo de



biogás. El contacto efectivo que se realiza entre el agua residual y la biomasa produce un lodo muy activo, que como consecuencia tiene la capacidad de tratar altas cargas orgánicas con altas tasas de conversión. El biogás producido en esta primera etapa es atrapado en los colectores de gas inferiores y es empleado para promover el ascenso del agua residual tratada y el lodo a través la tubería ascendente hacia el tanque desgasificador en el tope del reactor. Aquí, el biogás es finalmente separado y enviado al sistema de manejo de gas. La mezcla de agua tratada y lodo baja directamente al fondo del reactor por la tubería descendente. Esto resulta en la recirculación interna. Mientras mayor sea el DQO alimentado al reactor, mayor será la recirculación interna, por lo que el DQO biodegradable en el fondo del reactor se mantiene prácticamente constante. El efluente de la primera etapa es pulido en la segunda, donde el DQO remanente es removido. El biogás producido en la segunda etapa es atrapado por los colectores superiores, mientras que el efluente tratado abandona el reactor por rebose. Mediante la remoción del biogás generado en la primera etapa, la turbulencia es minimizada en la segunda etapa. De esta forma se logra una eficiente separación de los gránulos de lodo en el colector de gas del tope del reactor. El pulimento es luego alcanzado eficazmente por la relativamente baja velocidad del líquido, y comportamiento de flujo pistón en la segunda etapa.

- Cultivos Fijos: Los dos procesos *anaerobios de cultivo fijo* más comúnmente empleados para el tratamiento de residuos orgánicos carbonosos son el filtro anaerobio y el proceso de lecho expandido.

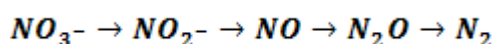
- *Proceso del filtro anaerobio*: El filtro anaerobio es una columna rellena de diversos tipos de medios sólidos que se utiliza para el tratamiento de la materia orgánica carbonosa contenida en el agua residual. El agua a tratar fluye en sentido ascendente, entrando en contacto con el medio sobre el que se desarrollan y fijan las bacterias anaerobias. En consecuencia, el material de relleno está completamente sumergido en el agua residual y por ello no hay aire en absoluto dentro del sistema, por lo que se puede decir que se mantienen las condiciones anaerobias requeridas. Dado que las bacterias están adheridas al medio y no son arrastradas por el efluente, se pueden obtener tiempos medios de retención celular del orden de los cien días. En consecuencia, es posible conseguir grandes valores de THETA<sub>c</sub> (masa de organismos presentes en el reactor dividida por la masa diaria de organismos eliminados del sistema) con bajos tiempos de detención hidráulica. De este modo, el filtro anaerobio se puede emplear para el tratamiento de residuos de baja concentración a temperatura ambiente.

- *Proceso de lecho expandido*: En el proceso de lecho expandido el agua residual a tratar se bombea a través de un lecho de material adecuado (p.e. arena, carbón, conglomerado expandido) en el que se ha desarrollado un cultivo biológico. El efluente se recircula para diluir el agua entrante y para mantener un caudal adecuado que asegure que el medio se halle expandido. Se han llegado a emplear concentraciones de biomasa superiores a 15.000-40.000 mg/l. Debido a las altas concentraciones de biomasa que se

pueden conseguir, el proceso de lecho expandido también se puede emplear para el tratamiento de aguas residuales municipales, con tiempos de detención hidráulica muy pequeños. En el tratamiento de este tipo de residuos, la presencia de sulfatos puede producir la generación de sulfuro de hidrógeno, para cuya captura en la fase de solución se han desarrollado diferentes métodos. Se supone que el uso de este y otros procesos anaerobios de cultivo fijo aumentará con el tiempo, especialmente debido a que la cantidad de fango producido es considerablemente inferior a la que se produce en los procesos aerobios.

### 3.- Anóxico

La eliminación del nitrógeno en forma de nitrato por conversión en nitrógeno gas se puede conseguir biológicamente bajo condiciones «anóxicas» (sin oxígeno). El proceso se conoce con el nombre de desnitrificación. En el pasado, el proceso de conversión se solía identificar como la desnitrificación anaerobia. Sin embargo, las principales vías bioquímicas no son anaerobias, sino modificaciones de las vías aerobias; es por esta razón por la que se ha creído conveniente emplear el término anóxico en lugar de anaerobio. La conversión del nitrógeno, en forma de nitratos, a formas más rápidamente eliminables se puede llevar a cabo gracias a la acción de diversos géneros de bacterias. De entre todas ellas, se pueden destacar: *Achromobacter*, *Acrobacter*, *Alcaligenes*, *Bacillus*, *Brevibacterium*, *Flavobacterium*, *Lactobacillus*, *Micrococcus*, *Proteus*, *Pseudomonas* y *Spirillum*. Estas bacterias son heterótrofas capaces de la reducción disimilatoria del nitrato, que es un proceso de dos etapas. El primer paso consiste en la conversión de nitrato en nitrito, y a continuación se producen óxido nítrico, óxido nitroso y nitrógeno gas. Las reacciones de reducción del nitrógeno son las siguientes:



Los tres últimos compuestos son gaseosos, y se pueden liberar a la atmósfera. En los sistemas de desnitrificación, el parámetro crítico es la concentración de oxígeno disuelto. La presencia de OD suprime el sistema enzimático necesario para el desarrollo del proceso de desnitrificación. La alcalinidad se produce durante la conversión de nitrato en nitrógeno gas, lo cual provoca un aumento del pH. El pH óptimo se sitúa entre 7 y 8, con diferentes valores óptimos que dependen de las diferentes poblaciones bacterianas posibles. La temperatura afecta a la tasa de eliminación del nitrato y a la de crecimiento microbiano. Los organismos son sensibles a los cambios de temperatura.

Los procesos de desnitrificación se pueden clasificar teniendo en cuenta si los cultivos son fijos o en suspensión. La desnitrificación con cultivos en suspensión se suele llevar a cabo en sistemas de fangos activados de flujo en pistón (p.e. a

continuación de cualquier proceso que convierta el amoníaco y el nitrógeno orgánico en nitratos [nitrificación]). La desnitrificación con cultivo fijo (película fija) se lleva a cabo en un reactor en columna que contiene piedras o alguno de los diversos materiales sintéticos sobre los que crecen las bacterias.

#### 4.- Combinados

Proceso de una o varias etapas. Existen procesos que combinan condiciones aerobias, anaerobias y anóxicas (lagunas facultativas, reactores biológicos secuenciales, procesos continuos para eliminación de nutrientes,...).

- Conjuntamente con el nitrógeno: · Proceso PHOREDOX. · Proceso UCT (Universidad de Ciudad del Cabo). - Con o sin eliminación del nitrógeno: · Proceso A/O.

Algunos procesos biológicos empleados para la eliminación simultánea de nutrientes (P y N) son los siguientes:

- *Proceso A/O (Anaerobio-Óxico)*: Se utiliza para llevar a cabo conjuntamente la oxidación de carbono y eliminación de fósforo del agua residual; el conjunto puede funcionar con o sin nitrificación. El proceso A/O es un sistema de cultivo en suspensión de lodo único que combina secuencialmente etapas aerobias y anaerobias. Bajo condiciones anaerobias, el fósforo presente en el agua residual y en la masa celular recirculada se libera en forma de fosfatos solubles. Posteriormente, el fósforo es asimilado por la masa celular de la zona aerobia, de esta manera, el fósforo se separa de la corriente líquida a través de la purga de biosólido activado. La modificación de este proceso para la eliminación de nitrógeno consiste en el cambio de la zona anaerobia por una zona anóxica y la inclusión de un flujo de recirculación interna. El proceso A/O<sub>N</sub> (Anóxico-Óxico) no permite alcanzar la desnitrificación completa y requiere altas tasas de recirculación para alcanzar un grado significativo de eliminación de nitrato.

- *Proceso A<sup>2</sup>/O (Bardenpho 3-etapas)*: Está diseñado para la eliminación de nitrógeno y de fósforo, aunque la desnitrificación completa no es posible. Básicamente, el proceso A<sup>2</sup>/O es una modificación del proceso A/O, ya que añade una zona anóxica entre las zonas anaerobia y aerobia. La zona anóxica se incluye solamente para reducir las cargas de nitrato sobre la zona anaerobia mediante el caudal de recirculación de fangos, lo que afectaría a la eliminación de fósforo.

- *Proceso Bardenpho (Bardenpho 4-etapas)*: En este proceso se alcanza una eliminación completa de nitrógeno mediante el uso de dos zonas de desnitrificación, lo que resulta en TRH muy elevados. Se emplea una zona aerobia final a fin de limitar la desnitrificación y la flotación de fango en el decantador.

El proceso Phoredox es una extensión del proceso anterior para incluir la eliminación de fósforo. Se consiguen altas tasas de desnitrificación, a la vez que se recirculan muy pocos nitratos a la zona anaerobia mediante la recirculación de fangos del decantador.

Por razones de nombre comercial, el Phoredox se llama a veces Bardenpho modificado ó Bardenpho de 5-etapas. Se compone de los 4 reactores de un sistema Bardenpho (anoxia-aerobia-anoxia-aerobia), a los cuales se les añade un quinto reactor anaerobio y además la recirculación principal, en lugar de enviarse al primer reactor anóxico, se conduce a la entrada del reactor anaerobio.

- *Proceso UCT (University of Cape Town)*: El proceso UCT fue desarrollado por la Universidad de Ciudad del Cabo para la eliminación de fósforo. Este proceso incluye tres zonas básicas (anaerobia, anóxica y aerobia) y dos flujos de recirculación interna, por lo que es muy parecido al proceso  $A^2/O$  salvo que los fangos activados de retorno no se recirculan a la zona anaerobia sino a la anóxica. De esta manera se elimina todo oxígeno disuelto y el nitrato contenidos en el flujo de recirculación a la zona anaerobia. La recirculación interna mejora la utilización de la materia orgánica en la etapa anaerobia, proporcionando condiciones óptimas para la fermentación en la fase anaerobia.

El proceso UCT modificado incluye una fase anóxica dividida en dos zonas. La primera recibe la recirculación de los fangos del decantador y proporciona la recirculación a la zona anaerobia. La segunda zona anóxica recibe la recirculación de la zona aerobia, y es donde ocurre la desnitrificación.

- *Proceso VIP (Virginia Initiative Plant)*: Es en esencia idéntico al proceso UCT. Fue desarrollado y patentado por la Hampton Roads Sanitation District (HRSD) en Norfolk, Virginia, Estados Unidos.

Al igual que otros procesos de eliminación biológica de nutrientes, el proceso VIP incluye una secuencia de zonas anaerobia, anóxica y aerobia seguidas de un decantador. Sin embargo, el fango recirculado desde el decantador (RF) se vierte al reactor Anóxico y no directamente a la zona anaerobia, a fin de evitar la entrada de oxígeno a éste último, como ocurre en los procesos  $A^2/O$  o Bardenpho. Por otro lado, el líquido de mezcla nitrificado (Rae) se recircula al reactor anóxico, mientras que el líquido de mezcla desnitrificado (Rax) se recircula a razón de 1Q-2Q desde la zona anóxica hasta el inicio del reactor anaerobio. La recirculación Rae y RF utilizadas se sitúan en los intervalos 1Q-2Q y 0,5Q-1Q, respectivamente, siendo Q el caudal efluente. Esta estrategia operacional tiene como objeto mejorar las condiciones de funcionamiento de la zona anaerobia, reduciendo la aportación de nitratos a la misma, ya que el Rax contiene una concentración de nitratos menor que el RF.



- *Proceso SBR o Reactor discontinuo secuencial (RDS)*: Las siglas del proceso corresponden a sequencing batch reactors, donde se crea una secuencia de condiciones anaerobias seguidas de otras aerobias, en presencia de DBO durante la fase anaerobia. El proceso SBH se puede emplear para conseguir un proceso combinado de oxidación de carbono, reducción de nitrógeno y eliminación de fósforo. La reducción de la presencia de estos constituyentes se puede conseguir con o sin la adición de productos químicos combinando el régimen del reactor. El fósforo se puede eliminar mediante la adición de coagulantes o biológicamente, sin adición de coagulantes. En la fase anaeróbica se produce la liberación de fósforo y consumo de la DBO, mientras que el consumo de fósforo por parte de los microorganismos se producirá en la fase aeróbica situada a continuación. La duración total del ciclo puede variar entre 3 y 24 horas. Para llevar a cabo la desnitrificación, en la fase anóxica es necesario disponer de una fuente de carbono, ya sea de una externa o por la respiración endógena de la biomasa presente.

## 5.- Estanques

Los procesos en estanques o lagunajes son un sistema de tratamiento de aguas que emplea como soporte una laguna o grupo de lagunas construidas artificialmente. Este tipo de sistema se denomina, generalmente, como “Lagunas de estabilización” y se engloba dentro de las tecnologías "blandas" de depuración o de "bajo coste".

El agua residual se somete a un proceso natural de tratamiento, basado en los mismos principios con que transcurre la autodepuración en ríos y lagos. El lagunaje es por tanto un sistema natural de tratamiento de aguas residuales en el que se consigue la estabilización de la materia orgánica, fundamentalmente, mediante la acción de distintos microorganismos. Son sistemas de fácil adaptación al medio integrándose perfectamente en el ambiente rural, campos de golf, etc. Pueden además utilizarse como sistemas reguladores para riego. La biomasa producida es potencialmente aprovechable.

Los parámetros más utilizados para evaluar el comportamiento de las lagunas de estabilización de aguas residuales y la calidad de sus efluentes son la demanda bioquímica de oxígeno (DBO), que caracteriza la carga orgánica, y el número más probable de coliformes fecales (INMP cf/ 100 ml), que caracteriza la contaminación microbiológica. También tiene importancia los sólidos totales, sedimentables, en suspensión y disueltos. Los parámetros antes mencionados son empleados para el diseño de lagunas de estabilización.

Las lagunas de estabilización con una gran relación largo ancho (Largo/Ancho >5) reciben el nombre de Lagunas alargadas. Estas lagunas son muy eficientes en la remoción de carga orgánica y bacterias patógenas, pero deben ser precedidas por dos o más lagunas primarias que retengan los sólidos sedimentables. Estas lagunas primarias evitan tener que sacar de operación a las lagunas alargadas para llevar a cabo la remoción periódica de lodos.



Las lagunas que reciben agua residual cruda son lagunas primarias. Las lagunas que reciben el efluente de una primaria se llaman secundarias; y así sucesivamente las lagunas de estabilización se pueden llamar terciarias, cuaternarias, etc. A las lagunas de grado más allá del segundo también se les suele llamar lagunas de acabado, maduración o pulimento. Siempre se deben construir por lo menos dos lagunas primarias (en paralelo) con objeto de que una se mantenga en operación mientras se hace la limpieza de los lodos de la otra.

Los sistemas de lagunaje se pueden clasificar, en relación con la presencia de oxígeno, en (1) aerobios, (2) de maduración, (3) facultativos, y (4) anaerobios.

- *Estanque de estabilización aerobia*: En su forma más simple, los estanques de estabilización aerobia son grandes depósitos excavados en el terreno, de poca profundidad, que se emplean para el tratamiento del agua residual por medio de procesos naturales que incluyen la utilización de algas y de bacterias.

Un estanque de estabilización aerobia contiene bacterias y algas en suspensión, existiendo condiciones aerobias en toda su profundidad. Existen dos tipos básicos de estanques aerobios. En el primer tipo, el objetivo es maximizar la producción de algas. La profundidad de este tipo de estanques se suele limitar a entre 15 y 50 cm.

En el segundo tipo de estanques, el objetivo es maximizar la cantidad de oxígeno producido, y se emplean profundidades de hasta 1,5 m. En ambos tipos, el oxígeno, además del producido por las algas, penetra en el líquido por la difusión atmosférica. Para optimizar los resultados, es conveniente mezclar periódicamente el contenido de los estanques por medio de bombas o de aireadores de superficie.

- *Estanque de maduración terciarios*: Los estanques de estabilización de baja carga terciarios o de maduración se diseñan para mejorar la calidad de los efluentes secundarios y para la nitrificación estacional. Los mecanismos biológicos involucrados son similares a los de otros procesos aerobios de cultivo en suspensión. Su funcionamiento implica la respiración endógena de los sólidos biológicos residuales y la conversión del amoníaco en nitrato mediante el oxígeno suministrado por reaeración superficial y por la presencia de algas. Se han propuesto tiempos de detención de 18 a 20 días como el mínimo periodo necesario para conseguir la respiración endógena completa de los sólidos residuales. Para mantener las condiciones aerobias, las cargas aplicadas deben ser bastante bajas.

- *Estanque facultativos*: Los estanques en los que la estabilización de las aguas residuales se lleva a cabo mediante una combinación de bacterias facultativas, anaerobias y aerobias, se conocen con el nombre de estanques de estabilización facultativos (aerobios-anaerobios).

En un estanque facultativo existen tres zonas: (1) una zona superficial en la que existen bacterias aerobias y algas en una relación simbiótica, como se ha descrito



anteriormente; (2) una zona inferior anaerobia en la que se descomponen activamente los sólidos acumulados por acción de las bacterias anaerobias, y (3) una zona intermedia, que es parcialmente aerobia y anaerobia, en la que la descomposición de los residuos orgánicos la llevan a cabo las bacterias facultativas.

- *Estanques anaerobios*: Los estanques anaerobios se usan para el tratamiento de agua residual de alto contenido orgánico que también contenga una alta concentración de sólidos. Generalmente, un estanque anaerobio es un estanque profundo excavado en el terreno, dotado de un sistema de conducciones de entrada y de salida adecuados. Para conservar la energía calorífica y mantener las condiciones anaerobias, se han construido estanques de profundidades de hasta 9,1 metros. Los residuos a tratar en el estanque sedimentan en el fondo del mismo, y el efluente parcialmente clarificado se vierte, normalmente, a otro proceso posterior.

Generalmente, estos estanques son anaerobios en toda su profundidad, excepto en una estrecha franja cercana a la superficie. La estabilización se consigue por medio de una combinación de precipitación y de conversión anaerobia de los residuos orgánicos en  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$ , otros productos gaseosos finales, ácidos orgánicos y tejido celular. Normalmente, es fácil conseguir, de forma continua, rendimientos de eliminación de la  $\text{DBO}_5$  superiores al 70 por 100. En condiciones óptimas de funcionamiento, es posible conseguir eficacias de eliminación de hasta el 85 por 100.

### 3.3. Niveles de tratamiento

Las aguas contaminadas se pueden someter a diferentes niveles o etapas de tratamiento, dependiendo del grado de purificación que se quiera. Es tradicional hablar de tratamiento primario, secundario, etc., aunque muchas veces la separación entre ellos no es totalmente clara.

Recordemos que algunos autores llaman a las etapas preliminar y primaria unidas como etapa primaria, y que normalmente en la etapa terciaria se engloba el pulido y/o desinfección. Así se pueden distinguir:

#### 1.- Pretratamiento

En el pretratamiento se eliminan los sólidos de mayor tamaño que pueden atascar o dañar la instalación posterior así como las gravas y arenas. Esta etapa debe cumplir dos funciones: (1).- Medir y regular el caudal de agua que ingresa a la planta, (2).- Extraer los sólidos flotantes grandes y la arena (a veces, también la grasa).

Normalmente las plantas están diseñadas para tratar un volumen de agua constante, lo cual debe adaptarse a que el agua servida producida por una comunidad no



es constante. Hay horas, generalmente durante el día, en las que el volumen de agua producida es mayor, por lo que deben instalarse sistemas de regulación de forma que el caudal que ingrese al sistema de tratamiento sea uniforme.

Asimismo, para que el proceso pueda efectuarse normalmente, es necesario filtrar el agua para retirar de ella sólidos y grasas. Las estructuras encargadas de esta función son las *rejillas*, *tamices*, *trituradores* (a veces), desgrasadores y desarenadores. En esta etapa también se puede realizar la preaireación, cuyas funciones son: a) Eliminar los *compuestos volátiles* presentes en el agua servida, que se caracterizan por ser malolientes, y b) Aumentar el contenido de oxígeno del agua, lo que ayuda a la disminución de la producción de malos olores en las etapas siguientes del proceso de tratamiento.

## 2.- Tratamiento primario o tratamiento físico-químico

Tiene como objetivo la eliminación, por medios físicos o físico-químicos, de los sólidos en suspensión no eliminados en el pretratamiento. En algunos casos dejando, simplemente, las aguas residuales un tiempo en grandes tanques (sedimentación simple por gravedad) o, en el caso de los tratamientos primarios mejorados, añadiendo al agua contenida en estos grandes tanques, sustancias químicas quelantes (coagulantes y floculantes) que hacen más rápida y eficaz la sedimentación. Así, para completar este proceso se pueden agregar compuestos químicos (sales de hierro, aluminio y polielectrolitos floculantes) con el objeto de precipitar el fósforo, los sólidos en suspensión muy finos o aquellos en estado de coloide.

Las estructuras encargadas de esta función son los *estanques de sedimentación primarios* o *clarificadores primarios*. Habitualmente están diseñados para suprimir aquellas partículas que tienen *tasas de sedimentación* de 0,3 a 0,7 mm/s. Asimismo, el *período de retención* es normalmente corto, 1 a 2 h. Con estos parámetros, la profundidad del estanque fluctúa entre 2 a 5 m.

En esta etapa se elimina por precipitación alrededor del 60 al 70% de los sólidos en suspensión. En la mayoría de las plantas existen varios sedimentadores primarios y su forma puede ser circular, cuadrada a rectangular.

La precipitación o sedimentación por medio de diversos tipos de oxidación química es poco utilizada en la práctica, salvo aplicaciones especiales, por su alto coste.

También se incluyen en estos tratamientos la neutralización del pH y la eliminación de contaminantes volátiles como el amoníaco (desorción). Las operaciones que incluye son el desaceitado y desengrase, la sedimentación primaria, la filtración, neutralización y la desorción (stripping).

### 3.- Tratamiento secundario o tratamiento biológico

Tiene como objetivo eliminar la materia orgánica en disolución y en estado coloidal mediante un proceso de oxidación de naturaleza biológica seguido de sedimentación, la cual es costosa de eliminar por tratamientos físico-químicos. Este proceso biológico es un *proceso natural controlado* en el cual participan los microorganismos presentes en el agua residual, y que se desarrollan en un reactor o cuba de aireación, más los que se desarrollan, en menor medida en el decantador secundario. Estos microorganismos, principalmente bacterias, se alimentan de los sólidos en suspensión y estado coloidal produciendo en su degradación en anhídrido carbónico y agua, originándose una biomasa bacteriana que precipita en el *decantador secundario*. Así, el agua queda limpia a cambio de producirse unos fangos para los que hay que buscar un medio de eliminarlos.

En el decantador secundario, hay un flujo tranquilo de agua, de forma que la biomasa, es decir, los flóculos bacterianos producidos en el reactor, sedimentan. El sedimento que se produce y que, como se dijo, está formado fundamentalmente por bacterias, se denomina fango activo.

Los microorganismos del reactor aireado pueden estar en suspensión en el agua (*procesos de crecimiento suspendido* o fangos activados), adheridos a un medio de suspensión (*procesos de crecimiento adherido*) o distribuidos en un sistema mixto (*procesos de crecimiento mixto*).

Las estructuras usadas para el tratamiento secundario incluyen *filtros de arena intermitentes, filtros percoladores, contactores biológicos rotatorios, lechos fluidizados, estanques de fangos activos, lagunas de estabilización u oxidación y sistemas de digestión de fangos*.

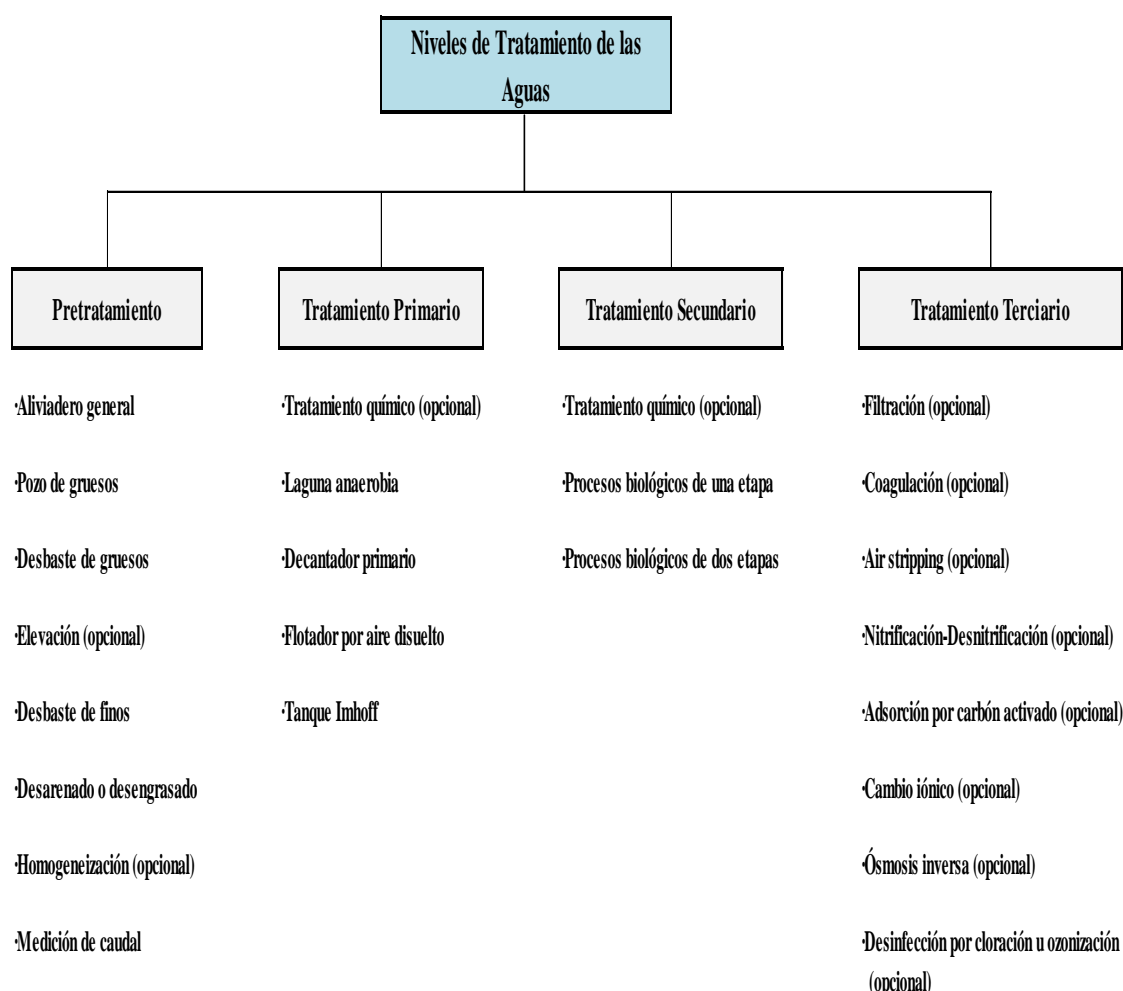
### 4.- Tratamiento terciario, de carácter físico-químico o biológico

El efluente de un tratamiento secundario puede estar todavía insuficientemente depurado para determinados usos, siendo precisa una serie de procesos que se agrupan bajo el nombre de tratamiento terciario. Este se lleva a cabo para eliminar fundamentalmente la materia orgánica que no ha sido retenida en el tratamiento biológico, o bien que no es biodegradable, y las sales inorgánicas disueltas, entre las que destacan el nitrógeno y el fósforo, que son dos de los máximos responsables de la eutrofización de los cursos y depósitos de agua.

Consisten en procesos biológicos, físicos y químicos especiales con los que se consigue limpiar las aguas de contaminantes concretos: fósforo, nitrógeno, minerales, metales pesados, virus, compuestos orgánicos, etc. Más de un proceso terciario del tratamiento puede ser usado en una planta de tratamiento. Si la desinfección se practica siempre en el proceso final, es llamada pulir el efluente.

Desde el punto de vista conceptual no aplica técnicas diferentes que los tratamientos primarios o secundarios, sino que utiliza técnicas de ambos tipos destinadas a pulir o afinar el vertido final, mejorando alguna de sus características. Si se emplea intensivamente pueden lograr hacer el agua de nuevo apta para el abastecimiento de necesidades agrícolas, industriales, e incluso para potabilización (reciclaje de efluentes).

Es un tipo de tratamiento más caro que los anteriores y se usa en casos más especiales: para purificar desechos de algunas industrias, especialmente en los países más desarrollados, o en las zonas con escasez de agua que necesitan purificarla para volverla a usar como potable, en las zonas declaradas sensibles (con peligro de eutrofización) en las que los vertidos deben ser bajos en nitrógeno y fósforo, etc.



Los componentes de este tratamiento son los expresados en la figura, son todos de carácter opcional y van en función del tipo de contaminante que se desee eliminar para los cuales tenemos: filtración, coagulación, air stripping, nitrificación-desnitrificación, absorción por carbón, cambio iónico, ósmosis inversa y desinfección por cloración u ozonización.



Actualmente la distinción entre tratamiento primario, secundario y terciario resulta bastante arbitraria dado que muchos métodos modernos de tratamiento incluyen procesos físicos, químicos y biológicos en la misma operación.

### 3.4. Tratamiento de los fangos

Los sedimentos que se generan en las etapas primaria y secundaria se denominan fangos. Estos fangos contienen gran cantidad de agua (99%), microorganismos patógenos y contaminantes orgánicos e inorgánicos que requieren un tratamiento específico, estando compuesto, generalmente, por los siguientes procesos:

#### 1.- Espesamiento previo

Antes de proceder a la eliminación, o estabilización de los lodos que se han separado del agua residual es conveniente (rentable) proceder al espesamiento de los lodos; lo que permite reducir al mínimo el volumen para facilitar su manejo, transporte y almacenamiento.

El *acondicionamiento químico* se puede aplicar tanto a los fangos crudos como digeridos e incluye la aplicación de coagulantes tales como el sulfato de aluminio, el cloruro férrico y los polímeros, los que tienen como función ayudar a la sedimentación de las materias en suspensión y solución en el fango.

#### 2.- Estabilización o digestión

Tiene por objeto degradar la materia orgánica presente en los fangos y puede llevarse a cabo por vía anaerobia o aerobia.

La *digestión anaerobia* se realiza en un estanque cerrado llamado digestor y no requiere la presencia de oxígeno pues es realizada por bacterias que se desarrollan en su ausencia. El proceso puede ser la digestión termofílica, en la cual el fango se fermenta en tanques en una temperatura de 55 °C, o mesofílica, en una temperatura alrededor de 36 °C. Las bacterias anaerobias degradan la materia orgánica presente en el agua servida, en una primera fase, a ácido propiónico, ácido acético y otros compuestos intermedios, para posteriormente dar como producto final metano (60 - 70 %), anhídrido carbónico (30%) y trazas de amoníaco, nitrógeno, anhídrido sulfuroso e hidrógeno. El metano y el anhídrido carbónico son inodoros; en cambio, el ácido propiónico tiene olor a queso rancio y el ácido acético tiene un olor a vinagre. La generación del metano es una ventaja dominante del proceso anaeróbico. Su desventaja dominante es la del largo plazo requerido para el proceso (hasta 30 días) y el alto costo de capital.



La *digestión aerobia* se realiza en un estanque abierto y requiere la presencia de oxígeno y, por tanto, la inyección de aire u oxígeno. En este caso la digestión de la materia orgánica es efectuada por bacterias aerobias, las que realizan su actividad a temperatura ambiente. Porque ocurre la digestión aeróbica mucho más rápidamente, los costos de capital de digestión aerobia son más bajos. Sin embargo, los gastos de explotación son característicos por ser mucho mayores para la digestión aeróbica, debido a los costes energéticos en la aireación necesaria para agregar el oxígeno al proceso. El producto final de esta digestión es anhídrido carbónico y agua. No se produce metano. Este proceso bien efectuado no produce olores.

El *compostaje* o *abonamiento* es también un proceso aeróbico que implica el mezclar los sólidos de las aguas residuales con fuentes del carbón tales como aserrín, paja o virutas de madera. En presencia del oxígeno, las bacterias digieren los sólidos de las aguas residuales y la fuente agregada del carbón y, al hacer eso, producen una cantidad grande de calor. Los procesos anaerobios y aerobios de la digestión pueden dar lugar a la destrucción de microorganismos y de parásitos causantes de enfermedades a un suficiente nivel para permitir que los sólidos digeridos que resultan sean aplicados con seguridad a la tierra usada como material de la enmienda del suelo (con las ventajas similares a la turba) o usada para la agricultura como fertilizante a condición de que los niveles de componentes tóxicos son suficientemente bajos.

La elección de un método de tratamiento de sólidos de las aguas residuales depende de la cantidad de sólidos generados y de otras condiciones específicas del lugar. Sin embargo, generalmente el compostaje es lo más aplicado a los usos en pequeña escala seguido por la digestión aerobia, y la digestión anaerobia lo más utilizado para grandes escalas.

Por otra parte, también es posible la utilización de *tratamientos físicos* que incluyen el tratamiento por calor y el congelamiento de los fangos.

La *depolimerización termal* utiliza pirólisis acuosa para reducir y convertir a los organismos complejos en aceite. El hidrógeno en el agua se inserta entre los vínculos químicos en polímeros naturales tales como grasas, las proteínas y la celulosa. El oxígeno del agua combina con el carbón, el hidrógeno y los metales. El resultado es aceite, gases combustibles de la luz tales como metano, propano y butano, agua con las sales solubles, bióxido de carbono, y un residuo pequeño del material insoluble inerte que se asemeja a la roca y al carbón pulverizado. Se destruyen todos los organismos y muchas toxinas orgánicas. Las sales inorgánicas tales como nitratos y fosfatos siguen estando en el agua después del tratamiento en los niveles suficientemente altos que el tratamiento adicional requiere.

La energía de descomprimir el material se recupera, utilizando los gases combustibles ligeros para obtener el calor y la presión necesarios en el proceso. El





aceite se trata generalmente para conseguir un grado ligero útil refinado, tal como algunos diesel y aceites de calefacción, y después se vende.

La *estabilización química*: es aquella que se realiza por la adición a los lodos de productos químicos que los inactivan generalmente se usa cal que aumenta el pH, lo que dificulta la acción biológica de los lodos; favoreciéndose la liberación de amoníaco (le quita valor fertilizante al lodo).

### 3.- Secado

Una vez concluida la etapa de digestión microbiana, ya sea aerobia o anaerobia, los fangos aún contienen mucha agua (alrededor de un 90%). La eliminación de agua de los lodos se consigue mediante espesado, deshidratación y secado.

Para eliminar el agua libre e intersticial es suficiente con el proceso de espesado. Para la separación del agua capilar y de adhesión es necesario una deshidratación donde se precisan fuerzas mecánicas en centrifugas y filtros. Cuando se desea eliminar el agua de adsorción y de constitución se requieren energía térmica. La elección del método más adecuado dependerá del contenido en materia seca deseada en el lodo final, el costo del método y características del lodo.

Para la deshidratación de los fangos se han diseñado dos métodos principales: *secado por aire y secado mecánico*.

Se han hecho diversas estructuras para el secado por aire de los fangos. Entre ellas están: *lechos de arena, lechos asistidos de arena, lagunas de fangos, lechos adoquinados y eras de secado*.

Para el secado mecánico existen *filtros banda, filtros prensa, filtros de vacío y centrífugas*.

### 4.- Desinfección

Es el proceso mediante el cual se trata de eliminar una gran cantidad de organismos patógenos presentes en los lodos y que pueden suponer un riesgo sanitario en su utilización.

En la actualidad no es un proceso generalizado, pero países como Suiza y Alemania ya contemplan en su legislación normas sobre desinfección de lodos con fines agrícolas.

Los métodos que se utilizan son la pasteurización que somete a los lodos a temperaturas de 70°C y durante 30 minutos, el compostaje y la estabilización



termofílica aerobia o anaerobia que provoca temperaturas de 60°C y un pH de 8 durante 48 horas o 24 horas si el pH es diferente.

## **5.- Eliminación**

Los fangos deshidratados deben disponerse en una forma ambientalmente segura. Existen varias posibilidades de eliminación de fangos: descarga en vertedero, incineración, aplicación en la agricultura u otros usos. La aplicación en terrenos agrícolas requiere que el fango no presente sustancias tóxicas para las plantas, animales y seres humanos. Lo habitual es que sí las contengan por lo que lo normal es que sean dispuestos en rellenos sanitarios o incinerados; aunque las emisiones de agentes contaminantes del aire producidas en la incineración, junto con el alto coste de combustible suplementario, hacen poco atractivo este último proceso y por tanto menos utilizado.

## **4. PURIFICACIÓN Y TRATAMIENTO PARA AGUAS NATURALES Y RESIDUALES**

### **4.1. Introducción**

Hace tres décadas atrás, lo determinante en relación al recurso hídrico era su disponibilidad y demanda. Ahora, junto a dichas consideraciones, pesan los aspectos cualitativos.

Con notables excepciones, las fuentes de agua requieren algún tipo de tratamiento antes de su distribución y utilización. Por una parte el agua tiene siempre contaminantes naturales que provienen de la erosión de la tierra, de la disolución de los minerales y de la degradación de los vegetales. Además, hay que tener presente que la actividad humana a través de la agricultura, la industria y los usos domésticos aportan al agua una cantidad y una diversidad de contaminantes muy elevada.

Para uso humano, previamente debemos purificarla. Con la purificación se eliminan las sustancias extrañas que posea, según el uso que se le vaya a dar, por ejemplo: para algunos usos industriales y medicinales el agua debe ser químicamente pura, o sea, que sólo posea hidrógeno y oxígeno en la proporción  $H_2O$ , pero para el consumo humano ha de ser potable.

La palabra “potable” procede del latín potus (bebida) y de potabilis (bebible). Por eso, decimos que el agua es “potable” cuando es “bebible”, es decir, que puede ser consumida por personas y animales sin riesgo para su salud.



Es considerada agua potable, o más precisamente agua apta para el consumo humano, toda agua, natural o producida por un tratamiento de potabilización que cumpla con las Normas de calidad establecidas para tal fin. Estas Normas se basan en estudios toxicológicos y epidemiológicos, así como en consideraciones estéticas.

Los requisitos de calidad requeridos para el agua para consumo humano son los más exigentes y por ello requiere la aplicación de procedimientos de potabilización que imputan costes nada despreciables. Los márgenes de los componentes permitidos para destino a consumo humano, vienen definidos en los "criterios de potabilidad" y regulados en la legislación. Así, por ejemplo, en la Unión Europea la normativa 98/83/EU establece valores máximos y mínimos para el contenido en minerales, diferentes iones como cloruros, nitratos, nitritos, amonio, calcio, magnesio, fosfato, arsénico, etc., además de los gérmenes patógenos. El pH del agua potable debe estar entre 6,5 y 8,5.

Los requerimientos de potabilidad del agua varían dependiendo del país, cultura, nivel de vida de los ciudadanos, etc., pero existen estándares promedios como sería que:

- a.- Posea menos de 10 bacterias intestinales por litro.
- b.- No contenga impurezas químicas.
- c.- No presente sabor, olor ni color o turbiedad objetables.
- d.- No provenga de manantiales sujetos a contaminación por aguas negras.

Las causas de la no potabilidad del agua son:

- Bacterias y virus.
- Minerales (en formas de partículas o disueltos) y productos tóxicos.
- Partículas en suspensión.

Ante la dificultad de disponer de agua potable para consumo humano en muchos lugares del planeta, se ha consolidado un concepto intermedio, el agua segura como el agua que no contiene bacterias peligrosas, metales tóxicos disueltos, o productos químicos dañinos a la salud, y es por lo tanto considerada segura para beber, por tanto se emplea cuando el suministro de agua potable está comprometido. Es un agua que no resulta perjudicial para el ser humano, aunque no reúna las condiciones ideales para su consumo.

La ley europea protege *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* y por ello no puede contener ningún tipo de microorganismo, parásito o sustancia, en una cantidad o concentración que pueda suponer un peligro para la salud humana. Así debe estar totalmente exenta de las bacterias *Escherichia coli* y *Enterococcus*, limita por litro de agua tener menos de 50 miligramos de nitratos, menos de 2 miligramos de cobre y otras sustancias químicas.



Por otra parte, la creciente sensibilidad ambiental ha hecho que se establezcan normas de calidad de vertido cada vez más restrictivas, con lo que ello representa un aumento de los gastos de depuración de las aguas residuales. Puede entenderse así que se llegue al caso en que la reutilización de agua residual tratada, comporte unos gastos inferiores a los de la depuración intensa que se exige para el vertido de efluentes en zonas sensibles dedicadas al turismo, la acuicultura o a la protección ambiental.

Como se ha visto, hay pues una contaminación natural, pero al tiempo puede existir otra muy notable de procedencia humana, por actividades agrícolas, ganaderas o industriales, que hace sobrepasar la capacidad de autodepuración de la naturaleza.

Al ser recurso imprescindible para la vida humana y para el desarrollo socioeconómico, industrial y agrícola, una contaminación a partir de cierto nivel cuantitativo o cualitativo, puede plantear un problema de Salud Pública.

En resumen, debido a que las mayores exigencias en lo referente a la calidad del agua se centran en su aplicación para el consumo humano y animal estos se organizan con frecuencia en tratamientos de potabilización y tratamientos de depuración de aguas residuales, aunque ambos comparten muchas operaciones.

Hoy en día, hay dos tipos de estaciones de tratamientos de aguas: las potabilizadoras o estaciones de tratamiento de agua potable (ETAP) que acondicionan las aguas brutas para que sean aptas para el consumo humano y, las depuradoras o estaciones depuradoras de aguas residuales (EDAR) que tratan las aguas residuales urbanas e industriales.

En general, los procesos de pretratamiento son muy parecidos en las ETAP y en las EDAR. Se produce una captación del agua y a continuación un tamizado para eliminar lo gruesos. Una vez que se han eliminado los gruesos, hay que eliminar las partículas más finas, la materia orgánica si la hubiera así como los contaminantes específicos que lleve cada agua a tratar. Por ello, no solo hay diferencias en los procesos del tratamiento de una ETAP y una EDAR, sino que las propias potabilizadoras o depuradoras pueden ser diferentes entre ellas.

## **4.2. Purificación de aguas de consumo**

Habitualmente el agua potable es captada de manantiales, o extraída del suelo mediante túneles artificiales o pozos de un acuífero. Otras fuentes de agua son el agua lluvia, los ríos y los lagos. No obstante, el agua debe ser tratada para el consumo humano, y puede ser necesaria la extracción de sustancias disueltas, de sustancias sin disolver y de microorganismos perjudiciales para la salud.



Es imposible consumir agua contaminada, de allí la importancia de las Estaciones de tratamiento de agua potable (ETAP), las cuales se definen como las instalaciones en las cuales se lleva a cabo un proceso que se rige por operaciones unitarias, y cuyo objetivo es el de potabilizar el agua, es decir, hacerla apta para el consumo humano, ejerciendo un control sanitario continuo para optimizar su calidad, realizado a través de los Laboratorios Físico-Químicos, Bacteriológicos y controles en la Red.

Los tratamientos a los que habrá que someter un agua vendrán directamente determinados por la calidad de ésta en origen, generalmente será preciso combinar varios tratamientos elementales, cuyas bases pueden ser físicas, químicas o biológicas y cuyo efecto es eliminar en primer lugar las materias en suspensión, a continuación las sustancias coloidales, y después las sustancias disueltas. Por último en algún caso puede ser necesario corregir ciertas características.

**CLASIFICACION DE LAS FUENTES DE ABASTECIMIENTO EN FUNCION DE LAS CARACTERÍSTICAS DE LAS AGUAS CRUDAS Y DE SUMINISTRO DOMESTICO**

INDICADORES DE CALIDAD	FUENTES DE ABASTECIMIENTO DE AGUA		
	Excelente	Buena	Pobre
	Solo requiere desinfección como tratamiento	Solo requiere filtración y desinfección como tratamiento	Requiere tratamiento especial o adicional y desinfección.
<b>DBO: mg/L</b>			
<b>Promedio mensual</b>	0.75 – 1.5	1.5 – 2.5	> 2.5
<b>Máx. diario, o muestra</b>	1.0 – 3.0	3.0 – 4.0	> 4.0
<b>Coliformes:</b>			
<b>NMP/100 ml Prom. mensual</b>	50 – 100	50 – 5000	> 5000
<b>Máx. diario, o muestra</b>	< 5 % sobre 100	< 20 % sobre 5000	< 5 % sobre 20000
<b>OD:</b>			
<b>Promedio mg/L</b>	4.0 – 7.5	4.0 – 6.5	4.0
<b>% de Saturación</b>	> 75	> 60	--
<b>pH Promedio</b>	6.0 – 8.5	5.0 – 9.0	3.8 – 10.5
<b>Cloruros: mg/L máx.</b>	< 50	50 – 250	> 250
<b>Fluoruros: mg/L</b>	<1.5	1.5 – 3.0	> 3.0
<b>Fenoles: mg/L</b>	0	0.005	> 0.005
<b>Color: Unidades</b>	0 – 20	20 – 150	> 150
<b>Sólidos sedimentables: ml/L</b>	0.0	0.0	0.1
<b>Sólidos suspendidos: mg/L</b>	0.0	5.0	20
<b>Turbiedad: Unidades</b>	0 – 10	10 – 250	> 250
<b>Olor</b>	Inolora	Aceptable	Tolerable
<b>Sabor</b>	Agradable	Aceptable	Tolerable



La calidad de los cuerpos de abastecimiento de agua cruda para abastecimiento tienen una variación marcada de una fuente a otra; por ello, el tipo de tratamiento requerido es diferente para producir agua potable. El diseño de una planta de tratamiento eficiente y económica requiere de un estudio de ingeniería cuidadoso basado en la calidad de la fuente, selección apropiada de los procesos y operaciones de tratamiento más adecuados y económicos para producir agua de calidad certificada.

No existe una norma que permita definir el tipo de planta requerido para tratar un agua, por ello, es necesario elaborar estudios de tratabilidad aplicando criterios generales de tratamiento de aguas crudas según la calidad de las fuentes de abastecimiento.

Las instalaciones de potabilización generalmente incluyen los siguientes procesos o tratamientos:

#### Tratamientos generales de potabilización (convencionales)

<p>• <i>Pretratamientos:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Desbaste</li> <li>- Pre-decantación</li> <li>- Desarenado</li> <li>- Desengrasado</li> </ul>	<p>• <i>Procesos físico-químicos:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Precloración</li> <li>- Aireación</li> <li>- Coagulación – Floculación</li> <li>- Decantación</li> <li>- Flotación</li> <li>- Filtración</li> <li>- Desinfección</li> </ul>	<p>• <i>Tratamiento de los fangos:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Espesado</li> <li>- Deshidratación</li> </ul>
--	--	---

#### Tratamientos específicos de potabilización

<p>• <i>Eliminación de materias disueltas:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Separación por membranas: <ul style="list-style-type: none"> <li>- Microfiltración</li> <li>- Ósmosis inversa</li> <li>- Nanofiltración</li> <li>- Ultrafiltración</li> <li>- Electrodialísis</li> </ul> </li> <li>- Adsorción</li> <li>- Intercambio iónico: <ul style="list-style-type: none"> <li>- Desendurecimiento</li> <li>- Descarbonatación</li> <li>- Desmineralización total</li> </ul> </li> </ul>	<p>• <i>Acciones químicas:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Oxidación – Reducción</li> <li>- Ozonización</li> <li>- Precipitación</li> <li>- Neutralización</li> <li>- Inhibición de Incrustaciones</li> <li>- Fluoruración</li> </ul>	<p>• <i>Procesos biológicos:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Nitrificación</li> <li>- Oxidación de hierro y manganeso</li> </ul>
--	--	---

El agua que se hierve y cuyo vapor puede recuperarse por condensación es un medio para conseguir agua pura (sin productos tóxicos, sin bacterias o virus, sin depósitos o partículas). En la práctica, fuera del laboratorio, el resultado no es seguro. El



agua obtenida por este medio se denomina agua destilada, y aunque no contiene impurezas, tampoco contiene sales y minerales esenciales para la vida, que el agua potable debe contener en determinadas cantidades. Por esto, no se la considera técnicamente potable (sana para el consumo humano), pues su consumo permanente le quitaría al cuerpo humano esos nutrientes.

Pese a que las características naturales de determinadas aguas destinadas al consumo humano sean las idóneas, dado su importante papel como mecanismo de transmisión de importantes agentes microbianos que desencadenan enfermedades en el hombre, "en todo caso se exige", que el agua destinada a consumo humano, antes de su distribución, sea sometida a tratamiento de "*Desinfección*" como mínimo.

Las plantas de tratamiento de agua se pueden clasificar, de acuerdo con el tipo de procesos que las conforman, en plantas de filtración rápida y plantas de filtración lenta.

También se pueden clasificar, de acuerdo con la tecnología usada en el proyecto, en plantas convencionales antiguas, plantas convencionales de tecnología apropiada y plantas de tecnología importada o de patente.

Por lo tanto, podemos considerar diversos tipos de Estaciones de tratamiento de agua potable:

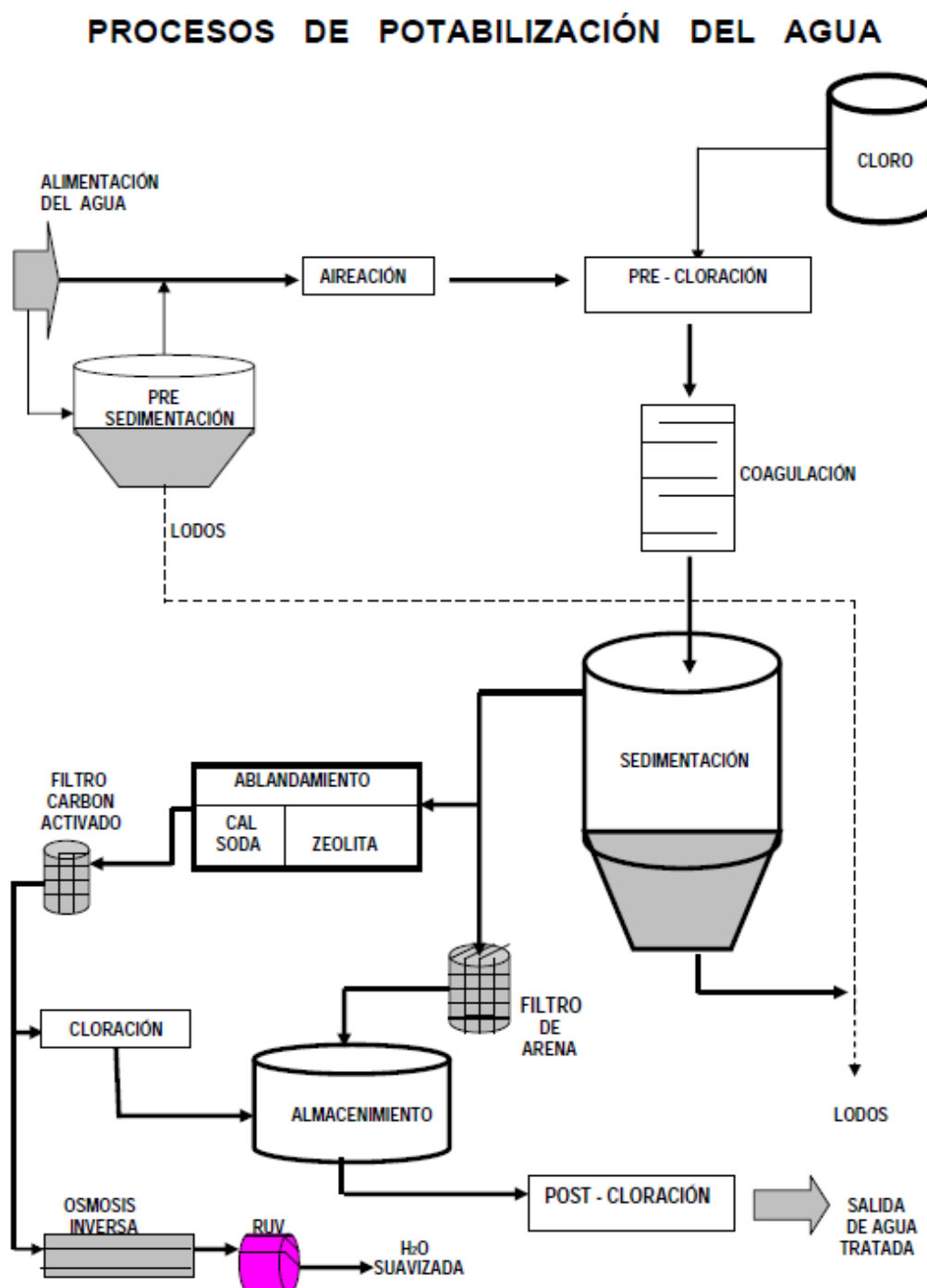
- ETAP de tecnología convencional: incluye los procesos de coagulación, floculación, decantación (o sedimentación) y filtración.
- ETAP de filtración directa: incluye los procesos de coagulación-decantación y filtración rápida, y se puede incluir el proceso de floculación.
- ETAP de filtración en múltiples etapas (FIME): incluye los procesos de filtración gruesa dinámica, filtración gruesa ascendente y filtración lenta en arena.

También puede utilizarse una combinación de tecnologías, y en cada una de las tecnologías nombradas es posible contar con otros procesos que pueden ser necesarios específicamente para remover determinada contaminación.

En resumen, la selección del sistema de potabilización a emplear tiene directa relación con la calidad del agua cruda, los requisitos a cumplir para la calidad del agua de consumo y las condiciones que aseguren la sostenibilidad del sistema y su eficiencia a través del tiempo.

La alternativa a elegir debe ser aquélla de menor costo a valor presente, que surja de la comparación con otras que produzcan beneficios sanitarios equivalentes y que sean compatibles con los objetivos de calidad y sostenibilidad mencionados.

El siguiente diagrama en bloques, típico de un proceso de potabilización de agua, indica las distintas secuencias y alternativas posibles.



Y el esquema descriptivo de funcionamiento de una Estación de tratamiento de agua potable (ETAP) podría ser el siguiente:

1.- *Toma del río.* Punto de captación de las aguas; *Reja.* Impide la penetración de elementos de gran tamaño (ramas, troncos, peces, etc.).





2.- *Desarenador*. Sedimenta arenas que van suspendidas para evitar dañar las bombas.

3.- *Bombeo de baja (Bombas también llamadas de baja presión)*. Toman el agua directamente de un río, lago o embalse, enviando el agua cruda a la cámara de mezcla.

4.- *Camara de mezcla*. Donde se agrega al agua productos químicos. Los principales son los coagulantes (sulfato de alúmina), alcalinizantes (cal).

5.- *Decantador*. El agua llega velozmente a una pileta muy amplia donde se reposa, permitiendo que se depositen las impurezas en el fondo. Para acelerar esta operación, se le agrega al agua coagulantes que atrapan las impurezas formando pesados coágulos. El agua sale muy clarificada y junto con la suciedad quedan gran parte de las bacterias que contenía.

6.- *Filtro*. El agua decantada llega hasta un filtro donde pasa a través de sucesivas capas de arena de distinto grosor. Sale prácticamente potable.

7.- *Desinfección*. Para asegurar aún más la potabilidad del agua, se le agrega cloro que elimina el exceso de bacterias y lo que es muy importante, su desarrollo en el recorrido hasta las viviendas.

8.- *Depósito*. Desde donde se distribuye a toda la ciudad.

9.- *Bombeo de alta*. Toma el agua del depósito de la ciudad.

10.- *Control final*. Antes de llegar al consumo, el agua es severamente controlada por químicos expertos, que analizan muestras tomadas en distintos lugares del sistema.

### 4.3. Tratamiento de aguas residuales

La mayoría de los vertidos de aguas residuales que se hacen en el mundo no son tratados. Simplemente se descargan en el río, mar o lago más cercano y se deja que los sistemas naturales, con mayor o menor eficacia y riesgo, degraden los desechos de forma natural.

En los países desarrollados una proporción, cada vez mayor, de los vertidos es tratada antes de que lleguen a los ríos o mares en EDAR (estaciones depuradoras de aguas residuales).



El objetivo de estos tratamientos es, en general, reducir la carga de contaminantes del vertido y convertirlo en inocuo para el medio ambiente. Destacando entre los principales objetivos del tratamiento de las aguas residuales los siguientes:

- Remoción de sólidos suspendidos y materia flotante
- Estabilización de material orgánico biodegradable
- Eliminación de partículas disueltas
- Eliminación de organismos patógenos

Para cumplir estos fines se usan distintos tipos de tratamiento dependiendo de los contaminantes que arrastre el agua y de otros factores más generales, como localización de la planta depuradora, clima, ecosistemas afectados, etc.

Las alternativas técnicas de EDAR son muy amplias. Desde el tipo base de tratamiento de las aguas (físico químico, biológico o mixto), las fases de tratamiento (primario, secundario o terciario), la gestión de los lodos de la planta (vertedero, compostaje, térmico); y todas esas posibilidades combinadas con cuestiones tipológicas de mayor detalle: el tipo de tratamiento secundario. También tiene que considerarse el tipo de vertido, directo o indirecto, etc....

Es importante seleccionar las operaciones y procesos unitarios que integran los sistemas de tratamiento, para garantizar que el agua tratada tenga una calidad aceptable. Ya que desde el punto de vista técnico es necesario basarse en dos consideraciones:

- La transformación en la calidad del agua mediante un proceso, ya que combinando varios de ellos la condición es limitada en mayor grado.
- La calidad de las aguas crudas, es muy variable debido a que depende de factores externos como: uso, origen, conducción, grado de depuración y contaminación del agua etc.

Es decir, en función de las características de las aguas residuales objeto de tratamiento y de los límites exigidos según la normativa existente deberán diseñarse las instalaciones de depuración, analizando las diferentes alternativas posibles en cada caso en función de consideraciones como costes de inversión y explotación, superficie requerida y otros aspectos de tipo local.

El diseño del sistema real de tratamiento para una EDAR incluye la selección de una cadena de procesos o cadenas de procesos alternativos basados en la capacidad de los procesos unitarios de tratamiento para remover componentes residuales específicos. El cuadro siguiente brinda un resumen de los principales procesos unitarios de tratamiento, incluidos sus respectivas funciones y tipo de tratamiento (físico, químico, biológico) y señala la etapa de tratamiento durante la cual pueden usarse.



## Resumen de los procesos unitarios de tratamiento de aguas residuales

Nombre/descripción del proceso unitario	Tipo de tratamiento	Etapa del tratamiento			
		P	I	II	III
TRATAMIENTO PRELIMINAR PRIMARIO					
El estanque de compensación mezcla las aguas residuales para reducir las variaciones en las concentraciones y evitar “picos”	Físico	x			
El desarenador remueve la arena y polvo	Físico	x			
El tamiz de malla ancha (barra, malla) remueve sólidos de gran tamaño	Físico	x			
El triturador pulveriza los sólidos para reducir su tamaño	Físico	x			
El separador de aceite y grasa remueve los materiales aceitosos	Físico	x			
TRATAMIENTO PRIMARIO PRINCIPAL					
La sedimentación remueve fácilmente sólidos inertes y orgánicos sedimentales	Físico		x	x	x
Los tamices de malla fina remueven sólidos inertes y orgánicos	Físico		x		x
La flotación de aire remueve grasa y sólidos ligeros	Físico	x	x		
La floculación (aérea y mecánica) mejora la remoción de sólidos suspendidos	Físicoquímico	x	x	x	x
El sistema de descomposición de la emulsión remueve el aceite y grasa dispersos	Físicoquímico	x	x		
TRATAMIENTO SECUNDARIO PRINCIPAL					
El tratamiento en el terreno se basa en la filtración y tratamiento aerobio de aguas residuales. Los métodos incluyen: (1) infiltración rápida, (2) aspersión, (3) flujo superficial, (4) absorción subterránea del suelo	Biológico Físicoquímico			x	
Las lagunas o estanques de estabilización tratan las aguas residuales mediante procesos naturales. Éstos incluyen (1) lagunas aerobias y facultativas, (2) lagunas facultativas y aerobias aereadas, (3) contención total (4) descarga hidrográfica controlada (5) lagunas de pulimento	Biológico Físico			x	x
El lodo activado convencional, brinda tratamiento aerobio mediante el uso de partículas microbianas suspendidas de flóculo y aereadores en una o varias series únicas de cuencas del reactor	Biológico			x	
Otros métodos de lodos activados con diseños variados incluyen: (1) estabilización por contacto, (2) aeración prolongada, (3) zanjas de oxidación y (4) reactores por lotes secuenciales	Biológico			x	
Los filtros biológicos usan el crecimiento microbiano en medios filtrantes para brindar un tratamiento aerobio a las aguas residuales. Los principales tipos incluyen: (1) filtros con medios fijos (clasificados según el tipo de medio, tasa de flujo y frecuencia de dosificación), y (2) contactores biológicos rotatorios	Biológico			x	
Los sistemas de tratamiento dual o de doble etapa combinan los lodos activados y los procesos de filtro biológico	Biológico			x	
Los procesos de tratamiento anaerobio usan bacterias facultativas y anaerobias para degradar los sólidos disueltos y orgánicos. Incluyen unidades de flotación y sedimentación. Los principales tipos incluyen: (1) tanques séptico/Imhoff, (2) tanques biológicos (biomasa suspendida), (3) filtros y discos sumergidos (biomasa fija)	Biológico Físico		x	x	
El tratamiento con humedales o “wetlands” construidos, aprovechan la capacidad natural que poseen ciertas especies vegetales y ecosistemas acuáticos para depurar agentes contaminantes.	Biológico			x	x
TRATAMIENTO AUXILIAR O TERCIARIO					
La filtración con medios granulares remueve los sólidos suspendidos mediante el tamizado, sorción y descomposición biológica. Existen varios tipos: (1) filtros de arena (lento, rápido, intermitente, recirculante), (2) filtros ascendentes, de presión y de tasa alta con limpieza mecánica, (3) los filtros duales o de medios múltiples	Físico Biológico Químico			x	x
La precipitación y coagulación química se usan principalmente para la remoción de sólidos disueltos y fósforo en combinación con la floculación y sedimentación. Los productos químicos comunes usados para promover la coagulación incluyen: cal, cloruro férrico, polímero, carbonato de sodio, cloruro de bario, hidróxido de sodio y alumbre	Químico	x	x		x
La oxidación química se usa principalmente para la desinfección y control de olor. Los métodos principales incluyen (1) cloración, (2) ozonización y (3) radiación	Químico	x	x		x
Otros métodos de tratamiento químico que pueden usarse para el tratamiento de aguas residuales incluyen: (1) adición de nutrientes para mejorar los procesos de tratamiento biológico, (2) recarbonación para reducir el pH y (3) otros métodos de neutralización	Químico			x	x
La adsorción de carbono activado remueve sólidos y material orgánico	Físico- Químico		x		x

Etapas de tratamiento: P = preliminar, I = primario, II = secundario, III = terciario

De esta forma, en el funcionamiento de una EDAR (estación depuradora de agua residual) se suelen distinguir dos grandes líneas:

**a.- Línea de agua:** Es el conjunto de los procesos (primarios, secundarios, etc.) que depuran el agua propiamente dicha. Comenzaría con el agua que entra a la depuradora y terminaría en el agua vertida al río o al mar.

Dentro de la línea de agua se distinguen las siguientes fases:

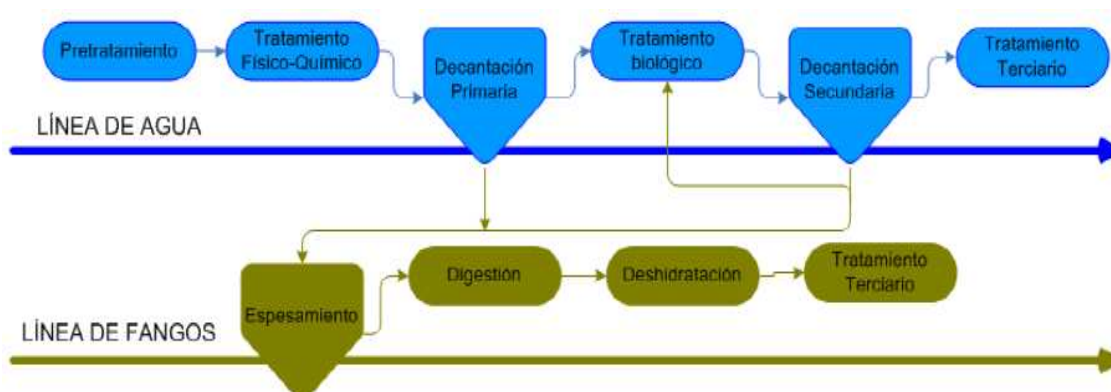
- *Pretratamiento*: Está formado por una serie de procesos unitarios por medio de los cuales se eliminan los sólidos de gran tamaño, arenas y grasas.

- *Tratamiento primario*: Destinado, fundamentalmente, a la eliminación de materia en suspensión y la reducción de parte de la materia orgánica. Consiste esencialmente, en una decantación primaria, mediante procesos físico-químicos.

- *Tratamiento secundario*: Se compone, en esencia, de procesos biológicos, encargados de la eliminación de la mayoría de la materia orgánica. Generalmente, el efluente del proceso biológico pasa a una etapa de clarificación, en la que se eliminan los flóculos biológicos producidos.

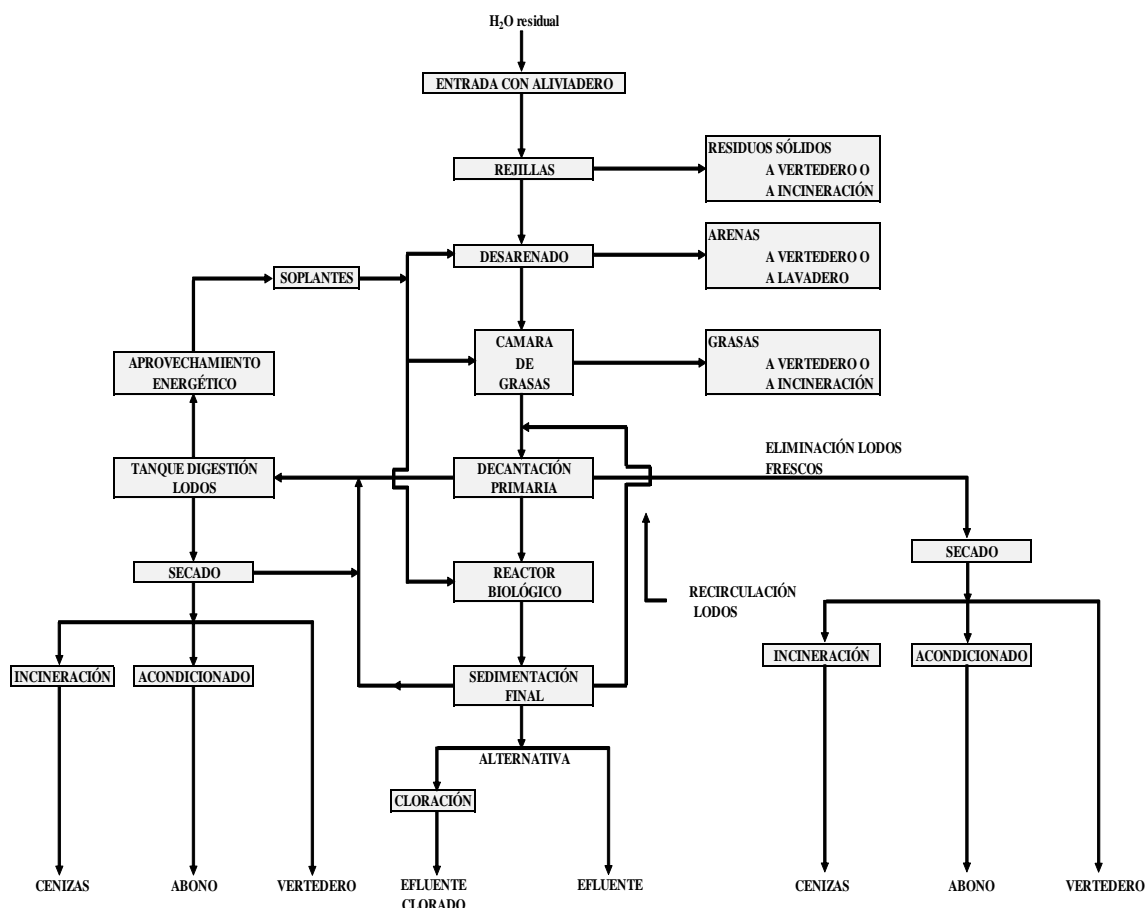
Existe la posibilidad de un tratamiento terciario para mejorar el rendimiento de la eliminación de la materia orgánica.

**b.- Línea de fangos:** Está formada por el conjunto de procesos a los que se somete a los fangos (lodos) que se han producido en la línea de agua, para que puedan ser manejados y evacuados en condiciones óptimas. Estos lodos son degradados en un digestor anaeróbico (o en otra forma similar), para ser después incinerados, usados como abono, o depositados en un vertedero. En esta línea se incluyen procesos de espesamiento, estabilización, acondicionamiento, deshidratación y evacuación final del fango.



En una planta depuradora también se generan, además de los lodos, otros residuos (arenas, grasas, objetos diversos separados en el pretratamiento y en el tratamiento primario) que deben ser eliminados adecuadamente. Se suelen llevar a vertederos o similares.

Como síntesis de lo anterior, se deduce que una estación depuradora es algo complejo, que integra un conjunto de unidades de proceso, tal y como se concreta en el gráfico siguiente:



Si se realiza la *digestión anaerobia* de los fangos, podemos hablar también de una “*Línea de gas*”. Esta digestión produce una gran cantidad de litros de gas, compuesto principalmente por Metano y Anhídrido carbónico en proporciones de 70 y 30 % respectivamente. Este gas posee un poder calorífico de 550 Kilocalorías / litro, lo cual lo convierte en un buen elemento para calentar equipos, edificios, obtener energía,... en la misma depuradora. Normalmente, la digestión se hace en dos tanques: *Digestor Primario* y *Digestor Secundario*. El gas producido se almacena en un tanque cerrado llamado *gasómetro*. Para el exceso de gas o sobrante, se prevé un quemador.

Una EDAR no es más que una fábrica de agua limpia, a ella llega el agua sucia, Agua Bruta, y sale agua limpia, Agua Tratada. Un gran error es no tratar una EDAR como lo que es, una fábrica, llega materia prima, Agua Bruta, y sale un producto, Agua Tratada, y varios subproductos, fangos y gas.

En resumen, para el tratamiento tanto de las aguas residuales domésticas como industriales hay que empezar a considerar nuevas tecnologías, nuevos procesos y en general nuevas líneas de tratamiento, así como modificación de las antiguas. La imagen actual de una planta de tratamiento no es la de grandes depósitos de hormigón, sino la de una serie de procesos unitarios integrados. Estas operaciones, tanto físicas como químicas en su base, deben diseñarse caso por caso para cada problema de aguas residuales.

Es importante destacar que la reutilización planificada de aguas residuales depuradas ha alcanzado un gran desarrollo no sólo en países con una escasez tradicional de recursos hídricos, sino especialmente en países con grandes recursos hidráulicos y con un elevado nivel de vida. Los altos incrementos de la demanda de agua, con frecuencia en lugares donde son escasos los recursos hídricos, han motivado a dirigirse hacia los efluentes de las estaciones depuradoras de aguas residuales (EDAR) como una fuente alternativa de recursos hídricos. Una vez sometidos a un proceso adecuado de regeneración, estos efluentes son reutilizados para riego agrícola y de jardinería, para refrigeración industrial, para recuperación ambiental y para recarga de acuíferos, entre otros recursos.

La mayoría de los países descartan el consumo humano de agua residual depurada. Aun estando regulado y permitido este uso en ciertos países, no se tienen noticias de haberse llegado a aplicar. En España la Legislación de aguas prohíbe este uso, salvo en casos de excepción o catástrofe, y siempre previa autorización de la Administración sanitaria y del Organismo de cuenca correspondiente

#### **4.4. Otros sistemas de depuración**

Para lograr una depuración suficiente de las aguas residuales de pequeñas comunidades no es necesario acudir a la instalación de EDAR capaces de realizar complejos tratamientos. Otros métodos pueden ser suficientemente eficaces y mucho más rentables.

Muchas de las localidades no cuentan con recursos y tecnología suficiente para la implantación de sistemas de tratamientos convencionales, siendo una alternativa para una gran cantidad de ellos la propuesta de sistemas de tratamiento de bajo costo.

Un sistema de bajo costo es un sistema de tratamiento físico, químico y/o biológico que tiene la característica de que la cantidad de dinero empleado en la operación y mantenimiento sea bajo.

Hay múltiples maneras de clasificar estos sistemas de bajo coste, pudiendo ser clasificados de la siguiente manera: Sistemas individuales o primarios, Sistemas de



tecnología “Blanda” o Natural y Sistemas convencionales adaptados a pequeños municipios.

- **Sistemas individuales:** Estos sistemas están constituidos por las fosas sépticas, tanques Imhoff o de decantación-digestión, así como por sistemas de decantación primaria. Según se recomienda, estos sistemas suelen ir acompañados de aplicaciones subsuperficial al terreno como son las zanjas filtrantes, los pozos filtrantes y los filtros de arena o turba que actúan como tratamiento secundario.

- **Tecnologías Blandas:** Dentro de estos sistemas nos encontramos los lagunajes naturales que se subdividen según la profundidad en aerobios, facultativos y anaerobios. También se denominan sistemas blandos a los lechos bacterianos, a los biodiscos y sistemas de aplicación superficial al suelo como son los filtros verdes, infiltración y escorrentía.

- **Los sistemas convencionales aplicados a pequeñas plantas:** Estos sistemas se basan en los mismos principios de depuración que los sistemas para grandes núcleos, pero sus unidades de proceso se han simplificado o adaptado a las pequeñas plantas. Estos sistemas son sistemas de fangos activos de aireación prolongada, lagunajes aireados u otros sistemas que requieran de aireación artificial, así como sistemas de reactores anaerobios de flujo ascendente y manto fluidizado, etc.

Los sistemas de depuración de bajo coste también pueden clasificarse según el siguiente esquema:

SISTEMAS DE TIPO NATURAL	SISTEMAS DE TIPO CONVENCIONAL
a) Biomasa en suspensión a. Lagunaje natural b. Lagunas aireadas	a) Biomasa en suspensión a. Fangos activos de baja y media carga
b) Biomasa adherida a. Filtros verdes o sistemas de riego superficial b. Infiltración en el terreno: lechos, zanjas y pozos filtrantes c. De flujo superficial d. Lechos de turba y filtros de arena	b) Biomasa adherida a. Contactores biológicos rotativos (CBR ó RBC) b. Lechos bacterianos o filtros percoladores de baja y media carga
c) Sistemas mixtos a. Sistemas de humedales: flujo libre, subsuperficial, plantas flotantes b. Sistemas de acuicultura	c) Sistemas de decantación - digestión (tratamientos primarios) a. Fosas sépticas b. Tanques Imhoff c. Pozos negros

De todas estas técnicas de bajo coste, las más utilizadas son las que se describen a continuación; teniendo en cuenta que las lagunas de oxidación o estabilización (Lagunaje), fangos activos, los contactores biológicos rotativos (CBR ó RBC) y los lechos bacterianos se han tratado en el apartado 3.2.3:

## 1.- Sistemas de tipo natural

Bajo la denominación de sistema natural de depuración se engloban aquellos procedimientos o técnicas en los que la eliminación de las sustancias contaminantes presentes en las aguas residuales urbanas se produce por componentes del medio natural, no empleándose en el proceso ningún tipo de aditivo químico. Habitualmente se diferencian dos grandes grupos de técnicas de depuración natural: *los métodos de tratamiento mediante aplicación del agua sobre el terreno, y los sistemas acuáticos*; ambos con diversas formas de tratamiento, cada una de las cuales destaca en un aspecto:

- Rendimientos de depuración: filtro verde, infiltración rápida y lagunaje.
- Rendimientos de eliminación de nutrientes: filtro verde y lagunaje.
- Mayor estabilidad frente a variaciones de temperatura: infiltración rápida y lechos de turba.
- Mayor estabilidad frente a variaciones de carga y caudal: lechos de turba.
- Menor impacto: lechos de turba.
- Menor producción de fangos: infiltración rápida.

La idea de estos métodos es aprovechar la interacción suelo-plantas-atmósfera para proporcionar tratamiento al agua residual. En todos ellos, el efecto depurador se debe a la acción combinada de la vegetación, del suelo y de los microorganismos presentes en ambos, y en menor medida, a la acción de plantas y animales superiores.

Estas formas de tratamiento van siempre precedidas por algún tratamiento mecánico (tamizado, sedimentación primaria...); y se caracterizan, en general, por su escasa necesidad de personal de mantenimiento, consumo energético reducido y baja producción de fangos. Sin embargo, requieren mayor superficie de terreno disponible que los métodos convencionales lo que limita su uso a pequeños núcleos donde la presión urbanística es menor. El segundo factor limitante hace que estos sistemas sólo puedan ser empleados con éxito para determinado tipo de vertidos, pues han de ser totalmente degradables (aguas sin componente industrial).

Entre los *métodos de tratamiento en el terreno* se incluyen habitualmente los siguientes tipos:

- Filtro verde.
- Infiltración rápida.
- Escorrentía superficial.
- Zanjas, lechos y pozos de filtración.
- Lechos de turba y de arena.

El rasgo común a todos ellos es que la depuración se consigue a través de los procesos físicos, químicos y biológicos naturales, desarrollados en un sistema planta-suelo-agua.



Los llamados *métodos acuáticos* se basan en la creación de un flujo controlado de agua residual, en el que microorganismos y plantas principalmente, transforman los contaminantes.

Incluyen tres tipos básicos:

- Lagunajes.
- Humedales.
- Cultivos acuáticos.

Estos últimos se han desarrollado como una variante del lagunaje convencional, aprovechando la captación de nutrientes por las plantas, lo que mejora los rendimientos de las lagunas de estabilización. Estos métodos acuáticos, en general, se proyectan para un flujo continuo con descarga a ríos o lagos próximos. Su sistema de operación puede ser estacional o anual, en función del clima o de los objetivos de tratamiento.

### **1.1.- Métodos de tratamiento en el terreno**

En este tipo de tratamiento el suelo cumple dos funciones: por un lado es el medio receptor de las aguas residuales evitando de esta manera el vertido a otros medios, por otro lado, es el agente activo pues tanto en su superficie como en su interior se produce el proceso de depuración eliminando nutrientes, materia orgánica, microorganismos y otros componentes como metales pesados o microcontaminantes orgánicos.

En función de como se apliquen al terreno las aguas residuales a depurar se distinguen dos tipos básicos de sistemas:

- Sistemas de aplicación superficial.
  - Filtro verde (infiltración lenta).
  - Infiltración rápida.
  - Escorrentía superficial.
- Sistemas de aplicación subsuperficial.
  - Zanjas de filtración.
  - Lechos de filtración.
  - Pozos de filtración.

En este apartado, también incluiremos los sistemas que se basan en la filtración de las aguas a tratar a través de un medio granular:

- Lechos de turba y lechos de arena.

### 1.1.1.- *Filtros verdes*

Un *filtro verde* se define como un sistema natural de tratamiento de aguas residuales por aplicación al suelo, constituido por una superficie de terreno sobre la que se establecen una o varias especies vegetales y a la que se aplica periódicamente el agua residual a tratar mediante algún método de riego.

Entre las especies vegetales que pueden establecerse en un filtro verde están los cultivos agrícolas, forrajeros y forestales, siendo estos últimos los que presentan las mayores ventajas en relación con otros cultivos, ya sea como sistema de depuración o como una forma de eliminar las aguas residuales, aprovechando ésta y los nutrientes que contiene.

La depuración de las aguas por filtro verde tiene el objetivo prioritario de la biodegradación biológica de los compuestos orgánicos disueltos en el agua residual y en la inmovilización de sus constituyentes.

El tratamiento del agua residual en un filtro verde, se consigue mediante procesos físicos (filtración), químicos (intercambio iónico, precipitación y coprecipitación, fenómenos de óxido-reducción) y biológicos naturales (degradación de la materia orgánica) que se desarrollan en el ecosistema suelo-agua-cultivo; siendo capaces de eliminar, hasta cierto punto casi todos los contaminantes del agua residual como: sólidos suspendidos, materia orgánica, nitrógeno, fósforo, elementos traza y microorganismos, alcanzando rendimientos de depuración de hasta un 98% en los primeros centímetros del suelo.

La infiltración lenta alcanza altos niveles de tratamiento, debido a la aplicación de cargas relativamente bajas sobre suelo vegetado y a la existencia de un ecosistema muy activo en el suelo, a escasa distancia de la superficie.

Las aguas residuales se emplean para regar el terreno que se utiliza como filtro verde. Tras su infiltración, el agua residual percola vertical y lateralmente a través del suelo. El suelo actúa como un filtro físico reteniendo fundamentalmente materia en suspensión. La materia en suspensión retenida, sufre una oxidación bioquímica bacteriana. La oxidación de la materia orgánica de las aguas se produce mediante bacterias aerobias que se encuentran en el suelo formando una película: el humus. Dentro de las acciones biológicas (degradación de la materia orgánica) pueden considerarse dos diferentes; las producidas por los microorganismos del suelo y las inherentes de las actividades radiculares de las plantas establecidas, es decir:

- *La Edafodepuración*: proceso de depuración natural realizado por el suelo, constituido como soporte de microflora y fauna bacteriana (bacterias, algas, hongos y protozoos), que se encarga de la degradación de la materia orgánica (similar a un lecho bacteriano convencional).



- La Macrofitodepuración: proceso de depuración natural realizado por las macrófitas que utilizan la materia orgánica, los nutrientes y las sales minerales del agua para su propio metabolismo (incorporan los nutrientes del suelo a su propia biomasa).

Los sistemas de distribución del agua pueden ser: por *aspersión* que es un sistema ideal debido a que tiene cultivo y ayuda a una mejor distribución del agua residual repartiendo de forma uniforme sobre la capa vegetal, por *aplicación superficial* y por *goteo* que se lo emplea cuando se dispone de un efluente filtrado de alta calidad.

Para mantener en el terreno condiciones predominantemente aerobias el agua residual se aplica en ciclos intermitentes, generalmente variables, de entre 4 y 10 días.

Los filtros verdes es la aplicación de esa agua residual a cultivos con la máxima rentabilidad; persiguiendo tanto la depuración del vertido como el crecimiento de la vegetación existente, mediante la utilización de un vertido como fertilizante excepcional. El agua residual aplicada a riego tiene que tener unas características especiales, y el cultivo se debe seleccionar adecuadamente a las características (carga orgánica) de ese agua y al consumo de agua.

Las cargas hidráulicas del agua residual aplicadas sobre la superficie activa de tratamiento varían, dependiendo de la naturaleza del terreno, de la época del año y del tipo de cultivo entre 0,5 y 6 m/año.

El principal inconveniente de este sistema de depuración es la gran extensión de terreno que requiere para su instalación. Otro inconveniente es que en climas de invierno frío se produce una parada vegetativa en el crecimiento de los cultivos instalados en el filtro (el cultivo más extendido son los chopos) disminuyendo sensiblemente el rendimiento del sistema, si a esto se une la disminución de los procesos de evapotranspiración se corre el riesgo de afectar al agua subterránea si el filtro no ha sido correctamente sobredimensionado y la distancia al nivel piezométrico no es suficiente en previsión de esta circunstancia (> de 1,5 m de la superficie, aunque generalmente este valor debe ser aumentado al doble o triple)..

### **1.1.2.- Infiltración rápida**

Además del uso de filtros verdes, el agua residual que ha recibido algún tipo de tratamiento de depuración, ya sea meramente físico o biológico, puede recibir tratamiento naturales que completen la depuración utilizando el suelo como filtro (sistemas de infiltración rápida), de modo que la carga orgánica queda en las primeras capas del suelo, favoreciendo la formación de humus o mantillo, mientras que el agua ya depurada favorece la recarga de los acuíferos.

El tratamiento mediante infiltración rápida se define como la aplicación controlada del agua residual sobre balsas superficiales construidas en suelos de

permeabilidad media a alta (con una capacidad de infiltración que oscila entre 10 y 60 cm/día).

La infiltración es el proceso por el cual el agua superficial se introduce en las capas internas del suelo debido básicamente a las fuerzas gravitatorias, aunque también intervienen fuerzas de tipo capilar así como otras de naturaleza más compleja como química, etc.

El agua infiltrada puede llegar a los acuíferos, ríos, lagos o al mar, o bien puede quedar retenida en el suelo y volver a la atmósfera por fenómenos de evaporación y/o transpiración.

La evolución del efluente en el suelo y subsuelo es similar a la de los sistemas de filtro verde. No obstante, por tratarse caudales muy superiores, el suelo y formaciones infra-yacentes han de tener mejores características hidráulicas.

El agua residual se aplica al terreno en tasas elevadas, bien por extensión en lagunas (tubos de distribución perforados / fosas de distribución de bajo nivel) o bien por aspersión, alternando periodos de inundación con periodos de secado. La aplicación se realiza de forma cíclica para permitir la regeneración aerobia de la zona de infiltración y mantener la máxima capacidad de tratamiento. Los ciclos de aplicación son de 10 a 20 días con 1 a 2 semanas de descanso. La superficie del fondo puede ser rastrillada antes de cada aplicación para dispersar los sólidos y evitar la formación de una capa impermeable.

En las balsas de infiltración no se suele poner vegetación, pero ésta se hace necesaria cuando se emplean los sistemas de aspersión como forma de aplicación del agua residual al terreno. La aspersión de agua residual puede plantear problemas por la creación de aerosoles cargados de microorganismos patógenos. En cualquier caso se exige un mantenimiento periódico de la superficie de las mismas.

El principal inconveniente de este sistema es la tendencia a la colmatación rápida del lecho filtrante por ello el agua residual suele requerir, al menos, un tratamiento primario previo a la aplicación, siendo las cargas hidráulicas anuales normales de 6 a 100 m/año.

Respecto a la profundidad recomendable a la que debe situarse el nivel piezométrico, existen opiniones muy variadas, aunque entre 18 y 20 metros desde la base de la balsa de infiltración es una cifra frecuentemente aceptada.

La depuración se produce mediante los procesos físicos, químicos y biológicos que tienen lugar al atravesar el agua residual urbana la zona no saturada. Por medio de este sistema se consigue la recarga artificial de acuíferos, y la posibilidad de reutilizar el agua tratada, recuperándola a través de zanjas o pozos. La recolección del agua residual puede ser por medio de tubería de drenaje instalada en forma de espina de pescado

(recomendada), puede pasar directamente al agua subterránea o puede ser conducida a un tanque de almacenamiento, esto dependerá de la disposición final del agua residual a tratar. Se alcanzan reducciones medias de  $\text{DBO}_5$  y de sólidos en suspensión alrededor del 90% y una elevada eliminación de patógenos, entre el 70% y el 95%.

Muchos de los sistemas de infiltración rápida en uso actual fueron diseñados para disponer principalmente agua residual no deseada. Recientemente los procesos han sido empleados como medio para la recarga del acuífero y/o como un sistema de tratamiento avanzado, siendo el agua percolada recolectada para su reúso. El suelo actúa esencialmente como filtro para tratamiento terciario.

### **1.1.3.- Escorrentía superficial**

La escorrentía superficial es un sistema de depuración relativamente nuevo, poco empleado en Europa, siendo en Estados Unidos donde existe mayor número de instalaciones de este tipo en funcionamiento.

Es un sistema de depuración que consiste en la descarga controlada de un agua residual, mediante riego por circulación superficial en láminas, sobre un terreno de baja permeabilidad, con pendiente y extensión suficiente, que se encuentra sembrado de plantas acuáticas emergentes, alternando periodos de riego con periodos de secado; dependiendo la duración de cada fase de los objetivos de tratamiento. La depuración se debe a efectos de asimilación de la vegetación, actividad microbológica, evaporación, y en menor cuantía, a la infiltración en el terreno de las aguas.

El efluente que se aplica suele sufrir un pretratamiento y en ocasiones una decantación primaria. También es opcional la instalación de un decantador secundario para separar las partículas que se escapan con el arrastre. La aplicación del agua residual suele realizarse en ciclos de varias horas, durante 5 a 7 días a la semana. La distribución del agua se puede llevar a cabo mediante aspersores de baja carga, rociadores de baja presión o métodos superficiales como tuberías provistas de orificios.

La recolección del agua residual tratada se la realiza por medio de drenajes abiertos bordeados por pasto en la base de la pendiente, estos canales son usualmente de tipo V de (0.5 a 1) %.

Las plantas acuáticas emergentes (carrizos, juncos, enneas, etc.) son plantas anfíbias que se desarrollan en aguas poco profundas, arraigadas al subsuelo, alcanzando alturas de 1,5-3 m. Se trata de plantas vivaces, cuyas hojas se secan en invierno y rebrotan en primavera, a partir de rizomas que persisten durante el periodo frío. Presentan una gran productividad (50-70 Tn de materia seca/ha. año), y toleran bien las condiciones de falta de oxígeno que se producen en suelos encharcados, al poseer canales o zonas de aireación (aeroquímica), que facilitan el paso del oxígeno hasta las raíces.

Los mecanismos por los que las plantas llevan a cabo la depuración del agua residual son los siguientes:

- **Acciones Físicas:** Filtración a través del conjunto de obstáculos del lecho, estratificación del suelo, rizomas y raíces que provocan la eliminación de los sólidos en suspensión.
- **Acciones Biológicas:** Acción de los microorganismos que en estos sistemas presentan actividades y desarrollos muy elevados. Las plantas actúan como sistema de aireación, suministrando el oxígeno necesario a las bacterias que viven en el sustrato, originándose la degradación aerobia de la materia orgánica. En zonas profundas pueden darse condiciones de ausencia de oxígeno, produciéndose degradaciones anaerobias.

En estos sistema se produce la eliminación directa de nutrientes, nitrógeno (250 kg/ha. año) y fósforo (40 kg/ha. año), estando los rendimientos alcanzados para la DBO<sub>5</sub> y los sólidos en suspensión en torno al 90 y 70 % respectivamente. También se produce la eliminación de patógenos debido a la acción de antibióticos producido por las raíces y la acción depredadora de bacteriófagos y protozoos asociados. El grado de tratamiento alcanzable es equivalente a uno secundario.

#### **1.1.4.- Zanjas, lechos y pozos filtrantes**

El fundamento de estos sistemas consiste en introducir agua residual, previamente tratada a nivel primario, en el terreno por debajo de la superficie. El agua se infiltra en el mismo y puede llegar a alcanzar el nivel freático, o incluso ser recogida por un sistema de drenaje inferior para su posterior evacuación o aprovechamiento. El suelo, en función de su textura, funciona como un filtro biológico, donde se desarrollan fenómenos químicos y físicos causantes de la depuración de las aguas vertidas.

Sistemas más comunes de aplicación subsuperficial: zanjas, lechos y pozos filtrantes.

**1.- Zanjas filtrantes:** Se trata de zanjas de poca profundidad (< 1 m) y anchura entre 0,45 y 0,80 m, excavadas en el terreno, que recogen y distribuyen las aguas residuales pretratadas a través de una tubería agujereada, colocada sobre un lecho de arena y cubierta de grava, donde se depura por vía aerobia y pierde las partículas en suspensión. La grava se cubre de terreno vegetal, de forma que no arrastre el espacio ocupado por la capa de grava. En este caso. La superficie de filtración está constituida por el fondo de la zanja, aunque en caso de posibles atascamientos, las paredes verticales pueden ayudar a la filtración.

Las características de las zanjas dependen de los ensayos de infiltración, pruebas en las cuales se mide la velocidad de infiltración del terreno calculando el tiempo de descenso de una lámina de agua en 2,5 cm ó, en el caso de no hacer los ensayos de



infiltración, se utilizarán los valores de organismos competentes, que recogen en tablas las tasas de infiltración según el tipo de terreno.

**2.- Lechos filtrantes:** Es un proceso similar al anterior, siendo las zanjas más anchas (0,90 a 2,0 m), convirtiéndose en lechos de grava que albergan en el fondo varias tuberías perforadas.

**3.- Pozos filtrantes:** En este caso se trata de pozos; un sistema que presenta más problemas de construcción que las zanjas y los lechos, aunque los efluentes obtenidos son de mejor calidad. Están indicados cuando el nivel freático es bajo (más de 4 m.), y en tal caso pueden construirse de forma que dispongan de una gran superficie vertical respecto de la que ocupa de forma horizontal. Además el terreno debe estar constituido por gravas, arenas gruesas o medias. La superficie de filtración es en este caso la vertical.

#### **1.1.5.- Filtración en medio granular**

La filtración en medio granular, es una de las principales operaciones unitarias utilizadas en el tratamiento de las aguas.

La filtración consiste en hacer pasar el agua residual a través de un lecho compuesto de material granular. Dentro del lecho filtrante, la depuración del agua se realiza por medio de un complejo proceso que incluye uno o más mecanismos. El lecho con el uso pierde operatividad y requiere una recuperación. El final del ciclo de filtrado se alcanza cuando aumenta el contenido de algún parámetro en la salida por encima de un valor aceptable, o cuando se produce una pérdida de carga a través del lecho filtrante.

Entre los lechos filtrantes en medio granular aplicados en el terreno tenemos los siguientes:

**1.- Lecho de turba:** En el caso del lecho de turba, el medio granular es un medio múltiple formado por turba, arena, gravilla y grava. Un dispositivo de drenaje recoge el efluente en la base del sistema y lo lleva a un canal de recogida.

La turba es un material resultado de la acumulación de materia vegetal y de su mayor o menor degradación biológica, siendo el primer paso para la formación del carbón mineral

Este tratamiento de filtración sobre turba se basa en las propiedades de adsorción y absorción del carbón mineral, así como de la actividad bacteriana que se desarrolla en su superficie.



Los fenómenos de depuración que se producen son de tipo físico-químico y bioquímico: (1).- Retención, sedimentación, impacto, intercepción, adhesión, mecanismos propios de la filtración; (2).- Adsorción y absorción; (3).- Crecimiento biológico superficial, que aparte de su acción depuradora biológica, reduce el volumen del poro y mejora la eliminación por alguno de los mecanismos antes mencionados; etc....

El proceso completo de los lechos de turba está formado por un pretratamiento, tratamiento primario compuesto de una serie de filtros autolimpiables; tratamiento secundario formado por los propios lechos de turba, y, opcionalmente, tratamiento terciario, cuyo objeto es la eliminación de patógenos, sometiendo el efluente de los lechos a un lagunaje aerobio, o bien a una cloración.

Los lechos se disponen en varias unidades, estando unas en funcionamiento y otras en conservación, para su mantenimiento y aireación. La turba necesita ser retirada y reemplazada cada 5-7 años, pudiendo ser aprovechada para fines agrícolas.

En los lechos de turba, el proceso consiste en una filtración a través de una capa de turba (50 cm) de determinadas características, asentada sobre un sistema drenante de arena (15 cm) y ésta a su vez sobre una capa de grava (15 cm) y un dispositivo de drenaje situado en la base del sistema para recoger el efluente. El terreno donde se asienta cada lecho debe ser impermeable para garantizar la no contaminación de las aguas subterráneas, en caso contrario hay que recurrir a la impermeabilización.

El agua residual se filtra a través de dicha capa durante un periodo limitado de aproximadamente unos 15 días, tras los cuales los lechos de turba pasa a una situación de recuperación, debido a la colmatación y la consiguiente disminución en la velocidad de infiltración en los mismos. Mientras que los lechos que estaban en recuperación pasan al estado de operatividad.

La recuperación consiste en un proceso de descolmatación del filtro, que se realiza dejando los filtros en reposo hasta que la parte superior se seque. Después, se somete a un rastrillado superficial para eliminar dicha capa de costra. A continuación, es conveniente arar la superficie para que la turba se oxigene y recupere su porosidad. Para el laboreo puede emplearse un pequeño arado mecánico. Con este volteo de la turba se favorece la digestión aerobia de la materia retenida y se permite la regeneración de las condiciones básicas de filtrabilidad y adsorción. A tal efecto, se recomienda dejar un período de unos 15 días para la regeneración del lecho.

Los resultados medios de depuración en porcentajes de eliminación son: alrededor del 80-90% de DQO, del 70-90% de DBO<sub>5</sub> y el 90% de sólidos en suspensión.

Es importante señalar, que independientemente de obtener buenos rendimientos en la eliminación de estos parámetros, se pueden observar en este tipo de instalaciones





lo siguiente: (a).- pH del agua de salida inferior al de la entrada. (b).- Buena transparencia del agua de salida, aunque con un ligero tono amarillento.

Estas dos características son debidas al arrastre de los ácidos húmicos de la turba en el agua de salida.

**2.- Lecho de arena:** Los filtros de arena son una de las tecnologías más antiguas para la depuración de aguas residuales que se conoce. Cuando se emplean de forma adecuada consiguen llegar a niveles de depuración muy elevados. Consisten en lechos de material granular, de tamaño de grano relativamente uniforme, adecuadamente drenados en el fondo. Se emplean generalmente como un sistema de afino de aguas tratadas previamente mediante otros sistemas como puede ser una fosa séptica.

La tecnología de filtros de arena incluye los filtros intermitentes, en los cuales, las aguas a depurar se vierten intermitentemente mediante tuberías de distribución en un filtro granular de entre 0,5 y 1,0 m de espesor y los filtros con recirculación, en los cuales, el agua recogida en el sistema de drenaje se vierte de nuevo en el filtro mezclada con agua nueva sin depurar.

La disposición de los filtros puede ser muy variada, incluyendo tanto filtros enterrados como sobre la superficie del terreno, estos últimos facilitan las labores de mantenimiento. El mantenimiento de estos dispositivos, que se colmatan con cierta facilidad, depende mucho de la eficacia del sistema de tratamiento previo.

Se considera que la adecuada aireación del filtro y la temperatura ambiente son los dos factores externos al diseño del mismo que más influyen en su rendimiento. Hay que tener presente no obstante que los lechos de arena presentan una capacidad de eliminación de la DBO<sub>5</sub>, carbono orgánico disuelto y sólidos en suspensión, insuficiente para ser considerados como sistema único de tratamiento de las aguas residuales, pudiendo ser empleados no obstante como tratamiento complementario. Una ventaja de los filtros de arena frente a los de turba es su mayor resistencia a la colmatación, su menor volumen y menor costo.

## **1.2.- Métodos acuáticos**

En este grupo de métodos naturales de depuración de aguas residuales, se incluyen aquellos cuya acción principal de depuración se ejerce en el seno del medio acuático, participando en el proceso plantas emergentes (especialmente sus raíces) y la actividad microbiológica asociada. Son sistemas que pueden funcionar estacionalmente o a la largo de todo el año, dependiendo fundamentalmente del clima, y que con frecuencia se diseñan para mantener un flujo continuo. Los sistemas más empleados son: lagunajes, humedales y cultivos acuáticos.

### **1.2.1.- Lagunajes**

El lagunaje se puede aplicar a núcleos de población superiores a los 200 habitantes, siempre que se disponga de una superficie de terreno de al menos 6,5 m<sup>2</sup>/hab.

La depuración por lagunaje de aguas residuales consiste en el almacenamiento de éstas durante un tiempo variable en función de la carga aplicada y de las condiciones climáticas, de forma que la materia orgánica resulte degradada mediante la actividad de los microorganismos presentes en el medio acuático. El proceso de depuración tiene lugar gracias a reacciones biológicas, químicas y físicas, que ocurren en las lagunas y que tienden a estabilizar el agua residual. Los fenómenos que se producen tienen relación con la sedimentación, oxidación, fotosíntesis, digestión, aireación y evaporación. En función de los tipos de microorganismos, que dependen, a su vez, de la presencia de oxígeno disuelto, las lagunas, también conocidas como estanques de estabilización, se clasifican en anaerobias, facultativas y aerobias o de maduración (ver apartado 3.2.3).

### **1.2.2.- Humedales**

Los humedales son terrenos inundados debido al régimen hídrico e hidráulico de la zona, con profundidades de agua normalmente inferiores a 0,6 m y con plantas emergentes como carrizo y juncos. En estos sistemas el agua fluye continuamente y la superficie libre permanece al nivel del suelo, o mejor (pues evita la proliferación de insectos) por encima del mismo, manteniéndolo en estado de saturación durante un largo periodo del año.

Además de ser un soporte para la actividad microbiológica, la vegetación presente en estos sistemas es muy productiva; proporciona superficies adecuadas para la formación de películas bacterianas, facilita la filtración y la adsorción de los constituyentes del agua residual, permite la transferencia del oxígeno a la columna de agua, y controla el crecimiento de algas al limitar la penetración de la luz solar. En estas condiciones, se facilita la absorción y filtración de los contaminantes procedentes de aguas residuales.

Los humedales tienen tres funciones básicas que los hacen tener un atractivo potencial para el tratamiento de aguas residuales: (1).- Fijar físicamente los contaminantes en la superficie del suelo y la materia orgánica. (2).- Utilizar y transformar los elementos por intermedio de los micro-organismos. (3).- Lograr niveles consistentes de tratamiento con bajo consumo de energía y mantenimiento.

Para el tratamiento del agua residual, se han empleado *terrenos pantanosos naturales y artificiales*, aunque el uso de terrenos pantanosos naturales, al formar parte

del sistema de escorrentía superficial de la zona, está limitado al tratamiento adicional de efluentes de tratamientos secundarios o avanzados.

**1.- Humedales naturales:** Los humedales naturales consisten en tener una vegetación sumergida, vegetación flotante, vegetación emergente y zonas con nivel freático más o menos cercano a la superficie, en los que el suelo se mantiene saturado de agua durante un largo período de tiempo cada año. En los humedales crecen vegetales, animales y microorganismos especialmente adaptados a estas condiciones ambientales. Estos seres vivos, junto a procesos físicos y químicos, son capaces de depurar el agua, eliminando grandes cantidades de materia orgánica, sólidos, nitrógeno, fósforo y, en algunos casos, productos químicos tóxicos, por esta razón se ha llamado a los humedales “los riñones del mundo”.

Desde el punto de vista normativo, los humedales naturales se consideran cuerpos de agua receptores. Por tanto el vertido a estos terrenos está sujeto, en la mayoría de los casos, a las limitaciones normativas aplicables que suelen obligar al tratamiento secundario o avanzado de las aguas a verter. Más aún, el principal objetivo del vertido a humedales debería ser la mejora del hábitat existente. La modificación de los terrenos pantanosos para aumentar la capacidad de tratamiento suele ser contraproducente para el ecosistema natural y, en general, no es una práctica que deba abordarse.

**2.- Humedales artificiales:** Los humedales se forman en donde se acumula una pequeña capa de agua sobre la superficie del terreno y donde exista una capa del subsuelo relativamente impermeable que prevenga la filtración del agua en el subsuelo. Estas condiciones pueden crearse para construir un humedal casi en cualquier parte modificando la superficie del terreno para que pueda recolectar agua y sellando la cubeta para retener el agua.

Los humedales artificiales procuran idéntica capacidad de tratamiento que los naturales, con la ventaja añadida de que al formar parte del sistema proyectado, no están sujetos a las limitaciones de vertidos a ecosistemas naturales.

Suelen tener un fondo o base impermeable sobre la que se deposita un lecho de gravas, suelo u otro medio para el desarrollo de las plantas, que constituyen el principal agente depurador. Son ecosistemas que siguen propuestas de desarrollo sostenible teniendo en cuenta el medio ambiente.

Se han propuesto diversos diseños de humedales artificiales a lo largo de su desarrollo tecnológico. Las variables de diferenciación pueden hacer referencia al sistema de flujo del agua residual, sustrato o lecho utilizado, vegetación y sucesión de unidades de tratamiento. En cuanto a la dirección del movimiento del agua a través del humedal se consideran los siguientes tipos: horizontal, vertical, flujo superficial y flujo subsuperficial. En cuanto al sustrato, hay sistemas que llevan por debajo del manto de

agua una capa de suelo o tierra vegetal para enraizar la vegetación, otros que en perfil emplean exclusivamente un lecho de grava y arena, y otros sistemas únicamente tienen agua. Con respecto a la vegetación, hay sistemas que contemplan el uso de plantas acuáticas flotantes, macrófitas acuáticas emergentes, sistemas mixtos de sucesión de vegetación, y sistemas de uso de macrófitas acuáticas emergentes en flotación. Por último, hay que indicar con respecto a la sucesión de unidades de tratamiento que hay una amplia gama de diseños en función de las características de cada uno de los sub-humedales (flujo, sustrato, profundidad, pendiente, vegetación), y de cómo se configuran entre sí (serie, paralelo, recirculación).

En esencia, hay tres líneas de desarrollo tecnológico de humedales artificiales, cuyo modo de actuación, aun basándose en los mismos principios biológicos, es diferente. Se trata de los denominados humedales de flujo superficial o de flujo libre (SFL, en inglés, *Surface Flow Wetlands* o *Free Water Surface wetlands*, FWS), los humedales de flujo sub-superficial (SFS, en inglés, *Sub-surface Flow Wetlands* o *Vegetated Submerged Bed*, VSB, o también Subsurface Flow, SsF) y los humedales con las plantas flotando sobre la superficie del agua. A este último tipo de sistemas pertenecen los que utilizan plantas naturalmente flotantes, tales como el jacinto de agua (*Eichornia crassipes*) o la lenteja de agua (*Lemna* spp.) y las que utilizan especies emergentes a las que se les hace flotar. Algunos autores separan los humedales con plantas flotando sobre la superficie del agua de los sistemas SFL y SFS y los denominan sistemas acuáticos de tratamiento de aguas residuales (en inglés, *Aquatic Plant Systems*), reservando la denominación de humedales para los primeros (SFL y SFS).

- *Humedales de flujo superficial (SFL)*: en el que el agua está en contacto con la atmósfera y constituye la fuente principal del oxígeno para aireación.

En los casos en los que se emplean para proporcionar tratamiento secundario o avanzado, los sistemas SFL suelen consistir en balsas o canales paralelos con el fondo constituido por suelo relativamente impermeable o con una barrera superficial, vegetación emergente, y niveles de agua poco profundos (0,1 a 0,6 m). Se diseñan a modo de canales o estanques con paredes ataludadas, en donde éstas, al igual que el recubrimiento inferior, son estancos (materiales impermeables), canalizaciones de entrada y salida del agua residual, estructuras o dispositivos de control del flujo, y alternancia de áreas con y sin vegetación acuática; es decir, con una apariencia similar a los humedales naturales. En estos sistemas el flujo de agua es de tipo horizontal superficial. Los humedales de flujo superficial se suelen utilizar como tratamiento adicional a efluentes previamente tratados en depuradoras de tipo convencional, y el tratamiento se produce durante la circulación del agua a través de los tallos y raíces de la vegetación emergente. Hay muy pocos sistemas a escala real que traten directamente aguas residuales. En realidad este tipo de humedales se pueden entender como una modificación del lagunaje convencional con menor profundidad y con plantas.

Como ocurre en los humedales naturales, hay una combinación de espacios con la lámina de agua a la vista y otros con cobertura total por vegetación acuática (hidrófitos), generalmente con dominancia de macrófitas emergentes (helófitas) enraizadas en el sustrato que se haya dispuesto en el fondo del canal o estanque; también pueden incorporar especies acuáticas flotantes, y especies vegetales sumergidas.

En estos sistemas el sustrato en que están enraizadas las plantas tiene una baja conductividad y no permite un flujo significativo a través de la zona radicular. La eliminación de contaminantes se produce a través de reacciones que tienen lugar en el agua y en la zona superior del sustrato, por lo que su potencial de eliminación se ve fuertemente restringido.

Los sistemas de flujo libre (SFL) también se pueden diseñar con el objetivo de creación de nuevos hábitats para la fauna y flora, o para mejorar las condiciones de terrenos pantanosos naturales próximos, y entonces la depuración puede ser un objetivo secundario. Esta clase de sistemas suele incluir combinaciones de espacios abiertos y zonas vegetadas e islotes con la vegetación adecuada para proporcionar hábitats de cría para aves acuáticas.

- *Humedales de flujo subsuperficial (SFS)*: donde la superficie del agua se mantiene a nivel de la superficie del lecho permeable o por debajo de la misma.

Los sistemas de flujo subsuperficial (SFS) se diseñan con el objeto de proporcionar un tratamiento secundario avanzado. De modo semejante al de los SFL, consisten en canales o zanjas con fondos relativamente impermeables rellenos de cantos o arena para el crecimiento de vegetación emergente, en donde el nivel de agua se mantiene por debajo de la superficie del material granular. En función del tipo de sistema, la carga hidráulica varía en el rango de 3 a 20 m/año, así como las características del agua de alimentación y los límites impuestos al efluente. Este tipo de humedales se podrían entender como una modificación de los sistemas clásicos de infiltración en el terreno. Así pues los humedales de flujo subsuperficial forman parte de los sistemas naturales de depuración basados en la acción del terreno (como los filtros verdes y los sistemas de infiltración-percolación), mientras que los de flujo superficial pertenecen al grupo de los basados en la acción de mecanismos que suceden en el agua (como los lagunajes).

Sin embargo, más que el tipo de flujo, lo que realmente define al humedal SFS es que no hay, como tal, una columna de agua continua, sino que el influente circula a través de un medio inerte, que consiste en un lecho de arena y/o grava de grosor variable, que sostiene la vegetación (hidrófitos o higrófitos). Este lecho se diseña de modo que permita la circulación del agua residual a través del sistema radicular de las macrófitas acuáticas. El agua se puede mover tanto de forma horizontal como verticalmente a través de la zona radicular de las macrófitas. En definitiva, en los



sistemas de flujo sub-superficial no existe lámina de agua a la vista del observador, y el conjunto sólo recuerda vagamente a los humedales naturales por el tipo de vegetación. Por esta razón a estos sistemas se les denomina alternativamente ‘lechos vegetados sumergidos’, o sistemas SsF.

Los humedales con flujo horizontal funcionan permanentemente inundados. Los humedales con flujo vertical se diseñan con funcionamiento intermitente, es decir, tienen fases de llenado, reacción y vertido. La intermitencia y la inundabilidad permanente confieren propiedades muy diferentes a los sistemas verticales y horizontales respectivamente. En particular afectan mucho la transferencia de oxígeno y por tanto al estado de oxido-reducción del humedal. Los sistemas con flujo vertical operan con cargas superiores que los horizontales (20-40 g DBO/m<sup>2</sup>.dia, frente a 2-6 g DBO/m<sup>2</sup>.dia), produciendo efluentes más oxigenados y libres de malos olores.

Es improbable que un sistema SFS sea competitivo desde el punto de vista de costos, frente a un SFL para pequeñas comunidades y caudales, pero esto siempre dependerá de los costos de terreno, el tipo de impermeabilización que se requiera y el tipo de disponibilidad del material granular empleado.

En cuanto a rendimiento de los humedales, se puede decir que pueden tratar con eficiencia niveles altos de DBO, SS y nitrógeno (superiores al 80%), así como niveles significativos de metales, trazas orgánicas y patógenos. No ocurre lo mismo con la eliminación de fósforo que es mínima en estos sistemas.

De forma intuitiva se puede afirmar que en los humedales de flujo subsuperficial priman los aspectos de tratamiento del agua y en los superficiales los de restauración ambiental.

### **1.2.3.- Cultivos acuáticos**

Los cultivos acuáticos o sistemas de plantas acuáticas flotantes son básicamente una variante de los humedales artificiales SFL, en la que se introduce un cultivo de plantas flotantes, como los jacintos de agua o las lentejas de agua, cuya finalidad principal es la eliminación de determinados componentes de las aguas a través de sus raíces, que constituyen un buen substrato responsable de una parte importante del tratamiento.

Las profundidades de agua suelen ser mayores que en los sistemas de humedales, y varían entre 0,5 y 1,8 m. Para aumentar la capacidad de tratamiento y asegurar el mantenimiento de las condiciones aerobias necesarias para el control biológico de los mosquitos, en los sistemas de plantas acuáticas flotantes se han empleado sistemas complementarios de aireación.



Estos cultivos acuáticos suelen utilizarse como sistema de afino incorporados a otra cadena de procesos, empleándose generalmente como tratamiento terciario. En operaciones bien controladas, en las que las plantas se cosechan periódicamente, se pueden alcanzar rendimientos altos en la depuración. La carga orgánica admitida por estos procesos es del orden de 30 a 50 kg/ha/día, lo que para aguas de moderada carga contaminante ( $\text{DBO}_5 < 240 \text{ mg/l}$ ), significa una carga hidráulica del orden de 6 m/año.

Las cargas hidráulicas anuales y las necesidades específicas de superficie de los sistemas de plantas flotantes son similares a las de los sistemas de humedales. El clima es un factor limitativo en su rendimiento, ya que las plantas sólo crecen a determinadas temperaturas.

El uso de jacintos de agua (*Eichornia sp.*) y lentejas de agua (*Lemna sp.*) evita la entrada de luz solar al estanque. Comúnmente se utilizan para la eliminación de algas de los efluentes de lagunas y estanques de estabilización. Los sistemas de jacintos de agua además están diseñados también para proporcionar niveles de tratamiento secundarios y avanzados. Estos sistemas han sido utilizados también como medios de producción de proteínas o biomasa, en cuyo caso la depuración de agua constituye un objetivo secundario del proyecto.

## 2.- Sistemas de tipo convencional

Dado que la mayoría de estos procesos o técnicas han sido tratados en el apartado 3.2.3, en este punto solamente haremos mención de los sistemas de decantación-digestión.

### 2.1.- Fosa séptica

Son cámaras cerradas en las que los contaminantes sedimentan y fermentan. Suelen ir precedidos de rejillas de desbaste y seguidos de filtros biológicos.

Los tanques sépticos se utilizan para recibir y tratar las descargas de aguas residuales provenientes de zonas habitacionales, hospitales, escuelas e iglesias que no tienen sistemas de drenaje o alcantarillado. Para desarrollar la operación, el tanque séptico cumple con tres funciones:

- Eliminación de sólidos: Los sólidos mayores sedimentarán en el fondo o se elevarán a la superficie y de esta forma, el tanque retiene los sólidos y descarga el efluente clarificado.
- Tratamiento biológico: Dentro del tanque se efectúa un proceso biológico anaerobio que se denomina “**Séptico**”, por medio del cual, la materia orgánica se transforma en líquidos y gases que no resultan ofensivos a la salud pública.

- Almacenamiento de natas y lodos: Los lodos son el resultado de la sedimentación de partículas sólidas en el fondo del tanque séptico, la nata es la porción parcialmente sumergida de sólidos flotantes aglomerados en la superficie del fluido del tanque. Los lodos y en menor proporción las natas se digieren y se reduce su volumen.

Es común encontrar una gama muy amplia de formas de disponer el agua con el nombre genérico de fosa séptica, sin embargo no todas cumplen con el objetivo de liberar los acuíferos de contaminación, debido que suelen confundirse con pozos negros o de absorción, en los que las aguas son infiltradas al suelo sin un verdadero tratamiento. También suelen llamarse de este modo a tanques de sedimentación y almacenamiento que son vaciados periódicamente, para trasladarlos a un sitio donde se puedan arrojar con impunidad.

La fosa séptica fue inventada por Jean Luis Mourais en 1881. Las fosas sépticas pueden tener uno o varios compartimentos, las más completas tienen 3 compartimentos en el primero se decantan las materias densas (lodos) y la materia ligera forma una espuma flotante. Luego el agua pasa por unos orificios a media altura al siguiente compartimento donde se produce el mismo proceso pero en menos cuantía. La tercera cámara cumple las funciones de sedimentador secundario para clarificar el agua antes de ser dispuesta en un campo de oxidación. En las fosas se produce digestión anaerobia de los lodos, parte se licúan o volatilizan y otra parte se depositan siendo necesaria su retirada periódica. El problema básico de las fosas sépticas es que suelen acumular lodos hasta el punto de saturación, lo cual se incrementa si la fase anaerobia no funciona correctamente. El efluente debe necesariamente ser tratado en un campo de oxidación antes de infiltrar al suelo y los lodos extraídos necesitan tratamiento adicional.

Tras un cierto tiempo de detención, habitualmente de 1 a 3 días y con un mínimo admisible de aproximadamente 0,5 días para que las dimensiones sean aceptables, el líquido parcialmente tratado sale del tanque séptico y se elimina, a menudo en el suelo, a través de pozos de percolación o de zanjas de infiltración. Muchos de los problemas que plantean los tanques sépticos se deben a que no se tiene suficientemente en cuenta la eliminación del efluente procedente del tanque séptico.

Uno de los principales objetivos del diseño del tanque séptico es crear dentro de este una situación de estabilidad hidráulica, que permita la sedimentación por gravedad de las partículas pesadas. El material sedimentado forma en la parte inferior del tanque séptico una capa de lodo, que debe extraerse periódicamente. La eficiencia de la eliminación de los sólidos por sedimentación puede ser grande (> del 80% de los sólidos en suspensión). Sin embargo, los resultados dependen en gran medida del tiempo de retención, los dispositivos de entrada y salida y la frecuencia de extracción de lodos (período de limpieza del tanque séptico). Si llegan repentinamente al tanque grandes cantidades de líquido, la concentración de sólidos en suspensión en el efluente puede aumentar temporalmente, debido a la agitación de los sólidos ya sedimentados.





A fin de facilitar la decantación del material sedimentable y evitar el escape de las natas y de los sólidos removidos, tanto a la entrada como a la salida del tanque séptico se colocan placas o tubos deflectores.

La grasa, el aceite y trozos materiales menos densos que flotan en la superficie del agua formando una capa de espuma pueden llegar a endurecerse considerablemente. El líquido pasa por el tanque séptico entre dos capas constituidas por la espuma y los lodos.

El líquido contenido en el tanque séptico experimenta transformaciones bioquímicas, pero se tiene pocos datos sobre la destrucción de los agentes patógenos.

La materia orgánica contenida en las capas de lodo y espuma es descompuesta por bacterias anaerobias, y una parte considerable de ella se convierte en agua y gases. Los lodos que ocupan la parte inferior del tanque séptico se compactan debido al peso del líquido y a los sólidos que soportan. Por ello su volumen es mucho menor que el de los sólidos contenidos en las aguas servidas no tratadas que llegan al tanque. Las burbujas de gas que suben a la superficie crean cierta perturbación en la corriente del líquido. La velocidad del proceso de digestión aumenta con la temperatura, con el máximo alrededor de los 35°C. El empleo de desinfectantes en cantidades anormalmente grandes hace que mueran las bacterias, inhibiendo así el proceso de digestión.

La falta de control en el funcionamiento de los tanques sépticos puede conducir a que las bacterias formadoras de metano, que juegan un papel importante en el proceso de estabilización de la materia orgánica, no permanezcan el tiempo necesario en el tanque como para cumplir con su función mineralizadora de manera completa.

Existen tres tipos principales de fosas sépticas para el tratamiento de aguas negras en sistemas individuales: (1).- Fosas sépticas de concreto, estas son las más comunes; (2).- Fosas de fibra de vidrio, las que cada vez se usan más ya que son fáciles de llevar a los lugares “de acceso difícil”; y (3).- Fosas plásticas/de polietileno, las que se venden en muchos tamaños y figuras diferentes. Al igual que las fosas de fibra de vidrio, estas fosas son livianas, de una sola unidad y pueden llevarse a los lugares “de acceso difícil”.

Todas las fosas deben ser herméticas para evitar que el agua entre o salga del sistema. El agua que entra al sistema puede saturar el campo de absorción, y así causar que el sistema falle.

Los tanques sépticos, como la mayor parte de las plantas de tratamiento de aguas residuales se construyen para acondicionar desechos domésticos, por lo que no es recomendable la descarga de grandes cantidades de productos químicos hacia los tanques séptico por que inhibirá la digestión de los lodos sedimentados y consecuentemente puede producir la liberación de malos olores o la incrustación o

corrosión de las paredes de la tubería que conduce las aguas residuales hacia el tanque séptico.

La presencia de grandes cantidades de grasas en las aguas residuales también afecta el funcionamiento de los tanques sépticos por lo que se hace necesario la construcción de trampas de grasas en aquellas instalaciones cuyas aguas residuales son ricas en estos elementos, caso de lavanderías, restaurantes, panaderías, fábricas de embutidos, etc.

Los tanques sépticos que no estuvieran precedidas de trampas de grasa, probablemente formarán con mayor rapidez la capa sobrenadante de natas conocida también como espuma y que no son retirados conjuntamente con los lodos durante la limpieza periódica del tanque séptico.

La aplicación de cloro solo se recomienda ejecutar cuando la descarga del efluente del tanque séptico o de las zanjas de filtración son descargados a un cuerpo o curso de agua.

Como el efluente de los tanques sépticos es anaerobio y contiene probablemente un elevado número de agentes patógenos, que son una fuente potencial de infección, no debe usarse para regar cultivos ni descargarse canales o aguas superficiales sin permiso de la autoridad sanitaria de acuerdo al reglamento nacional vigente.

El tanque séptico con su sistema de eliminación de efluentes (sistema de infiltración), presenta muchas de las ventajas del alcantarillado tradicional. No obstante, es más costoso que la mayor parte de los sistemas de saneamiento in situ. También requiere agua corriente en cantidad suficiente para que arrastre todos los desechos a través de los desagües hasta el tanque.

## ***2.2.- Tanques de decantación-digestión***

Los sistemas de depuración por tanques de decantación-digestión o Tanques Imhoff son análogos a sistemas de depuración por fosas sépticas con las ventajas de la separación de la decantación y de la digestión permitiendo una mejor sedimentación del lodo. No precisan instalación de ningún equipo mecánico y permiten caudales un poco más altos ( $100 \text{ m}^3$ ); sin embargo, para su uso concreto es necesario que las aguas residuales pasen por los procesos de tratamiento preliminar de cribado y remoción de arena.

El tanque Imhoff o tanque de doble cámara se utiliza como unidad de tratamiento de las aguas residuales provenientes de zonas residenciales que cuentan con sistema de alcantarillado. Se emplea como tratamiento previo a la aplicación del terreno, biodiscos, etc., y supone una mejora muy notable respecto del funcionamiento de la fosa

séptica. Este tipo de tratamiento fue usado muy ampliamente antes que se hiciera común la digestión de los lodos con calentamiento en tanques separados.

El tanque Imhoff puede ser de forma rectangular o circular y no cuentan con dispositivos para el calentamiento de lodos, siendo las unidades del tipo circular las empleadas en el tratamiento de pequeños caudales de aguas residuales. El tanque Imhoff consta de dos partes: a) sedimentador y b) digestor de lodos. El sedimentador se ubica en la parte superior de la estructura y tiene la función de remover los sólidos sedimentables y flotantes, mientras el digestor que ocupa la parte inferior del tanque Imhoff está destinado a la estabilización anaeróbica de los lodos. También se podría considerar el área de ventilación y acumulación de natas como un tercer compartimento.

El sedimentador separa el material precipitable y flotante. El material precipitable o sedimentable se deposita en el fondo del sedimentador desde donde pasa a través de la abertura con traslape ubicada en su parte inferior hacia el digestor anaeróbico para su estabilización o mineralización a temperatura ambiente, mientras que los flotantes quedaran retenidos en la superficie del sedimentador donde pantallas ubicadas a la salida impedirán el escape del referido material.

Los gases producidos como consecuencia de la digestión de los lodos ascienden a la superficie y escapan por la zona de ventilación. Por el tipo de diseño (solape) de la abertura ubicada en la parte inferior del sedimentador se impide que los gases y los sólidos arrastrados por estos gases ingresen a la cámara de sedimentación.

Los lodos acumulados en el digestor se extraen periódicamente y se conducen a lechos de secado, en donde el contenido de humedad se reduce por infiltración, después de lo cual se retiran y dispone de ellos enterrándolos o pueden ser utilizados para mejoramiento de los suelos.

## **5. TRATAMIENTO DE AGUAS PARA USO INDUSTRIAL**

### **5.1. Introducción**

El agua es un recurso fundamental para la actividad industrial, su utilización ha variado a lo largo del tiempo, disminuyendo su aprovechamiento local o puntual como fuente de energía primaria (molinos y turbinas), pero continúa siendo imprescindible para el desarrollo industrial usada como medio de reacción y disolvente o como regulador térmico en calderas y torres de refrigeración.

Se entiende por *usos industriales del agua* los que realizan aquellas industrias que, por su singularidad, tamaño y suministro, generalmente individualizado (independiente, desde luego, de las redes urbanas de abastecimiento), hacen que deba

analizarse de un modo diferente y separado a los usos domésticos. Se trata por tanto de grandes fábricas, polígonos industriales, importantes y específicos usuarios industriales del agua tales como centrales térmicas o nucleares, etc. Los consumos de las pequeñas industrias que forman parte de los asentamientos urbanos (talleres, etc.) con suministro directo desde redes municipales están computados en los usos domésticos del agua.

En cualquier caso, el uso industrial del agua es, en general, un uso consuntivo y prioritario. No obstante, dentro de los usos industriales del agua hay que exceptuar de dicho carácter consuntivo el volumen de agua utilizado para refrigeración de instalaciones industriales, incluidas centrales térmicas y nucleares en circuito abierto, que siendo un uso industrial, no tiene ese carácter consuntivo, pues no disminuye ni la cantidad ni la calidad del recurso (la refrigeración en circuito cerrado sí tendría carácter consuntivo).

Los requisitos necesarios para el suministro industrial son generalmente los mismos que para usos domésticos e incluso, en algunos casos como la fabricación de circuitos impresos, son más elevados. Cada industria requiere, según las características de cada una, aguas apropiadas en caudal suficiente y de composición constante, con exigencias de calidad variables según el sector de que se trate. En general, deben desecharse las aguas residuales, las contaminadas, las turbias, las que tengan un pH inferior a 6,5 o superior a 8,5 o las que contengan sustancias disueltas en proporción superior a 1.500 mg/litro. En cualquier caso, las industrias consumen agua fundamentalmente para los cuatro fines siguientes:

**a).- Como materia prima en un proceso de fabricación.** El agua es materia prima que se incorpora a numerosos productos industriales. En la industria química son numerosos los procesos en los que, para la obtención del producto, se aporta agua, tanto en fase líquida como en fase gaseosa (caso por ejemplo de la obtención del amoníaco). La mayoría de procesos productivos han evolucionado hacia tecnologías que proporcionan una mayor calidad de producto, pero que al mismo tiempo exigen una calidad más alta en las materias primas que intervienen, y entre ellas el agua de proceso. Es por eso que los de acondicionamientos de la misma han de ser más intensos y consecuentemente más caros. Especial importancia tiene el uso del agua en la industria alimentaria (cárnicas, bebidas embotelladas, etc.), pues en este caso el agua no solo constituye la mayor proporción del producto acabado, sino que se requiere agua de una calidad superior a la mayoría de otros usos industriales.

**b).- Como forma de transporte.** El transporte hidráulico se emplea en la minería desde la antigüedad y se ha utilizado incluso en la construcción de diques y presas en que los materiales arcillosos se conducían en suspensión hasta el emplazamiento en que se colocaban por decantación. Actualmente, aparte de los usos mineros, tal vez sean las industrias de la celulosa y el papel las que más utilicen el agua para transporte.



**c).- Como elemento de transferencia de calor, tanto en procesos de calentamiento como de enfriamiento.** La forma tradicional de suministrar energía calorífica a diversas zonas de un complejo industrial es la generación de vapor, si bien en plantas más modernas el vapor está siendo sustituido por agua caliente, que presenta menores costes de instalación en sus circuitos. La circulación de agua fría es el sistema más común de enfriamiento en la industria. Es este un uso sin excesivas exigencias de calidad y normalmente se satisface mediante bombeo desde una corriente o depósito abundante, con devolución a dicha fuente del agua calentada. En industrias costeras el papel de ese gran depósito lo puede cumplir el mar, con tal de que se resuelvan los problemas de corrosión producidas por el agua marina.

**d).- Como contenedor de vertidos industriales.** El agua es el vehículo más común de transporte de deshechos y vertidos.

La gestión de la calidad del agua es, por lo tanto, uno de los múltiples factores de la gestión industrial. Antes de emprender cualquier acción hemos de conocer las necesidades reales del proceso, tanto de caudales como de calidades. Con este análisis podemos obtener en muchos casos una reducción de caudales, además de apreciar problemas debidos al uso del agua tanto en el proceso como en el producto final.

Las técnicas de tratamiento de agua cubren una amplia variedad de procesos de purificación. Si el agua fuese siempre pura, o si siempre tuviese una composición constante de los contaminantes presentes, su acondicionamiento para un uso industrial determinado sería simple y uniforme. Sin embargo éste no es el caso, y la variedad de las impurezas, junto con las alternativas diferentes de tratamiento que podemos elegir, cada una óptima para unas condiciones determinadas, requieren una evaluación experta, basada en unos conocimientos especializados.

El tratamiento tiene por objeto evitar la introducción de sustancias extrañas en un proceso de fabricación, los problemas asociados a la corrosión o incrustación en usos energéticos, o la perturbación ecológica del medio receptor de un agua residual. La evaluación del proceso idóneo de acondicionamiento debe considerar tanto las impurezas presentes como las especificaciones de calidad final exigidas.

Se debe hacer hincapié y decir que no existe ningún procedimiento simplista ni producto químico apropiado para el tratamiento de todas las clases de aguas. Cada caso se debe considerar individualmente.

Debido a la importancia que reviste la generación de vapor y refrigeración para los procesos industriales, a lo largo de este capítulo haremos mención expresa de dichos procesos y los tratamientos más generales que son necesarios para garantizar un agua adecuada para dichos usos.

## 5.2. Problemas derivados del uso del agua

El uso industrial del agua lleva consigo problemas de incrustación, de corrosión y de contaminación biológica.

El término incrustación en su acepción industrial más general, se refiere a cualquier depósito sobre las superficies de los equipos, sin embargo, se tiende a matizar el tipo de depósito existente y de esta forma se reserva el término incrustación para significar un depósito duro y adherente formado en el mismo lugar que se presenta, por componentes inorgánicos presentes en el agua.

Los depósitos menos adherentes se conocen como depósitos, lodos, sedimentos, precipitados, etc. y pueden haberse formado en el lugar que se encuentran o haberse formado en otros puntos del sistema y haber sido transportados.

Los principales problemas debidos a las incrustaciones y demás depósitos son la reducción del diámetro de las tuberías, la disminución de la transferencia de calor, el origen de corrosiones localizadas y en general un aumento de los costes de mantenimiento de las instalaciones.

En algunos casos, por el contrario, la incrustación puede resultar beneficiosa tal como ocurre con las películas de carbonato cálcico que se forman en las redes municipales de agua, que protegen de la corrosión a las tuberías de suministro.

El fenómeno de corrosión se puede definir de una manera amplia como la destrucción o deterioración de un material por reacción química o electroquímica con su entorno. En algunos casos el ataque químico va acompañado de ataque físico y entonces se denomina corrosión-erosión.

En condiciones normales de exposición los productos de la corrosión son óxidos más o menos hidratados, carbonatos y sulfuros.

Los problemas debidos a la corrosión son económicamente importantes, pues no sólo cabe considerar las toneladas de materiales a reponer sino también las interrupciones en los procesos de producción que pueden llegar a tener costes muy elevados. También debe considerarse el factor seguridad que viene muy directamente afectado por los fenómenos de corrosión.

Los fenómenos de contaminación biológica se aprecian fundamentalmente en los sistemas de refrigeración, que proporcionan un medio favorable para el desarrollo de muchos microorganismos, especialmente bacterias, algas y hongos. Agravándose el problema, en el caso de instalaciones que potencialmente son lugar de refugio y, por tanto, posibles focos de infección por *Legionella* por los posibles problemas que pueden suponer para las personas y para el entorno.



Las acumulaciones de microorganismos forman unos lodos, que debido a su naturaleza adherente a menudo actúan como un agente de cimentación de otros materiales inorgánicos presentes en el sistema, tales como los productos de corrosión. Por otra parte también cabe considerar el hecho de que el crecimiento biológico puede producir corrosiones graves en el metal e incluso perforaciones.

### **5.3. Tratamientos de agua para generadores de vapor**

La calidad del agua de alimentación a la caldera repercute directamente sobre el buen funcionamiento de la misma, así como sobre la vida de muchas de las partes y piezas que forman el equipo del generador de vapor.

Para poder entender la importancia de la calidad del agua de alimentación de calderas, debemos conocer las características del agua, y las necesidades específicas que debe tener para ser usada en una caldera.

Es muy raro que el agua disponible en una industria se obtenga de una captación propia o de una distribución municipal y que tenga la calidad suficiente para ser aplicada directamente en la generación de vapor. El tratamiento de aguas para calderas es una compleja rama de la química del agua. Se debe decir que no existe ningún procedimiento simplista ni producto químico apropiado para el tratamiento de todas las clases de aguas. Cada caso se debe considerar individualmente.

#### **5.3.1. Generador de vapor**

Debido a las amplias aplicaciones que tiene el vapor, principalmente de agua, las calderas son muy utilizadas en la industria para generarlo en aplicaciones como:

- Esterilización, es común encontrar calderas en los hospitales, las cuales generan vapor para esterilizar los instrumentos médicos, también en los comedores con capacidad industrial se genera vapor para esterilizar los cubiertos así como para la elaboración de alimentos en marmitas.
- Calentar otros fluidos, por ejemplo, en la industria petrolera es muy utilizado el vapor para calentar a los petróleos pesados y de esta forma mejorar su fluidez.
- Generar electricidad a través de un ciclo Rankine. Las calderas son parte fundamental de las centrales termoeléctricas.

Una *caldera* es un intercambiador de calor en el que la energía se aporta generalmente por un proceso de combustión, o también por el calor contenido en un gas



que circula a través de ella. En ambos casos, el calor aportado se transmite a un fluido, que se vaporiza o no, y se transporta a un consumidor, en el que se cede esa energía.

Según la ITC-MIE-AP01, caldera es todo aparato a presión en donde el calor procedente de cualquier fuente de energía se transforma en energía utilizable, a través de un medio de transporte en fase líquida o vapor.

Es común la confusión entre caldera y generador de vapor, pero su diferencia es que el segundo genera vapor sobrecalentado. Aunque, debido al cambio de estado que se produce en el fluido en las calderas que generan vapor, nosotros utilizaremos indistintamente un término u otro en lo concerniente a este apartado.

El vapor saturado es aquél al que no se le ha calentado por encima de la temperatura de saturación. Se le denominará seco si ha sido totalmente evaporado, o húmedo con un % de humedad si no lo ha sido. El vapor sobrecalentado será aquél que, por el contrario, sí ha sido calentado después de su completa evaporación, modificando su temperatura para la misma presión. Al estar sobrecalentado puede entregar o perder parte de su energía sin condensar, con los beneficios que esto conlleva para su transporte o uso en turbinas.

Aunque se pueden hacer muchas clasificaciones de calderas de acuerdo con diferentes criterios, se puede decir que hay dos tipos generales de calderas: las pirotubulares (tubos de humo) y las acuotubulares (tubos de agua) y dentro de éstas últimas se diferenciará entre calderas con calderín agua-vapor y calderas de paso único. Adicionalmente, las calderas se pueden clasificar en alta y baja presión, de vapor saturado o sobrecalentado.

**1.- Pirotubulares, o de tubos de humos:** Se caracterizan porque la llama de la combustión se forma dentro de cada hogar cilíndrico de la caldera, pasando los humos generados por el interior de los tubos de los pasos siguientes (normalmente dos), para ser conducidos a la chimenea de evacuación. De ello, su otro nombre de calderas de tubos de humo.

En estas calderas, tanto los hogares, como los tubos de humo, están en el interior de la virola, y completamente rodeados de agua. De ello, su otro nombre, poco usual, de calderas de hogar interior.

Para generar vapor, se regula el nivel medio del agua en su interior, de forma que varíe dentro de una banda prevista, sirviendo su cámara superior de separador del vapor generado, desde donde sale al consumo por la tubuladura de salida.

Para generar agua sobrecalentada, la caldera está completamente inundada, siendo iguales los conductos de entrada y salida de agua.





**2.- Acuotubulares, o de tubos de agua:** Se caracterizan porque la llama de los quemadores se forma dentro de un recinto formado por paredes tubulares en todo su entorno, que configuran la llamada cámara de combustión, pasando los humos generados por el interior de los pasos siguientes, cuyos sucesivos recintos están también formados por paredes tubulares en su mayoría.

La cualidad que diferencia a estas calderas es, que todos los tubos que integran su cuerpo, están llenos de agua o, al menos, llenos de mezcla agua-vapor en los tubos hervidores, en los que se transforma parte de agua en vapor cuando generan vapor como fluido final de consumo. Estas calderas pueden generar indistintamente, vapor o agua sobrecalentada.

Cuando se destinan a la generación de vapor disponen de un calderín superior y, normalmente, de otro inferior. El calderín superior trabaja como separador del vapor generado y el inferior, cuando existe, como distribuidor del agua a través de los tubos hervidores. También disponen de un paquete tubular de precalentamiento del agua de alimentación, llamado genéricamente economizador, que se puede instalar fuera del cuerpo de caldera en calderas de mediana potencia, o dentro de éste en calderas de gran potencia. En estas calderas el flujo por los tubos hervidores se realiza mediante circulación natural.

En las calderas de mediana potencia es opcional la previsión de un sobrecalentador del vapor generado; en las calderas de gran potencia, siempre se prevé este sobrecalentador.

Cuando las calderas se destinan a la generación de agua sobrecalentada no disponen de calderines, o la distribución de agua a los tubos de las paredes se realiza por medio de colectores.

En las calderas acuotubulares la circulación del agua por su interior es forzada por medio de las bombas de circulación.

En las calderas de generación de vapor se regula el nivel medio de agua en el calderín superior, de forma que varíe dentro de una banda prevista, sirviendo la cámara superior de separador del vapor generado, desde donde sale al consumo por la tubuladura de salida.

**3.-** Se entenderá por *calderas de alta presión* aquellas que operan a una presión superior a 1 bar. Una ventaja de usar calderas de alta presión es la reducción del tamaño de la caldera y de las tuberías de vapor para la misma capacidad de transporte de calor, debido al aumento de la densidad del vapor con la presión. Esto puede ser particularmente importante si los consumidores del vapor están a alguna distancia de la caldera. Además la energía disponible en el vapor aumenta con la presión, algo esencial cuando el vapor se usa en una turbina.



4.- Otra clasificación habitual de las calderas sería por el *tipo de tiro*. El aire necesario para la combustión se aporta normalmente a las calderas mediante ventiladores. Según estos ventiladores actúen sobre el suministro de aire, diremos que las calderas son de tiro forzado, inducido o equilibrado. Las primeras son aquellas en las que el ventilador, situado en la entrada, introduce el aire en la caldera, y por tanto son de hogar presurizado. Las segundas son las que teniendo el ventilador en la salida aspiran los gases de la combustión y los envían a la chimenea, siendo por tanto de hogar en depresión. Cuando coexisten ambos ventiladores la caldera se denomina de tiro equilibrado, haciéndose que el hogar trabaje un poco en depresión para evitar escapes de gases.

En general, en una caldera o generador de vapor se fijan tres objetivos principales:

- Conseguir un vapor puro.
- La mayor eficacia energética posible.
- Una operación fiable y segura.

La característica principal del tratamiento del agua, es que al cumplir con esto la caldera logra los objetivos esperados en el ámbito de producción, y además no pierde su vida útil tan pronto.

### 5.3.2. Aguas para calderas

La definición de aguas para calderas es: *“aquellas aguas de cualquier procedencia que pueden utilizarse con ventaja y seguridad para alimentar calderas”*.

El agua en general procede de los ríos, lagos, pozos, y aguas lluvias. Para los efectos de alimentación de generadores de vapor y fines industriales en general tienen primordial importancia los ríos y pozos. Por la misma índole de su procedencia no se puede evitar que ella arrastre y disuelva impurezas que la hacen inapta para el consumo humano y también industrial. El agua obtenida de ríos, pozos y lagos es denominada agua bruta y no debe utilizarse directamente en una caldera.

Las aguas pueden considerarse según la composición de sales minerales presentes como se indica a continuación:

1.- *Aguas Duras*: Importante presencia de compuestos de calcio y magnesio, poco solubles, principales responsables de la formación de depósitos e incrustaciones.

2.- *Aguas Blandas*: Su composición principal está dada por sales minerales de gran solubilidad.



**3.- Aguas Neutras:** Componen su formación una alta concentración de sulfatos y cloruros que no aportan al agua tendencias ácidas o alcalinas, o sea que no alteran sensiblemente el valor del pH.

**4.- Aguas Alcalinas:** La forman las que tienen importantes cantidades de carbonatos y bicarbonatos de calcio, magnesio y sodio, las que proporcionan al agua la reacción alcalina elevando en consecuencia el valor del pH presente.

Las impurezas que suele traer consigo el agua sin tratamiento proveniente de las fuentes descritas se puede clasificar de la siguiente manera:

**a).- Sólidos en suspensión:**

- Barro (arcilla)
- Materiales orgánicos (madera y bacterias)
- Arena (sílice)

**b).- Sales disueltas:**

- Sales de calcio y magnesio
- Cloruro de sulfato alcalinos

**c).- Gases disueltos:**

- Aire (oxígeno-nitrógeno)
- Anhídrido carbónico

Entre los problemas causados por las impurezas que suele traer consigo el agua sin tratamiento podemos reseñar los siguientes:

**1.- Embancamiento:** El barro y la sílice ayudados por algunas sales disueltas producen embancamientos sumamente rápidos, es decir, se depositan en el fondo de la caldera, dificultando o impidiendo la libre circulación y salida del agua.

Estas impurezas deben ser retiradas casi en su totalidad antes del ingreso a la caldera, sometándose a un proceso de filtración.

**2.- Incrustaciones:** Son depósitos en forma de costras duras producidos por las sales de calcio y magnesio que se adhieren en las superficies metálicas de la caldera. Los depósitos también pueden originarse en la precipitación de sólidos en suspensión, recibiendo el nombre de lodos adheridos.

Por su carácter de aislante, afectan la transferencia de calor al agua reduciendo la capacidad de la caldera, provocan recalentamiento de los tubos con el consiguiente



peligro de deformaciones o roturas y restringen el paso del agua (calderas acuotubulares).

**3.- Corrosiones:** Es el deterioro progresivo de las superficies metálicas en contacto con el agua, debido a la acción de oxígeno, anhídrido carbónico y algunas sales como el cloruro de sodio. También pueden ser causadas por compuestos químicos derivados de tratamientos de agua mal aplicados (desincrustantes).

**4.- Arrastre:** Ocurre cuando el vapor que sale de la caldera lleva partículas de agua en suspensión. El arrastre se puede dividir en dos partes:

- Elementos transportados mecánicamente por el vapor y agua.
- Elementos que se volatilizan en el vapor.

Los sólidos disueltos en esas partículas se depositan en los elementos y equipos donde circulan y se utilizan el vapor, provocando problemas de funcionamiento de los sistemas de vapor. Este fenómeno está muy asociado a la formación de espuma en la superficie del agua. Entre sus causas se tiene la presencia excesiva de sólidos totales disueltos, alta alcalinidad, materiales oleosos, sustancias orgánicas y detergentes.

**5.- Fragilidad Cáustica:** Es el agrietamiento (pequeñas fisuras) del metal de los tubos y elementos sometidos a esfuerzos mecánicos. Se produce cuando el agua contiene hidróxido de sodio en exceso.

#### Resumen de las impurezas más importantes de las aguas brutas disponibles

IMPUREZA	FORMULA	FORMA	EFECTOS
Dióxido de carbono	CO <sub>2</sub>	Gas disuelto.	Corrosión y bajo pH, si la alcalinidad es baja.
Sulfuro de hidrogeno	SH <sub>2</sub>	Gas disuelto.	Corrosión.
Oxígeno	O <sub>2</sub>	Gas disuelto.	Corrosión.
Turbiedad o materias en suspensión	-	Sólidos no disueltos.	Depósitos en tuberías, aparatos, calderas.
Color y materia orgánica	-	Sólidos disueltos o no disueltos.	Ensuciamiento y espumas.
Aceite	-	Coloidal	Depósitos y espumas.
Dureza	Ca <sup>+</sup> , MG <sup>++</sup>	Sólidos disueltos.	Incrustaciones.
Alcalinidad	CO <sub>3</sub> H <sup>-</sup> CO <sub>3</sub> <sup>=</sup> . OH <sup>-</sup>	Sólidos disueltos.	Espumas, arrastres, desprendimiento de CO <sub>2</sub> fragilidad cáustica.
Sulfatos	SO <sub>4</sub> <sup>=</sup>	Sólidos disueltos.	Aumento salinidad. Con Ca <sup>++</sup> forma incrustaciones muy duras.
Cloruros	Cl <sup>-</sup>	Sólidos disueltos.	Aumenta salinidad y corrosividad.
Sílice	SiO <sub>2</sub>	Sólido disuelto. A veces coloidal.	Incrustaciones. Depósitos sobre turbina.
Hierro, manganeso	Fe, Mn	Sólido disuelto.	Depósitos en tuberías y caldera.
Sólidos disueltos	-	Sólidos disueltos.	En alta concentración, forman espumas y depósitos en turbina.



Como el agua es un compuesto que contiene impurezas, para poder ocupar esta agua natural en la caldera debe someterse a diferentes procesos y de esta manera conseguir cumplir, como mínimo, con las siguientes condiciones: **a).**- Debe ser clara, con la turbidez menor a 10 ppm. Cuando esta turbidez es superior, debe ser sometida a filtración; **b).**- Debe estar totalmente exenta de dureza no carbónica; **c).**- La dureza total no debe exceder de 35 ppm.; **d).**- Debe estar prácticamente exenta de aceites; **e).**- Debe estar prácticamente exenta de oxígeno; y **f).**- Debe contener un bajo contenido de sílice.

La calidad del agua de alimentación, y del agua del interior de las calderas, está reguladas desde el punto de vista de seguridad de utilización del sistema, y el método de tratamiento adecuado vendrá determinado por dichas normas de seguridad, las especificaciones del fabricante y un estudio económico de los costos de inversión y operación.

### **5.3.3. Tratamientos para purificar el agua de calderas**

El objetivo de los tratamientos es reducir y evitar los tres principales problemas asociados a la generación de vapor: **(1).**- La formación de incrustaciones. **(2).**- La corrosión. **(3).**- Los arrastres.

Para conseguir estos objetivos, el agua de aporte suele someterse a un tratamiento externo que reduzca la presencia de contaminantes a un nivel conveniente. Para contrarrestar el efecto de los contaminantes residuales se añaden, además los aditivos químicos apropiados. El tercer elemento de control de la calidad del agua en el ciclo de vaporización-condensación es la purga de una parte del agua del calderín para mantener las concentraciones máximas admisibles.

En definitiva, el agua de alimentación de las calderas debe ser tratada, por que de lo contrario se pueden presentar problemas serios en el interior de las calderas, utilizándose algunos de los siguientes procedimientos:

- Físicos
- Químicos
- Térmicos
- Eléctricos
- Mixto

#### **1.- Tratamientos Físicos**

**1.1.- Filtración:** Su objetivo es extraer partículas grandes en suspensión. Se realiza antes que el agua llegue a la caldera (externo). Los filtros pueden ser de mallas



(pequeñas instalaciones) o de grava y arena, consiguiendo la eliminación de los siguientes parámetros:

- Sólidos Suspendidos
- Colores
- Olores
- Sabores
- Cloro Residual
- Microorganismos

Todo esto se traduce en los siguientes beneficios: (•).- *Evitar las incrustaciones*: se evita la deposición de los sólidos sobre las superficies de los equipos donde la transferencia de calor es necesaria. (•).- *Evitar la corrosión*: se controla la pérdida de metal constituyente de la estructura de los equipos. (•).- *Evitar el desarrollo microbiológico*: se elimina la presencia de material orgánico inconveniente. (•).- *Evitar el deterioro de las resinas de intercambio iónico*: no se permite la llegada de sólidos abrasivos ni materiales oxidantes, como el cloro, hasta los suavizadores.

**1.2.- Desaireación:** También llamada desgasificación. Consiste en extraer los gases disueltos (oxígeno, anhídrido carbónico). Se consigue calentando el agua de alimentación, proporcionando una gran área de contacto agua-aire (ducha o agitación).

Finalidad: (•).- *Reducir el contenido de oxígeno disuelto el agua de calderas*. (•).- *Reducir el contenido de carbonatos en el agua de alimentación*. (•).- *Precalear el agua de alimentación de las calderas*.

Beneficios: (•).- *Disminuir el consumo de barredor de oxígeno*: Para mantener el residual requerido habrá que dosificar menos. (•).- *Precalear el agua de alimentación de las calderas*: Se evita el choque térmico y las dilataciones y contracciones anómalas de los tubos, placas y domos, que causan daño a los sistemas de generación de vapor. (•).- *Disminuir la potencialidad de incrustación por carbonatos*: Se reduce el contenido de bióxido de carbono.

**1.3.- Extracciones o purgas:** Consisten en evacuar ciertas cantidades de agua desde el fondo de la caldera o del domo, con el objeto de disminuir o mantener la cantidad total de sólidos disueltos y extraer lodos (en el caso de purga de fondo). La extracción puede ser continua o intermitente. La magnitud de la extracción depende de la concentración de sólidos disueltos a mantener en la caldera y la del agua de alimentación.

## 2.- Tratamientos Químicos

Consiste en suministrar internamente sustancias químicas que reaccionan con las impurezas del agua, precipitando sólidos insolubles o en suspensión, eliminando mediante purgas. Según el objetivo que persiguen, las sustancias se clasifican en:



**2.1.- Reductoras de dureza o ablandadoras:** La palabra dureza se refiere a la cantidad de compuestos de calcio y magnesio disueltos en el agua, correspondientes al contenido de iones alcalinotérreos. Estos minerales tienen su origen en las formaciones rocosas calcáreas, y pueden ser encontrados, en mayor o menor grado, en la mayoría de las aguas naturales. Las sales más comunes en el agua dura son sulfatos, carbonatos, bicarbonatos y cloruros de calcio, magnesio, hierro y otros.

**a).**- Hidróxido de sodio o soda cáustica ( $\text{NaOH}$ ): (•).- Precipita las sales de magnesio. (•).- Aumenta la alcalinidad. (•).- Regeneración de resinas de intercambio iónico

**b).**- Carbonato de sodio o soda comercial ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ): (•).- Precipita las sales de calcio. (•).- Son de bajo costo. (•).- Produce acidez.

**c).**- Hidróxido de calcio o cal ( $\text{Ca(OH)}_2$ ): (•).- Precipita las sales de calcio y magnesio.

**d).**- Fosfatos de Sodio ( $\text{Na}_2\text{HPO}_4$ ): (•).- Precipita sales de calcio. (•).- Debe mantenerse en exceso.

**e).**- Intercambio de Iones: El intercambio iónico es una reacción química reversible, que tiene lugar cuando un ión de una disolución se intercambia por otro ión de igual signo que se encuentra unido a una partícula sólida inmóvil. Este proceso tiene lugar constantemente en la naturaleza, tanto en la materia inorgánica como en las células vivas.

Por sus propiedades como disolvente y su utilización en diversos procesos industriales, el agua acostumbra a tener muchas impurezas y contaminantes. Las sales metálicas se disuelven en el agua separándose en iones, cuya presencia puede ser indeseable para los usos habituales del agua. Los intercambiadores iónicos son usados para la separación de sales (cationes y aniones) del agua.

Se utilizan ablandadores naturales o sintéticos (zeolitas o permutitas): son sustancias granuladas insolubles, las cuales tienen en su estructura molecular radicales ácidos o básicos que pueden ser intercambiados. Los iones positivos o negativos fijados en estos radicales, serán reemplazados por iones del mismo signo en solución en el líquido en contacto con ellos.

Hoy en día, las sustancias intercambiadores de iones son llamadas también resinas, hay tres categorías de resinas:

**1).**- *Resinas tipo gel*: tienen una porosidad natural limitada entre las distancias intermoleculares. Esta es una estructura de microporo.



2).- *Tipo microporos o de tipo unión cruzada suelta*: tienen una porosidad artificial adicional la cual es obtenida por la adición de sustancias diseñadas para esta proposición.

3).- *Resinas isoporosas*: Se caracterizan por tener un tamaño de poro uniforme, con lo que aumenta la permeabilidad de los iones en el interior de la red. Son resinas de alta capacidad, regeneración eficiente y de costo más bajo que las resinas macroporosas.

Son utilizadas persiguiendo los siguientes fines: (•).- *Eliminación de calcio y magnesio*: dureza del agua cruda, la cual se convertirá en agua de alimentación de calderas y/o reposición para sistemas de enfriamiento. (•).- *Evitar las incrustaciones*: se elimina la formación y deposición de los carbonatos, sulfatos e hidróxidos de calcio y/o magnesio como consecuencia del aumento de la temperatura sobre las superficies de transferencia de calor, en desaireadores, calderas, intercambiadores de calor, etc. (•).- *Suministro de agua suavizada constante*: la buena calidad y suficiente cantidad del agua de alimentación de calderas y de cualquier otro sistema estará garantizada. (•).- *Durabilidad de las resinas de intercambio iónico*: se controlan los ciclos de lavado y regeneración de los sistemas de intercambio iónico.

**2.2.- Inhibidores de corrosión**: Los inhibidores de corrosión, son productos que actúan ya sea formando películas sobre la superficie metálica, tales como los molibdatos, fosfatos o etanolaminas, o bien entregando sus electrones al medio.

*a).*- Sulfito de Sodio ( $\text{NaSO}_3$ ): Reacciona con el oxígeno produciendo sulfatos de sodio. Se utiliza para calderas de presiones menores a  $30 \text{ Kg/cm}^2$ .

*b).*- Hidracina ( $\text{N}_2\text{H}_4$ ): Reacciona con el oxígeno produciendo nitrógeno y agua sin producir sólidos disueltos. Apta para calderas de alta presión.

*c).*- Aminas: Utilizadas para el control de la corrosión en tuberías de retorno de condensado (corrosión por anhídrido carbónico).

**2.3.- Inhibidores de fragilidad cáustica**: Debe usarse donde el agua tiene características de fragilidad.

*a).*- Nitratos y nitritos de sodio ( $\text{NaNO}_3$  -  $\text{NaNO}_2$ ).

**2.4.- Inhibidores de adherencias por lodos**: Evita la formación de lodos adherentes y minimizan el arrastre.

*a).*- Agentes orgánicos: Taninos, almidones, derivados de aguas marinas.





### 3.- Tratamientos Térmicos

Mediante el calentamiento del agua hasta su temperatura de ebullición, se precipitan todos los bicarbonatos en forma de carbonatos insolubles que decantan y se extraen del fondo del economizador, eliminando de esta manera la dureza temporal y los gases disueltos. Este procedimiento no separa la dureza permanente.

### 4.- Tratamientos Eléctricos

Por este sistema basado en la electrolisis del agua, el zinc en planchas que se apenan a tubos de chapas, defiende las planchas de hierro de la acción de las sales incrustantes.

### 5.- Tratamiento Magnético

Los minerales en el agua llegan a afectarse cuando se exponen a un campo de fuerza magnético y pierden sus habilidades para formar sedimentos. De esta forma se remueve la existencia de sedimentos y elementos de corrosión.

### 6.- Tratamiento Mixto

Consisten en emplear algunos desincrustantes químicos y a su vez calentar el agua eliminando ambas durezas.

**Tratamientos para transformar las aguas brutas en aguas de alimentación o reposición de calderas**

IMPUREZA	TRATAMIENTO	RESIDUO NORMAL
Dióxido de carbono	Aireación (por tiro de aire). Desgasificador a vacío Desgasificador térmica	5-10 ppm. 2-5 ppm. 0-2 ppm.
Sulfuro de hidrógeno	Aireación. Coagulación con sales de hierro. Cloración.	0-1 ppm. 0-0.5 ppm. 0 ppm.
Oxígeno	Desgasificación a vacío Desgasificación térmica	0-0.3 ppm. 0-0.007 ppm
Turbiedad	Filtración con o sin coagulante Coagulación en clarificador. Coagulación en clarificador más filtración.	0-1 ppm. 5-10 ppm. 0-1 ppm.
Color, materia orgánica	Coagulación, cloración y filtración Filtración en carbón activo.	Color 5-10 ppm. Variable
Aceite (coloidal).	Coagulación en clarificador y filtración Filtración con pre-floc (aceite < 50 ppm.).	Variable 0.5-1 ppm.
Dureza	Ablandamiento con suavizadores. Ablandamiento con cal, frío o caliente. Ablandamiento con cal y suavizadores (proceso caliente). Ablandamiento, ciclo H débil Desmineralización.	0-2 ppm. CaCO <sub>3</sub> Variable 0-2 ppm. CaCO <sub>3</sub> Variable 0-2 ppm. CaCO <sub>3</sub> Variable
Alcalinidad	Descarbonatación con cal en frío Descarbonatación con cal en caliente. Descarbonatación ciclo H débil Descarbonatación ciclo Cl <sup>-</sup> Desmineralización	35 ppm. CaCO <sub>3</sub> 20 ppm. CaCO <sub>3</sub> 20-30 ppm. CaCO <sub>3</sub> 5-15 ppm. CaCO <sub>3</sub> 0-5 ppm. CaCO <sub>3</sub>
Sulfatos	Desmineralización Precipitación con bario en clarificador Desulfatación ciclo Cl <sup>-</sup>	0-5 ppm. CaCO <sub>3</sub> 25 ppm. CaCO <sub>3</sub> 0-5 ppm. CaCO <sub>3</sub>
Cloruros	Desmineralización	0-5 ppm. CaCO <sub>3</sub>
Nitratos	Desmineralización	0-1 ppm. CaCO <sub>3</sub>
Sílice	Tratamiento con cal en caliente. Desmineralización	2 ppm. SiO <sub>2</sub> 0.02-1 ppm. SiO <sub>2</sub>
Hierro	Aireación y filtración (poco hierro). Aireación, clarificación y filtración (mucho hierro).	0.1-03 ppm. 0.1-03 ppm.



En conclusión:

El agua a pesar de encontrarse en grandes cantidades, no siempre se encuentra en las mejores condiciones, por tal razón es necesario realizar un tratamiento previo antes de ser usada.

Se puede disponer de una gran cantidad de métodos y sustancias para el tratamiento del agua usada en las calderas, cada uno de estos se aplican dependiendo la necesidad. Es de suma importancia conocer las sustancias que se pueden encontrar en el agua, ya que a partir de estas podremos determinar el tratamiento adecuado a realizarse.

El tratamiento de agua de alimentación, o reposición, tendrá como misión el acondicionar las aguas brutas disponibles en cada caso para que cumplan las prescripciones de los fabricantes de calderas y la normativa legal existente. El tratamiento a prever no podrá ser por tanto siempre el mismo, si no que dependerá de las características de las aguas brutas.

Los tratamientos internos son aquellos en los que se realice la adición directa de productos químicos al interior de la caldera, normalmente con la doble finalidad de prevenir o reducir la formación de incrustaciones para aumentar el intercambio de calor en las superficies, y de evitar o disminuir la corrosión de las partes metálicas, ya sean producidas por gases o por diferentes sustancias disueltas.

El objetivo principal de un tratamiento es, por tanto, preservar la integridad de los materiales constituyentes de los circuitos, para mantener la operación de los sistemas de la planta en el nivel óptimo de disponibilidad, seguridad, fiabilidad, economía y eficiencia durante la vida útil de la instalación.

Realizando un correcto tratamiento de las aguas usadas en las calderas, podremos evitar gran cantidad de daños como corrosión, incrustaciones o taponamientos. Elevaremos la eficacia de la máquina y ahorraremos tiempo y dinero en mantenimiento (algunas veces innecesario).

Un mal tratamiento y mantenimiento de la caldera tiene como consecuencia su mal funcionamiento y por ende los procesos industriales en los que esta se inserta no funcionarán de la manera correcta, acarreando problemas como atrasos en la producción, los que pueden resultar muy costosos para la empresa. La calidad del agua influye directamente sobre el rendimiento de la caldera y la seguridad.

El rendimiento de la caldera es la relación que existe entre el calor total entregado por el combustible al quemarse y el calor contenido en el vapor. Las incrustaciones producen una capa aislante que se adhieren a las superficies de calefacción de la caldera y que dificultan la transmisión del calor entregado por el combustible. Por esta razón los gases no transmiten todo su calor al agua, perdiéndose combustible y disminuyendo el rendimiento.

Las incrustaciones aíslan las superficies de calefacción del agua, provocando un calentamiento excesivo de éstas, las que pueden llegar a perder gran parte de su resistencia sufriendo deformaciones permanentes, roturas y explosiones.

Por otra parte, cuando a causa del trabajo propio de la caldera, la incrustación se rompe parcial o totalmente, pone en contacto repentino el agua a presión con la plancha recalentada y por lo tanto la debilita, produciendo un aumento de presión interna tal que puede causar explosión. La acumulación de lodos en los tubos dificulta la transferencia de calor resultando el sobrecalentamiento de los mismos. La corrosión del metal de los tubos o la formación de óxidos puede ser debida a la alta concentración de productos químicos en el agua de la caldera, y la formación de espumas se debe, principalmente, a la presencia de sólidos en suspensión y de otras sustancias orgánicas.

Todo esto debe evitarse mediante el tratamiento de agua para las calderas, mediante métodos químicos, físicos o eléctricos, o una combinación de ellos, atacando los distintos elementos que causan problemas en el correcto funcionamiento de las calderas.

**Resumen: Parámetros y contaminantes habituales - Tratamientos correctores**

Parámetro	Representación	Problema típico que plantea	Tratamientos correctores
Turbidez	NTU o UNF	Deposiciones en las líneas de agua, equipos y calderas	Coagulación, sedimentación, filtración
Color	Unidades de color	Puede generar espumación en las calderas. Obstaculiza los métodos de precipitación	Coagulación, filtración, cloración, adsorción
pH	[H <sup>+</sup> ]	Disolución y precipitación de metales	Neutralización con ácidos y bases
Conductividad	μS cm <sup>-1</sup>	Resultado de los sólidos ionizables, la conductividad alta puede aumentar las características corrosivas del agua	Todo proceso que reduzca los sólidos disueltos. Procesos de cal-sosa, Desmineralización
Sólidos disueltos	SD	Altas concentraciones de materia total disuelta determinada por evaporación, interfieren en los procesos de tratamiento y generan espumas en las calderas	Procesos de cal, intercambio iónico, ósmosis inversa, electrodesionización, destilación
Sólidos suspendidos	SS	La materia no disuelta suspendida determina gravimétricamente, taponas las líneas de circulación de los fluidos, y produce depósitos e incrustaciones en líneas y equipos de vapor	Filtración, coagulación, sedimentación
Dureza	Ca y Mg expresados como CaCO <sub>3</sub>	Principales causantes de las incrustaciones en los equipos de intercambio de calor generan cuajadas con los jabones y posteriormente barro y lodos	Ablandamiento cal-sosa, ósmosis inversa, intercambio iónico, tratamientos internos, agentes activos a las superficies
Alcalinidad	CO <sub>3</sub> <sup>-2</sup> , HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> , OH <sup>-</sup> expresados como CaCO <sub>3</sub>	Formación de espumas y transporte de sólidos en el vapor. Promueven la fragilidad del acero de las calderas. Generación de CO <sub>2</sub> por los carbonatos y bicarbonatos, potencial fuente de la corrosión	Procesos de cal-sosa, acidificación, intercambio iónico, ósmosis inversa, electrodesionización, destilación
Dióxido de carbono	CO <sub>2</sub>	Corrosión en las líneas de agua y particularmente las de vapor y condensados	Desgasificación, neutralización con bases y con aminas
Oxígeno	O <sub>2</sub>	Corrosión en las líneas de agua, equipos de intercambio de calor, calderas y circuitos de retorno de condensados	Desgasificación, sulfito sódico, inhibidores de la corrosión
Grasas	Expresado como grasa o materia extraída al cloroformo	Costras, lodos y espumas en las calderas. Dificulta la transferencia de calor	Separadores de grasas, coagulación, filtración
Sulfatos	SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup>	Añade sólidos al agua. Combinado con el calcio forma las incrustaciones de sulfato cálcico	Procesos de desmineralización, destilación
Cloruros	Cl <sup>-</sup>	Añade sólidos al agua y aumenta las características corrosivas del agua	Procesos de desmineralización, destilación
Nitratos	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Añade sólidos al agua, es útil para controlar la fragilidad metálica de las calderas	Procesos de desmineralización, destilación
Sílice	SiO <sub>2</sub>	Genera incrustaciones de las calderas y circuitos de calor	Adsorción, intercambio iónico, destilación
Hierro	Fe <sup>+2</sup> y Fe <sup>+3</sup>	Puede generar color y es fuente de precipitados y lodos en las líneas de agua y de vapor	Coagulación, filtración, intercambio iónico, agentes activos a las superficiales



## 5.4. Tratamiento de aguas de refrigeración

Muchos procesos industriales utilizan el enfriamiento, como medio para alcanzar las condiciones óptimas de operación en cuanto a eficiencia, rendimiento y seguridad se refieren. Este enfriamiento puede realizarse utilizando aire o agua o ambos a la vez. El proceso de enfriamiento implica la transferencia de calor, desde una sustancia hasta otra. La sustancia que cede o pierde calor decimos que se enfría (independientemente de su temperatura), mientras que la que recibe el calor la llamamos medio refrigerante.

La mayoría de instalaciones industriales usan agua como medio de enfriamiento. Las principales razones para utilizar agua son su disponibilidad en la mayor parte de zonas industriales y el calor específico elevado del agua. Pero, lamentablemente, el agua no se encuentra pura en la naturaleza. Normalmente contiene impurezas que se clasifican en cuatro grandes grupos a saber: gases disueltos, minerales en solución, microorganismos y material suspendido de diferentes naturalezas y composiciones. Adicionalmente, el agua de enfriamiento también puede contaminarse cuando se usa en ciertos procesos o por las características mismas del sistema utilizado para lograr ese enfriamiento.

Las aguas de refrigeración de cada circuito tienen que ser tratadas para cumplir dos requisitos principales: minimizar la cantidad de agua de refrigeración y proteger la planta entera contra procesos de corrosión, sedimentación y crecimiento biológico.

### 5.4.1. Tipos de instalaciones de refrigeración

Los diseños y los equipos de los sistemas de enfriamiento por agua varían ampliamente dependiendo de la aplicación. Se incluyen intercambiadores de calor, tuberías de transferencia, bombas, componentes para torres de enfriamiento y válvulas. Con mucho, la mayor variedad en los diseños implica a los intercambiadores de calor.

En una primera división, los sistemas de enfriamiento por agua son abiertos o cerrados, y el flujo del agua es tanto de un solo paso como circulante. Los tres tipos básicos de sistemas de enfriamiento por agua son de un paso, abiertos recirculantes (evaporativos), y cerrados recirculantes (no evaporativos):

*1.- Sin recirculación (o de un paso):* agua tomada de una fuente térmica enorme (de temperatura estable; ríos, lagos, etc.), la que es descargada – luego de ser usada – hacia la fuente de origen. En general, no se le realiza tratamiento (gran costo y problemas de contaminación). Lo único que se hace es bajar la temperatura (no más de 10 °F), lo que se logra usando grandes caudales.



Las primeras instalaciones de refrigeración eran sistemas abiertos. Estos sistemas se siguen utilizando en pequeñas instalaciones, o en grandes sistemas donde el agua es abundante y no llegan a alcanzarse aumentos importantes de la temperatura del agua, como suele ser el caso de los condensadores de grandes centrales térmicas situados al lado del mar o grandes ríos.

*2.- Con recirculación en circuito abierto:* se recircula el agua de enfriamiento, extrayéndose el calor absorbido por contacto directo con el aire atmosférico (transferencia de calor) y por evaporación (transferencia de masa), generalmente en torres de refrigeración.

El sistema semiabierto típico es la torre de refrigeración, aunque existen otras alternativas para conseguir la vaporización de una parte del agua. El elevado calor latente del agua permite que por cada gramo de agua evaporada se puedan enfriar muchos gramos de agua líquida, en varios grados centígrados.

Las torres de refrigeración pueden ser de tiro natural o de circulación artificial (tiro forzado o inducido).

Las torres de tiro natural, en general, tienen alturas considerables y una forma hiperbólica que les da óptimo tiro natural del aire y una buena estabilidad estructural.

Las torres de circulación artificial o mecánica hacen circular el aire, que se llevará el agua evaporada mediante un tiro forzado o inducido. La selección de un tipo u otro de tiro depende de las condiciones particulares de la instalación. En el tiro forzado los ventiladores se encuentran en la base del equipo y fuerzan el aire contra las gotas de agua en descenso. Como el aire que impulsan es seco, los ventiladores no sufren de corrosiones o depósitos de sólidos.

En el tiro inducido los ventiladores se sitúan en la parte superior de la torre e inducen una circulación del aire, más cruzada o más en contracorriente según el diseño. En contracorriente se consiguen eficacias máximas porque el agua más fría está en contacto con la entrada de aire. En flujo cruzado el aire encuentra las resistencias menores y se reducen los consumos de potencia. En todos los casos se emplean unos separadores de gota que reducen las pérdidas de agua por arrastre.

*3.- Con recirculación en circuito cerrado:* el sistema completamente cerrado no es más que un circuito intermedio, donde se aprovechan las particulares características del agua para absorber calor en un paso intermedio, y en los que finalmente la liberación de calor al medio receptor se hace a través de una segunda superficie de intercambio.

Normalmente, el agua no entra en contacto directo con el material a enfriar sino que el intercambio de calor se realiza a través de una pared, en general metálica, buena conductora del calor. Esta pared es la superficie de intercambio de calor, que lo mismo que el agua y el fluido a enfriar están encerrados en un recipiente llamado



intercambiador de calor. Los intercambiadores de calor tienen dos diseños comunes: de casco o envolvente y tubos, y de placas de armazón. Los intercambiadores de calor de casco y tubos son muy comunes.

### 5.4.2. Problemas derivados del agua y su tratamiento

Los circuitos de refrigeración de las instalaciones industriales pueden llegar a tener graves problemas de incrustación, corrosión, depósito de fangos y de crecimiento microbiológico (contaminación biológica). Y dentro de la contaminación biológica, se puede tener un foco de infección por *Legionella*, agravándose muchísimo el tema, pues puede provocar una problemática de salud humana. Por este motivo es fundamental estudiar bien el problema y en cada caso definir el mejor programa de tratamiento del agua de refrigeración.

Las características del agua y de la instalación permiten prever el tipo de tratamiento que convendrá aplicar a una instalación determinada. Sin embargo, es el seguimiento posterior de la instalación el que permitirá definir el programa más indicado por la eficacia de los resultados y el ajuste del costo operativo.

#### 1.- Problemas que se presentan en sistemas de enfriamiento

Entre los problemas causados por las características de los procesos de refrigeración y por las impurezas que suele traer consigo el agua sin tratamiento, podemos reseñar los siguientes:

**1.1.- Crecimiento microbiano:** Es uno de los problemas más frecuentes: agua a temperaturas próximas a 35°C, altas concentraciones de O<sub>2</sub>, luz UV, etc., constituyen un microclima adecuado para crecimiento de microorganismos (algas, bacterias, hongos).

Los microorganismos se introducen en los sistemas de refrigeración con el agua de aporte o a partir del aire que cruza las torres.

La formación de revestimientos orgánicos es llamada “biofilm”. Uno de los efectos que se producen es la obstrucción de tuberías, relleno, etc., disminuyendo la eficiencia del sistema. A menudo, estos biofilms son colonizados por *Legionella* que puede proliferar si las condiciones son adecuadas y causar problemas graves sobre la salud. Por ello, es necesario mantener un correcto control microbiológico sobre cualquier circuito de refrigeración, considerado instalación de riesgo. Además, otros microorganismos favorecen la corrosión: absorben o desprenden O<sub>2</sub>, favorecen reacciones catódicas (generan H<sub>2</sub>), forman depósitos (favorecen la aireación diferencial).



Las torres de refrigeración, que usan madera como material de construcción, resultan deterioradas por el ataque de la celulosa y la lignina por los microorganismos, especialmente hongos.

El uso de aguas sin tratar (mar, río, pozos, etc.) puede permitir el crecimiento y colonización de crustáceos que pueden obstruir los intercambiadores de calor en pocas semanas. Por esta razón, en muchas ocasiones el uso de biocidas debe ser aplicado en el agua de aporte.

**1.2.- Depósitos e incrustaciones:** El agua utilizada para enfriamiento es un agua de origen natural, que se verá sometida a calentamiento, aún cuando sea mucho menor al que se da en un generador de vapor. Por lo tanto, encontraremos formación de incrustaciones, principalmente  $\text{CaCO}_3$  (también  $\text{Mg(OH)}_2$ ,  $\text{CaSO}_4$ ).

La formación de depósitos reduce la eficiencia de los sistemas de refrigeración ya que actúan de aislante para la transferencia de calor y reducen la sección de paso en los elementos de distribución. Además, los diseños que no han previsto una tolerancia para tener cuenta de la formación de depósitos en los intercambiadores de calor, puede que no consigan los valores mínimos de proceso. Los depósitos también aceleran la corrosión debida a la formación de células de oxidación diferencial.

Algunas consideraciones a tener en cuenta con relación a posibles depósitos en los sistemas de enfriamiento, son las precauciones de que:

$$\begin{aligned} \text{SD} &< 2500 \text{ mg/L} \\ [\text{Ca}^{++}]_{\text{CaCO}_3} &< 300 \\ [\text{Ca}^{++}]_{\text{CaCO}_3} \times [\text{SO}_4^{=}]_{\text{CaCO}_3} &< 500.000 \\ [\text{SiO}_2] &< 120 \text{ mg/L} \end{aligned}$$

Un programa de control del poder incrustante de las aguas de refrigeración comporta las mediciones de la dureza, Ca y Mg, del pH, la alcalinidad m (TAC) y la temperatura que definen la concentración de iones carbonato y bicarbonato y la solubilidad del carbonato. También hay que controlar la concentración de sulfatos, sílice y otros contaminantes tales como hidrocarburos, glicoles, amoníaco, etc. Los índices de estabilidad de Langelier y Ryznar permiten determinar el comportamiento agresivo o incrustante del agua.

**1.3.- Corrosión:** Los sistemas de enfriamiento contienen diversos materiales metálicos, como aceros, acero galvanizado, aleaciones de cobre, etc. A esto, debe agregarse los productos utilizados para controlar incrustaciones o crecimiento microbiano, que estarán disueltos en el agua del circuito, lo que constituye un medio muy complejo. Además, en las torres de enfriamiento, al estar el agua en permanente contacto con el aire, estamos seguros de que, en cada recirculación la concentración de oxígeno disuelto en la misma será muy cercana a la correspondiente a la de saturación de oxígeno disuelto en esas condiciones.



Por lo tanto, los sistemas de enfriamiento sufren muchas formas de corrosión y fallas. La diversidad en el ataque lo causan las diferencias en el diseño, la temperatura, el flujo, la química del agua, la composición de las aleaciones, y la operación de los sistemas de enfriamiento por agua. Se podrían incluir una variedad casi interminable de características químicas en las corrientes de los procesos en los sistemas de enfriamiento por agua.

Este problema es grave pues la corrosión se dará en los equipos más caros: condensadores de amoníaco, compresor, intercambiadores de calor, compresor de tornillo, etc., ocurriendo en forma localizada.

## **2.- Tratamientos correctores**

El programa de tratamiento variará mucho según el tipo de instalación. En un sistema totalmente abierto es imposible realizar un tratamiento externo completo. Debido a los grandes caudales de agua que puede implicar, el tratamiento químico se aplicará normalmente a niveles bajos para que resulte económicamente viable sin intentar reducir al 100 % la corrosión potencial del agua bruta. La prevención de la formación de incrustaciones y el crecimiento microbiológico seguirán criterios similares. Los problemas derivados de depósitos de fangos se minimizarán a base de un acondicionamiento o tratamiento dispersante, pero es fundamental diseñar correctamente el sistema hidráulico para evitar zonas de baja velocidad.

Por el contrario, un sistema completamente cerrado con pequeñas pérdidas y los pequeños aportes de agua correspondientes, hace económico y recomendable utilizar un agua de aporte de alta calidad y un tratamiento químico interno completo. Normalmente, los sistemas cerrados se emplean en circuitos de refrigeración críticos para los que es aconsejable realizar un control de calidad permanente. Con un buen acondicionamiento de las aguas los problemas de corrosión e incrustaciones son mínimos y al no haber contacto con la atmósfera es fácil evitar el crecimiento de microorganismos. En consecuencia, tampoco son de esperar problemas de depósitos. Es fundamental conseguir las menores pérdidas posibles de agua porque los problemas serán proporcionales al aporte de agua necesario.

Los sistemas semiabiertos, de los que forman parte las torres de refrigeración, constituyen el grupo más complejo y cuyo tratamiento de agua requiere un balance también más complejo entre efectividad y costo.

La forma de controlar el contenido en sólidos del agua circulante en estos sistemas semiabiertos es el mantenimiento de una purga controlada. En tal caso hay que hacer un aporte de agua que compense la evaporación, el arrastre de gotas de agua por el aire, especialmente en condiciones de viento, y la purga. Para los tratamientos químicos internos se puede emplear un índice de residencia del aditivo, que representa





el tiempo que se necesitaría para que su concentración se redujese a la mitad, teniendo en cuenta las pérdidas, evaporación, purga y aporte de agua. Los aditivos destinados a evitar la corrosión, incrustación y depósito se suelen añadir en forma continua preferentemente, en función del agua de aporte y la relación de concentraciones. La adición de biocidas puede seguir programas irregulares; a veces con una dosis continua, mas dosis de choque periódicas, para contrarrestar la adaptación de los microorganismos a los fenómenos regulares.

Así pues, a la vista de todos los factores considerados, el tratamiento de este tipo de sistemas deberá basarse en los siguientes conceptos:

- Tratamiento del agua de reintegro (aporte).
- Tratamiento del agua de recirculación.
- Tratamiento frente a microorganismos.

En función de las demandas, características del agua e instalación existirán diferentes programas de tratamiento, de los cuales hacemos reseña de los siguientes:

**2.1.- Control de depósitos e incrustaciones:** La prevención de la formación de depósitos e incrustaciones se inicia con los tratamientos previos externos. Tanto la decantación como la filtración convienen que floculen y decanten bien, usando adecuadamente los polielectrolitos.

Los iones que pueden dar lugar a precipitados, se eliminan por ablandamiento y desmineralización del agua. Sin embargo, estos procesos tienen un coste elevado y solamente se aplican en aguas de circuitos cerrados, pero raramente en los circuitos de recirculación abierta.

Otra alternativa clásica es un tratamiento en paralelo de una fracción del agua circulante, hasta un 5 %, mediante filtración, o incluso un ablandamiento con cal previo a la filtración con arena o antracita.

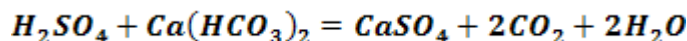
También es posible utilizar sistemas de tratamiento que modifiquen algunas de las sustancias presentes o sus características, para poder trabajar en condiciones más seguras. Estos sistemas pueden agruparse en las siguientes dos categorías:

*a) Tratamiento ácido*

La adición de ácido es uno de los más antiguos tratamientos aplicados para evitar la formación de incrustaciones. El ácido neutraliza la alcalinidad del agua y evita la precipitación de carbonato. El ácido sulfúrico es el más usado por su disponibilidad y precio. La solubilidad del sulfato cálcico es muy superior a la del carbonato y normalmente no precipita; sin embargo, una adición excesiva de ácido o la operación a relaciones de concentración excesivas, pueden provocar la formación de una incrustación de sulfato cálcico. Para evitarlo se recomienda no superar el valor de



500.000 ppm para el producto de las concentraciones de iones calcio y sulfato, o el valor de 1.500 ppm para su suma.



Aunque se pueden usar otros ácidos, hay que emplearlos con precauciones. El ácido clorhídrico añade iones cloruro que son muy corrosivos, y el ácido nítrico es un oxidante fuerte que puede ser causa de corrosiones.

En general, este tratamiento disminuye la probabilidad de formación de  $CaCO_3$ , pero es un tratamiento peligroso por agregar ácido al sistema (requiere un buen control). Los modernos programas de tratamiento han eliminado la adición de ácido.

#### *b) Tratamiento alcalino*

Otra opción es mantener el pH del circuito en valores alcalinos y agregar productos que:

- mantengan el calcio en solución; secuestrantes o dispersantes (fosfonatos, poliacrilatos).
- modifiquen la estructura cristalina de los precipitados de calcio, para que formen lodos que puedan ser removidos por purga (polifosfatos, polímeros de bajo PM – menor a 100.000 – por ej. Polimaleatos, copolímeros de polimaleatos con poliestireno sulfonado).

Los productos utilizados como inhibidores de incrustación son variados y numerosos, pero casi todos ellos, con excepción de los de tipo quelante o secuestrante, funcionan por algún tipo de mecanismo de superficie, si bien para muchos de ellos se desconoce el mecanismo preciso de actuación.

Hay suficientes indicios de que ciertos materiales pueden funcionar por varios mecanismos dependiendo de la concentración del aditivo y de su particular entorno.

**2.2.- Control de la corrosión:** Una posible solución, sería modificar las características agresivas del agua. El control de la concentración de oxígeno disuelto, por ejemplo por agregado de sulfito, sería excesivamente caro a la vez que ineficiente.

Es frecuente el uso de inhibidores de corrosión, los que actúan protegiendo la superficie del material metálico, cuya acción es la de despolarizar (disminuir o detener el flujo eléctrico) las reacciones de corrosión.

Los inhibidores de corrosión se clasifican como catódicos, anódicos o mixtos dependiendo de la reacción de corrosión que cada uno controla. La inhibición normalmente es el resultado de uno o varios de los mecanismos generales. En el

primero la molécula del inhibidor es adsorbida sobre la superficie del metal por un proceso de quimisorción, formando una delgada película protectora, por sí sólo o en conjunción con iones metálicos. En el segundo mecanismo, los inhibidores simplemente obligan al metal a formar su propia protección de óxidos metálicos, y de este modo aumentan su resistencia. En el tercer mecanismo el inhibidor reacciona con las sustancias potencialmente corrosivas del agua.

Los inhibidores de corrosión más comunes son:

- anódicos: molibdatos, ortofosfatos, nitritos, silicatos;
- catódicos: zinc, polifosfatos, fosfonatos.

La elección del inhibidor adecuado viene condicionada por los parámetros de diseño del sistema de refrigeración y por la composición del agua.

Raramente se utiliza un inhibidor de la corrosión único; en general, se mezclan dos o más inhibidores completando sus ventajas individuales y superando las limitaciones respectivas. A menudo la mejor protección del sistema se consigue combinando un inhibidor catódico con uno anódico. Algunas veces se combinan dos inhibidores catódicos, pero muy raramente dos anódicos.

Tanto los inhibidores de corrosión como los de incrustación acostumbran a ser compuestos formulados con múltiples materias activas de forma que se minimice el consumo de productos a la vez que se potencie el rendimiento. Las empresas especializadas disponen de formulaciones propias en que los inhibidores básicos están mezclados con los otros componentes minoritarios.

**2.3.- Control del crecimiento microbiano:** No es viable un control mecánico de los microorganismos que se desarrollan, por lo que se impone un tratamiento químico de los mismos.

Para controlar la acción microbiana se emplean agentes microbiocidas, clasificados en dos grandes grupos: oxidantes y no oxidantes.

El programa de actuación con biocidas es muy particular de cada instalación y debe estar basado en ensayos de cultivo y sensibilidad a los agentes biocidas. Debe considerarse, además, la toxicidad potencial para el medio ambiente.

Los microorganismos son capaces de desarrollar formas resistentes a un medio determinado, de forma que es preciso revisar periódicamente el programa utilizado. Dada la variedad de especies es difícil que un solo tipo de biocida pueda actuar sobre todas las especies y se recurre a combinaciones que demuestren un efecto sinérgico. Para que el programa sea económico a menudo se recurre a combinar un biocida altamente efectivo pero caro, con otro de amplio espectro y menos caro que haga razonable el costo total del programa. El material de construcción puede excluir la



utilización de ciertos biocidas, como ocurre con los oxidantes, cuando la madera figura como un elemento de construcción con la cual tendría contacto directo.

*a) Biocidas oxidantes*

Los biocidas oxidantes, tal y como indica su nombre oxidan la materia orgánica (material celular, enzimas, proteínas, etc.), y por consiguiente provocan la muerte de los microorganismos. Los más habituales son el cloro y el bromo, y sus derivados.

En el caso del cloro y sus derivados, normalmente se forman enlaces estables entre el nitrógeno de las proteínas y el cloro, llevando a la destrucción de los microorganismos. Este tipo de biocidas provocan un efecto secundario sobre las instalaciones tratadas pues incentivan la corrosión. Además su actividad desinfectante tiene una dependencia con el pH.

El ozono, en disolución acuosa, tiene un gran poder oxidante, y reacciona, en forma parecida al cloro, sobre los microorganismos. No es contaminante pero su costo más elevado lo mantiene poco usado.

La presencia de grandes cantidades de materia orgánica y de amoníaco en el agua puede conllevar problemas a la hora de controlar la contaminación biológica con este tipo de biocidas.

*b) Biocidas no oxidantes*

Los biocidas no oxidantes son aquellos que interfieren en el metabolismo celular y/o en su estructura, provocando de esta manera la muerte de los microorganismos. Existen muchos tipos de biocidas no oxidantes pero en general todos cumplen los siguientes requisitos: son más estables y persistentes que los biocidas oxidantes y su actividad es independiente del pH.

Empleados solos, han demostrado tener en algunos tratamientos un carácter biocida superior al de los oxidantes. En muchos programas se emplean combinados para lograr un espectro de actividad más amplio.

Cada biocida de este tipo tiene su mecanismo de actuación particular, no pudiéndose generalizar un mecanismo de actuación para todo el grupo.

El pentaclorofenato y otros fenoles clorados son los biocidas no oxidantes más comunes, solos o mezclados con ciertos tensoactivos aniónicos para aumentar la efectividad biocida.

Los compuestos órgano-estañados son biocidas para muchas bacterias y algas. Se aplican a pH alcalino, a menudo combinados con dispersantes amónicos o aminados.



Los compuestos órgano-sulfurados funcionan por mecanismo competitivo al captar el hierro que las células necesitan para su actividad respiratoria. El metilbistiocianato inhibe el crecimiento de algas, hongos y bacterias en general, pero es especialmente útil para atacar las especies sulfato reductoras desulfovibrio. No es muy soluble en agua y se formula con dispersantes. Se hidroliza rápidamente a pH por encima de 8.

Otros compuestos organosulfurados utilizados son las sulfonas, tionas y tiocarbamatos.

La acroleína se emplea como un sustituto del cloro en aguas muy contaminadas. Al no ser consumido por la materia orgánica interpuesta alcanza, por difusión, cualquier zona bajo tratamiento. Tiene la ventaja adicional de ser fácilmente desactivada por el sulfito sódico y se puede eliminar cualquier residuo antes de su vertido al medio ambiente receptor.

Las sales de amonio cuaternario son agentes tensoactivos catiónicos. Son sustancias desinfectantes, que actúan especialmente en medio alcalino y a temperaturas elevadas. Estos compuestos son particularmente activos contra bacterias Gram positivas, ante las que muestran actividad a concentraciones extremadamente bajas. Su efecto sobre bacterias Gram negativas es menor y requiere concentraciones más elevadas. Su acción bioestática se atribuye a su carga positiva, que forma un enlace electrostático con las partes cargadas negativamente de la pared celular. Estos enlaces electrostáticos creados producen la lisis y la muerte de la célula. También producen la muerte de la célula mediante la desnaturalización de proteínas y distorsión de la permeabilidad de la pared celular, reduciéndose el flujo normal de sustancias vitales y nutrientes para la célula. Los amonios cuaternarios suelen descomponerse en cloroaminas, que son efectivas frente a la *Legionella*, son volátiles y huelen mal. En disoluciones con anticorrosivos/anti-incrustantes se ha observado que los amonios cuaternarios tienen una elevada tendencia a precipitar en presencia de estos aditivos, que suelen contener aniones.

De todo esto se concluye que en un sistema de refrigeración la utilización de una sal de amonio cuaternario es adecuada para realizar un tratamiento biológico, siempre y cuando no se realice un tratamiento anticorrosivo/anti-incrustante. Debido a este inconveniente, su utilización queda reducida a sistemas en los que no se realice un acondicionamiento químico para evitar la corrosión e incrustación del circuito (circuitos de agua contra incendios, depósitos de hormigón, etc.).

Teniendo en cuenta que en un circuito de refrigeración en el agua hay más sustancias en disolución, ya que no sólo se dosifican biocidas, hay que considerar las ventajas e inconvenientes de su utilización en este tipo de sistemas.

## 6. DESALACIÓN DE AGUA

### 6.1. Introducción

Como todos los desarrollos tecnológicos, la desalación de agua de mar o aguas salobres responde a una necesidad, en este caso la necesidad de agua dulce para sustentar la vida y las actividades humanas en aquellas zonas donde este vital elemento es escaso o nulo.

Cuando en determinadas zonas geográficas se produce una situación de escasez de recursos hidráulicos convencionales, se requiere la adopción de ciertas medidas para cubrir las necesidades de la población, o del sector industrial, o del agrícola. Esta escasez de recursos puede ser debida a la falta de lluvias (el ciclo del agua, y la lluvia como forma principal de aportación de caudales), o bien a circunstancias como puede ser una alta presión demográfica en una zona.

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

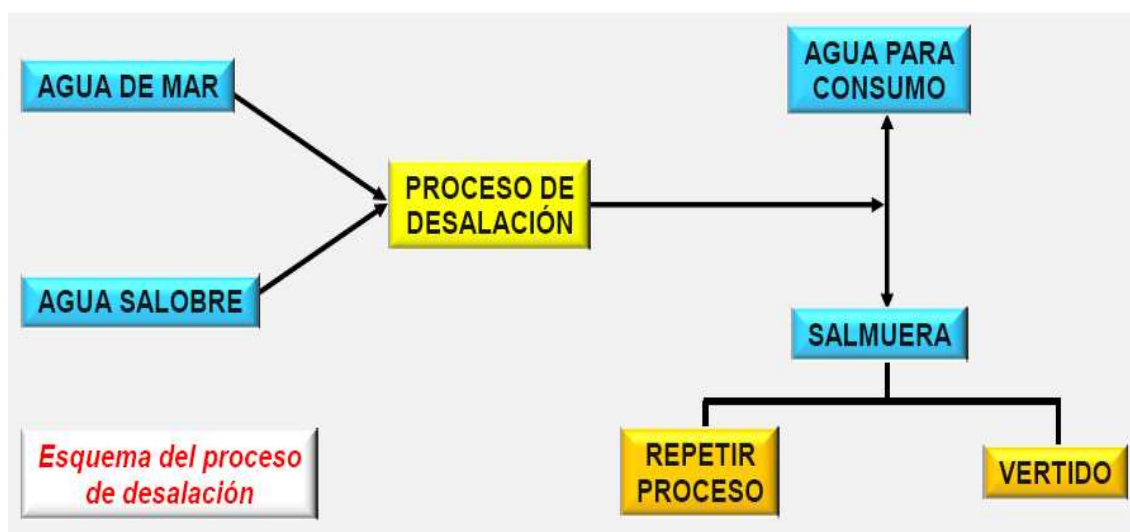
La desalación de las aguas subterráneas y del agua de mar constituye una respuesta prometedora a la escasez de agua mundial. La necesidad de utilización de los procesos de desalación ha ido creciendo a medida que en algunas zonas del mundo se han hecho insuficientes los suministros fiables de agua dulce. Es ampliamente conocido que el 98% del agua del planeta se encuentra en los océanos, los cuales son una verdadera inagotable reserva de agua.

Como su nombre indica desalar es el proceso contrario a salar, es decir quitar sales de un líquido. Por consiguiente, la desalación es el proceso de separación de minerales disueltos (sales) de aguas salobres o de mar para convertirlas en aguas adecuadas para consumo humano, uso industrial o riegos.

En castellano existe también la acepción “desalinizar” para describir el mismo proceso, gramaticalmente correcta pero proveniente de otro proceso de naturaleza diferente al que se estudia aquí: “desalinización” es el proceso de lavado y drenaje de suelos salinizados por efectos del riego de aguas de naturaleza salobre.

Una primera fase de esta «desalación» fue la mezcla con otras aguas de mejor calidad que reducía el contenido salino medio del agua resultante. Sin embargo, de acuerdo con el criterio expresado, no se trataría evidentemente de una desalación.

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



Aunque la desalación propiamente dicha comenzó a finales del siglo XIX en el aprovechamiento del vapor de las calderas de los pequeños barcos para su consumo humano, *en el propio ciclo hidrológico del agua existe el fenómeno de la desalación en el proceso de evaporación de aguas de mar*. Sin embargo, los avances tecnológicos en la desalación del agua han sido muy lentos, y además han resultado muy caros, no siendo asequibles durante años a la mayoría de las poblaciones que necesitaban de ellos. Generalmente todos los procesos de desalación más antiguos estaban relacionados con el fenómeno de la evaporación de aguas con contenido salino, con la utilización de vapor de proceso o energía solar, hasta la aparición en la década de 1960 de las membranas con calidad suficiente para filtrar concentraciones de agua de mar. A partir de ahí, este tipo de tecnologías ha sido más rápidamente desarrollada que otro tipo de procesos, especialmente en España debido a las calidades del agua introducida en sus módulos.

La desalación, que inicialmente tuvo una aplicación fundamentalmente para usos urbanos o domésticos, ha derivado posteriormente hacia otros como la industria y posteriormente la agricultura y esto se ha debido principalmente a la irrupción de nuevas tecnologías más baratas y sencillas de implantación y de menor consumo energético. Debe resaltarse que éste ha sido el principal motor de la investigación.

La dependencia energética que tienen todas las tecnologías llevó a partir de los años 1960 a buscar un ahorro energético, que hasta entonces no había sido tenido muy en cuenta.

Las nuevas tecnologías han conseguido reducir a un tercio el consumo de energía en las instalaciones de agua de mar en los últimos 35 años y a una décima parte en las instalaciones de agua salobre.

Precisamente estos pasos adelante son los que han permitido que la desalación haya podido llegar a zonas aisladas y con recursos económicos limitados y al sector agrario.

De los numerosos procesos existentes para desalación de agua, sólo unos pocos han alcanzado un status comercial de importancia. Los diversos procesos están agrupados de acuerdo con el fenómeno implicado. La elección de un proceso u otro viene condicionado por las características físico-químicas del agua de alimentación, por la producción necesaria y por la fuente de energía disponible para impulsar la planta de desalación. Los costos de tratamiento por unidad de agua producida varían ampliamente, y dependen del tipo de agua (salobre/mar) y la cantidad de energía necesaria.

Está claro que los acuíferos se pueden agotar y no proporcionar agua; y los embalses se pueden vaciar, desafortunadamente, y no dar más lugar a trasvases, como ya ha ocurrido en algunas ocasiones. Las desaladoras, en cambio, si están bien planteadas y realizadas, pueden seguir funcionando ininterrumpidamente, sin ningún tipo de servidumbres o limitaciones, con independencia del clima y de otros condicionantes de muy variadas índoles, cualquiera que sea su tipo y el del agua a tratar. Dependerán sólo de nosotros mismos, lo que es otra gran ventaja.

Por supuesto, la existencia de desaladoras, en número cada vez mayor, nos obligará —como cualquier otra instalación industrial— a tomar medidas para evitar impactos ambientales que, en este caso, se suelen traducir en un elevado consumo energético, emisiones de gases, vertidos de efluentes con alto contenido salino, y el impacto visual y acústico en el entorno, si no se hacen debidamente. Para evitarlo, habrá que intentar reducir el consumo de energías no renovables, el agregado de productos químicos y la corrosión de materiales, además de buscar alternativas a la excesiva cloración, a la vez que desarrollar sistemas de evacuación de salmueras, con máxima dilución, o de un aprovechamiento beneficioso y alternativo de las mismas, dadas sus grandes posibilidades.

## **6.2. El agua a desalar**

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





Las aguas de mar o salobres, materias primas en los procesos de desalación, pueden contener sólidos disueltos y sólidos en suspensión, los cuales pueden precipitar en los tubos de intercambiadores o membranas. Entre estos sólidos pueden distinguirse:

- Arena y Tierras
- Productos de Corrosión
- Productos Incrustantes
- Productos de Tratamiento y Aditivos
- Productos Orgánicos: Fertilizantes y Pesticidas
- Materia Orgánica y Desperdicios
- Microorganismos y Algas, etc.

Pero además, hay otros parámetros que deben ser tenidos en cuenta desde el punto de vista químico:

- Conductividad eléctrica o salinidad.
- Dureza.
- pH.
- Anhídrido carbónico libre.

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

En relación a la salinidad (SD) de los diferentes tipos de aguas que son susceptibles de ser desalados, tomemos como base la definición dada por la International Desalination Association (IDA):

- |                                    |  |
|------------------------------------|--|
| - Agua pura                        | SD* < 500 mg/l                                     |
| - Agua de río o baja concentración | 500 mg/l < SD < 3000 mg/l                          |
| - Agua salobre                     | 3000 mg/l < SD < 20.000 mg/l                       |
| - Agua marina                      | 20.000 mg/l < SD < 50.000 mg/l                     |
| - Salmuera                         | SD > 50.000 mg/l                                   |
| - Agua residual                    | Agua procedente de núcleos urbanos o de industrias |

\*SD= *Sólidos Disueltos Totales*

Los principales cationes que se encuentran en el agua son Calcio ( $\text{Ca}^{++}$ ), Magnesio ( $\text{Mg}^{++}$ ), Sodio ( $\text{Na}^{+}$ ) y potasio ( $\text{K}^{+}$ ), mientras los aniones más abundantes son el cloruro ( $\text{Cl}^{-}$ ), sulfato ( $\text{SO}_4^{-}$ ), carbonato ( $\text{CO}_3^{-}$ ), bicarbonato ( $\text{CO}_3\text{H}^{-}$ ) y en las aguas subterráneas además suelen aparecer en mayores cantidades  $\text{PO}_4^{3-}$  o  $\text{NO}_3^{-}$ . En menor cuantía aparecen otros como hierro, manganeso, aluminio o nitrato, fosfato, fluoruro, etc.

Para todos estos tipos de agua existen en la actualidad tecnologías para desalarlas y ejemplos a nivel mundial de su aplicación industrial. El tipo de sales en cada una de estas aguas es diferente en función de su procedencia, únicamente podemos hablar de una cierta composición standard para el agua de mar y aún ésta es variable de unos mares a otros. Así podemos encontrar agua de mar con una concentración próxima a los 35.000 mg/l en las Islas Canarias, hasta agua de mar con concentraciones del orden de los 47.000 mg/l en el Golfo Pérsico. La temperatura es también un factor determinante a la hora de definir y calcular una planta de desalación de agua. Este factor también es muy variable en función de su procedencia, variando desde temperaturas de 10°C hasta temperaturas próximas a los 43°C en las aguas del Golfo Pérsico.

<i>Composición y características típicas del agua de mar</i>	
Parámetro	Intervalos de referencia
Temperatura, °C	15 – 35
pH	7,9 – 8,1
Sales disueltas, mg/L	30.000 – 45.000
Conductividad, $\mu\text{S}/\text{cm}$ (a 20 °C)	44.000 – 58.000
Bicarbonatos, mg/L	120 – 170
Sulfatos, mg/L	2.425 – 3.000
Cloruros, mg/L	17.500 – 21.000
Bromuros, mg/L	59 – 120
Nitratos, mg/L	0,001 – 4,0
Fluoruros, mg/L	1
Boro, mg/L	4 – 6
Amonio, mg/L	0,005 – 0,05
Sodio, mg/L	9.600 – 11.700
Potasio, mg/L	350 – 500
Calcio, mg/L	375 – 525
Magnesio, mg/L	1.025 – 1.400
Estroncio, mg/L	12 – 14
Sílice ( $\text{SiO}_2$ ), mg/L	0,01 – 7,4
Carbono orgánico total, mg/L	1,2 – 3,0
Nitrógeno orgánico, mg/L	0,005 – 0,03

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

Por otra parte, 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 salobres 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. Aunque generalmente, la utilización de las aguas salobres en los procesos de desalación —en comparación con las de procedencia marina— presenta la ventaja de su inferior salinidad y su menor contaminación biológica, aparte de que el coste de su desalación es menor. En función de los usos de destino, y durante su proceso de elaboración, estas aguas pueden ser tratadas y enriquecidas adecuadamente con aditivos oportunos, que aumentan sus rendimientos, abaratan su empleo y perfeccionan su utilización y resultados. Pero, las cantidades máximas y teóricas de aguas salobres a desalar para completar las necesidades y demandas de agua potable son muy pequeñas, en magnitudes relativas a las aguas marinas.

Como puede observarse, la cantidad de elementos que pueden estar presentes en el agua de alimentación de una planta desaladora es muy larga y no siempre será la misma para todas las aguas. Cada lugar confiere al agua de alimentación unas características físicas, químicas y biológicas, por lo tanto es fundamental caracterizar el agua para cada planta desaladora y para cada punto de instalación.

Se han realizado estudios que demuestran que las medidas tendentes a reducir los elementos presentes en el agua de alimentación pueden dar lugar a costos menores y a alargar la vida de los elementos implicados directamente en los procesos de desalación, lo que conlleva a la larga a precios más competitivos del agua producto.

Si la fuente de agua es superficial (lago, río, canal o mar) ó subterránea de pozos mal concebidos y es un agua muy agresiva, y no se le da un pretratamiento adecuado al agua antes de la alimentación a la planta de desalación, hay una probabilidad muy alta de que la limpieza de los tubos o membranas se vuelva una labor costosa y en algunos casos imposible, acortándose la vida rentable de la planta desaladora.

Así con buenos pretratamientos se pueden alimentar plantas desaladoras hasta con aguas de cloacas, en lo que se ha dado en llamar tratamientos terciarios de los procesos de aguas residuales. De esta forma y 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.

### 6.3. Pretratamientos en desalación

El objetivo de los pretratamientos es acondicionar el agua bruta a las condiciones del proceso de desalación que se le va a dar. El pretratamiento pues, depende del tipo de agua y del tipo de proceso de desalación que se vaya a utilizar.

Una de las características del agua de mar, y de muchas de las aguas salobres, es que contienen sales con tendencia a precipitar tanto por efecto del calor, a mayor temperatura menor solubilidad, como por efecto 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 y llegando incluso a paralizar el proceso, por lo que se hace necesario eliminarlos antes de introducir el agua en los evaporadores.

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.

Otro de los problemas del agua suele ser el contenido en materia en suspensión que obstruyen y ensucian las membranas, por ello hay que eliminarlos antes de pasar por un proceso de filtración mediante membranas. Igualmente el contenido en materia viva, microalgas, bacterias e incluso virus puede afectar a las membranas, formando colonias en la superficie de las mismas que impidan el proceso de desalación. Por ello es necesaria la desinfección del agua antes de llegar a las membranas.

En estos procesos de desalación por membranas, 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.

En general, hace falta un buen conocimiento de la composición del agua que se va a utilizar, con el fin de prever todos los tratamientos que son precisos y diseñar correctamente la planta de desalación. Muchas plantas han fracasado por no partir de unos datos correctos de análisis del agua de partida. Este análisis debe ser estadístico a lo largo de varios años, o al menos meses, sobretodo en el caso de aguas salobres, para ver la influencia de las estaciones secas y húmedas. Para el agua de mar es más sencillo, ya que la composición apenas sufre variación por estos motivos.



Aunque los procesos a emplear en el pretratamiento de las aguas a desalar ya han sido vistos con anterioridad en los diferentes apartados correspondientes, analizaremos brevemente cada uno de los principales pretratamientos utilizados habitualmente:

**1.- Incrustaciones:** Las sales que pueden precipitar con el aumento de la temperatura son principalmente el sulfato cálcico y los bicarbonatos de calcio.

Con el fin de evitar la precipitación de estas sales, se destruyen previamente mediante la adición de un ácido. El más económico es el ácido sulfúrico. Ahora bien, hay que tener en cuenta que la adición de este ácido provoca un incremento en el contenido de sulfatos del agua inicial; aspecto éste a tener en cuenta a la hora de calcular el factor de concentración y la temperatura máxima de trabajo de un proceso de destilación.

Otra forma de evitar la precipitación de los carbonatos, sulfatos, sílice, sulfato de bario y sulfatos de estroncio, es mediante la adición de un inhibidor, llamado también dispersante, polímero o anti-incrustante. Este tipo de sustancias actúa sobre la formación de los cristales, impidiendo su formación y manteniendo en sobresaturación en el agua los iones. Para calcular los límites de utilización de estos productos hay que consultar con el fabricante de los mismos, el cual nos dirá en cada caso hasta donde garantiza, qué concentración se puede alcanzar y qué temperatura, pues se hidrolizan dejando de ser activos, todos estos límites hay que conocerlos y en el mercado están apareciendo constantemente productos nuevos.

**2.- Desgasificación y descarbonatación:** La presencia de gases en el agua puede influir muy negativamente en los procesos de destilación, por ello se hace necesario una eliminación de los mismos mediante un desgasificador térmico, donde una corriente de vapor y en condiciones de máximo vacío, produce el desprendimiento de los gases los cuales son evacuados por el sistema de vacío a la atmósfera. 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  $\text{CO}_2$ , el cual queda en disolución. Este gas, en ocasiones, 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  $\text{CO}_2$ .

**3.- Materia en suspensión:** Con el fin de evitar la materia suspendida y no disuelta en el agua, se procederá a una filtración de ésta. Para ello se emplean filtros de

arena y filtros de cartucho. No obstante, a veces es preciso utilizar antes un floculante que aglomere y flocule los coloides presentes y las partículas en suspensión. También a veces hay presencia de iones férricos y de metales pesados, estos precipitan con bastante facilidad en forma de hidróxidos, por lo que en caso de que estén presentes hay que eliminarlos previamente por precipitación química. Para ello se añade hidróxido cálcico subiendo el pH del agua hasta valores próximos a 12, floculándolos y decantándolos y luego volver a bajar el pH del agua mediante la adición de un ácido.

**4.- Desinfección:** Cuando en un agua se detecta la presencia de vida en forma de microalgas, bacterias o virus, éstos deben ser eliminados en los procesos de membranas. Para ello se añade un desinfectante del tipo cloro gas, hipoclorito cálcico, hipoclorito sódico, ozono o rayos ultravioletas. Todos ellos actúan matando la vida, por eso se llaman biocidas (= matan micro-organismos).

Otra forma es evitar su crecimiento aunque no su existencia, para ello se utilizan los biostáticos (paran su desarrollo), que son sustancias que sin atacar a la materia viva impiden que sigan creciendo. Una de estas sustancias es el bisulfito sódico, el cual actúa como reductor secuestrando el oxígeno presente en el agua y haciendo imposible la vida para los seres aerobios. No obstante una sobresaturación de este producto puede crear condiciones perfectamente anaerobias, facilitando el crecimiento de bacterias anaerobias como las sulfato reductoras. Por ello hay que mantener un bajo nivel de oxígeno en el agua de forma que se impida el crecimiento tanto de las aerobias como de las anaerobias.

En el caso de haber utilizado alguna forma de cloro para desinfectar el agua y dado que las membranas son muy sensibles al mismo, hay que evitar que llegue a ellas, para ello se añade en este caso también bisulfito sódico, pero no como biostático, sino como reductor ya que ataca al cloro residual eliminándolo.

## 6.4. Técnicas de desalación

El agua para el consumo humano no debe ni tener más de 0,5 gramos por litro ni ser agua destilada. En ambos casos no son provechosas para el organismo. Por tanto, si queremos obtener agua potable a partir del agua salobre o del mar tendremos que separar las sales que contiene hasta llegar al agua potable (< 0,5 gramos por litro).

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



El filósofo Aristóteles observando la naturaleza captó los principios físicos para separar el agua y las sales en los que se basan las tecnologías modernas de la desalación. En la superficie del mar se produce una evaporación por la que el vapor de agua se separa, dejando la sal en el mar y pasando el vapor a la atmósfera, que después a su vez dará origen a la lluvia que caerá a la tierra y volverá al mar, completando el ciclo del agua en la naturaleza. De ahí surge uno de los procesos de desalación consistente en *evaporar* el agua del mar y después *condensar* el vapor, obteniendo agua en estado líquido.

Otro fenómeno que también observamos en la naturaleza es la captación del agua de la tierra, que hacen las plantas. El agua pasa a la planta a través de la raíz, pasando a la savia. Cuando dejamos las legumbres en agua, se ablandan y se hinchan porque el agua pasa a través de la piel. Es decir, existen membranas que separan las sales del agua, lo que se conoce con el término científico de *ósmosis*.

Estos fenómenos naturales de *evaporación* y *ósmosis* son la base de los *procesos técnicos de desalación* que el hombre ha llegado a utilizar, desarrollando y controlando a voluntad estos procesos naturales. Este control a voluntad de estos fenómenos siempre se hace aportando la energía imprescindible para lograr la separación de las sales y el agua. Esta energía que en la naturaleza la aporta el sol, y posteriormente da origen a la lluvia, si queremos reproducirla en un lugar donde no llueve y hace falta agua, tendremos que hacerlo aportando energía.

Son conocidas en la actualidad una gran diversidad de configuraciones de plantas desaladora de agua salobre, en particular agua de mar, para la obtención a partir de la misma de agua cuyo contenido en sales y conductividad la haga apta de diferentes tipos de utilizaciones, por ejemplo utilización industrial, para riego o para el consumo humano. Los diferentes sistemas empleados para la disminución del contenido de sales de aguas salobres/marinas están relacionados con el volumen de agua a tratar y su grado de salinidad.

Fue a partir de la segunda mitad del siglo XIX cuando comienza a desarrollarse un creciente interés por la calidad del agua y en consecuencia por las técnicas de desalinización debido al desarrollo de la máquina de vapor. Los continuos avances en termodinámica, en química, en mecánica y en ingeniería ayudaron a este desarrollo, permitiendo obtener equipos capaces de mayores prestaciones. En este sentido, la primera patente para desalar agua fue registrada en 1869 en Gran Bretaña, y la primera planta de desalación fue puesta en marcha el mismo año en Adén (Yemen).

Ya en siglo XX, al finalizar la Segunda Guerra Mundial, se había desarrollado una nueva técnica desalinizadora, basada en la utilización de resinas intercambiadoras de iones. Durante la década de 1950 se experimentaron grandes avances en el campo de la desalación mediante cambio de fase, y a partir de esta época se construyeron gran parte de las instalaciones que actualmente existen según las técnicas de: evaporación

súbita de múltiple etapa ESME (también llamada Destilación Flahs multietapa MSF), evaporación múltiples efectos EME (Destilación multiefecto MED), y compresión de vapor CV.

Las investigaciones no han cesado en este campo; así a finales de la década de 1960 se logró obtener la primera membrana sintética semipermeable a escala industrial y comienza a desarrollarse la técnica de desalación por ósmosis inversa (OI). A partir de este momento la velocidad, tanto de expansión como de desarrollo, de esta técnica ha sido vertiginosa.

Paralelamente se ha ido desarrollando otra técnica de separación por membrana que se basa en la aplicación de un campo eléctrico: la electrodiálisis (ED).

Las principales técnicas de desalación las podemos clasificar en tres grandes grupos según el principio que aplican:

*a).- Cambio de Fase*

*1.- Evaporación*

- Evaporación súbita múltiple etapa (ESME o MSF)
- Evaporación Múltiple Efecto (EME o MED)
- Compresión vapor (CV)

*2.- Congelación*

- Se basa en los diferentes puntos de fusión del agua dulce y del agua salada. Los cristales de hielo obtenidos se separan en la salmuera, se lavan para extraer la sal y se derriten convirtiéndose en agua dulce.

*b).- Membranas Selectivas*

- Ósmosis Inversa (OI o RO)
- Electrodiálisis (ED)

*c).- Enlace Químico*

- Intercambio Iónico (CI)
- Extracción por disolvente

Otra forma de clasificar los distintos procesos de desalación sería aquella que tuviera en cuenta las diversas formas de energía, como la térmica, mecánica, eléctrica o química. La utilidad de esta clasificación estaría relacionada con los costos relativos de energía de los diferentes procesos, ya que la energía térmica es la más barata, mientras la energía química es la más cara. La destilación se puede realizar con energía térmica o



mecánica, la ósmosis inversa requiere energía mecánica, la electrodiálisis requiere energía térmica, y el intercambio iónico requiere energía química.

Otra clasificación estaría basada en la distinción entre la separación del agua de las sales, o a la inversa, separación de las sales del agua. Así en la destilación se separa el agua, mientras que en electrodiálisis se separan las sales.

La utilización de las diversas técnicas ha ido evolucionando con los años. En la década de 1970-1980 la MSF fue la más utilizada seguido de la OI, MED, CV y finalmente la ED. En la década de los ochenta, el proceso mayoritario fue el de OI, seguido de la MSF. Este hecho encuentra su justificación en el gran desarrollo que adquiere la OI a partir de 1980, con la aparición de membranas de capa ultrafina que contrasta con el mayor coste energético de los procesos evaporativos.

A partir de 1990, se empieza a recuperar de nuevo el uso de los procesos de cambio de fase mediante la técnica de MSF. Esta diferencia, con respecto a la tendencia mostrada en los nueve últimos años, radica en el avance de los procesos cogenerativos o duales iniciados en 1990, sobre todo en los países árabes, donde son viables gracias a la menor incidencia del coste energético en el precio final del agua.

Por último, hay que hacer referencia a la substitución de las plantas para desalación de agua de mar en el Medio Oriente, que utilizaban MED o MSF, y ahora están cambiando por las de ósmosis inversa. En América y Europa, las tendencias son hacia la desalación por ósmosis inversa.

En la tabla siguiente se adjuntan los procesos más importantes de desalación de aguas salobres/marinas, así como los usos más adecuados para el producto obtenido. En referencia a la tabla, se puede afirmar que los sistemas de destilación para la desalación de agua marina en grandes cantidades y fines urbanos son los idóneos, pero en la actualidad el proceso de desalación de agua más difundido es el de la ósmosis inversa.

**Tabla.- Eficiencia de los sistemas de desalación según calidad del agua tratada**

PROCESO	ENERGIA	TIPO	SALINIDAD (ppm)	CANTIDAD AGUA A DESALAR (m <sup>3</sup> /día)	USO DEL AGUA TRATADA
EVAPORACIÓN O DESTILACIÓN	CALOR	MSF	> 35.000	> 50.000	URBANO
		MED	> 35.000	< 20.000	URBANO
		CV	> 35.000	< 5.000	URBANO
FILTRACIÓN MEDIANTE MEMBRANAS	PRESIÓN	OI	1.000-35.000	> 50.000	Agrario urbano
	Campo Eléctrico	Electrodiálisis	1.000-15.000	< 30.000	AGRARIO

En los siguientes apartados, se va a dar una breve descripción de los procesos de desalación existentes actualmente, incidiendo de forma más detallada en aquellos más extendidos en la industria desaladora.

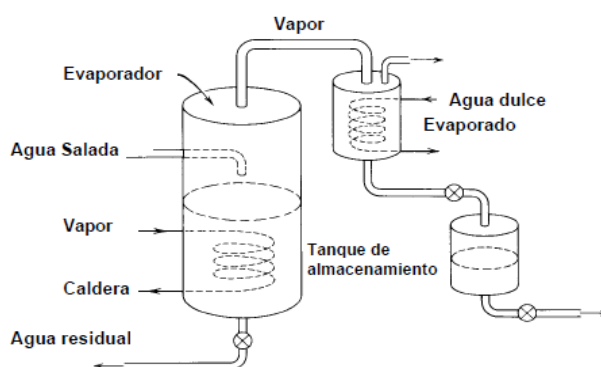
### 6.4.1. Sistemas de evaporación o destilación

La desalación obtenida por destilación consiste en evaporar agua para conseguir vapor que no contiene sales (éstas son volátiles a partir de 300° C): el vapor se condensa posteriormente en el interior ó exterior de los tubos de la instalación. Los sistemas desaladores suelen funcionar por debajo de la presión atmosférica, por lo que necesitan un sistema de vacío (bombas ó eyectores), además de extracción del aire y gases no condensables.

La destilación como proceso de desalación es efectiva porque la mayoría de las especies químicas que se encuentran en las aguas saladas son no volátiles a las temperaturas habitualmente empleadas, y por tanto permanecen en la salmuera no evaporada. Habría que aclarar en el aspecto terminológico, que el término destilación no se emplea aquí en el sentido habitual en ingeniería química, de separación de dos o más líquidos volátiles que son mutuamente solubles. Para la separación del agua de una solución acuosa con componentes no volátiles se suele emplear el término **evaporación** en ingeniería química. Sin embargo, en desalación a esta operación se le denomina habitualmente destilación.

El proceso de destilación implica tres pasos discretos para alcanzar el objetivo:

- Formación de vapor debido a la adición de calor a una masa de agua salada.
- Separación de este vapor del contacto con el líquido del que proviene.
- Condensación del vapor por eliminación del calor, normalmente por contacto con una superficie fría.



En la figura se representa de forma esquemática un proceso de destilación simple para recuperar agua dulce de agua salada, y que ilustra un medio práctico de



efectuar estos tres pasos. Aparecen dos cámaras, un evaporador en el que se forma vapor a partir del agua de mar caliente, y un condensador para condensar el vapor a destilado. Cada cámara consiste en un haz de tubos, con cajas de agua a los extremos de los tubos para permitir la conducción de fluidos hacia y desde aquellos.

El vapor formado sale del evaporador y entra al lado del condensador, donde se licúa en contacto con la superficie fría de los tubos del condensador, y se descarga como destilado.

A continuación se incluye una breve descripción de los principales procesos térmicos en uso: la destilación *flash* multietapa, la destilación múltiple efecto y la destilación con compresión de vapor.

### **1.- Destilación súbita por “efecto flash” (destilación súbita multietapa, MSF)**

En el sistema MSF el agua a desalar se calienta en un recipiente a baja presión lo que permite la evaporación súbita. Este proceso se repite a lo largo de una serie de etapas en las que la presión va disminuyendo según las distintas condiciones.

Es el proceso de destilación más utilizado en el mundo, sobre todo en Oriente Medio. Especialmente indicado para aguas con altas salinidad, temperatura y contaminación; su capacidad es mucho mayor que la de otras plantas destiladoras. Pero tiene el inconveniente de que su consumo específico de energía es de los más grandes entre los procesos conocidos, lo que lo hace sólo permisible para naciones con energía barata.

Los principales componentes de una planta de destilación MSF, se comprende de lo siguiente:

- Pretratamiento
- Evaporador multietapas MSF.
- Calentador principal.
- Eyectores de vacío.

Este método se basa en el principio de que al reducir abruptamente la presión del agua de mar por debajo del valor de su presión de vapor de equilibrio, ocurre una evaporación súbita o una ebullición explosiva de la misma (y por lo tanto de carácter irreversible). Solo un pequeño porcentaje del agua se evapora, de forma que la producción de la planta se logra mediante la operación de sucesivas etapas que funcionan a presiones que se van reduciendo progresivamente. Esto normalmente se logra introduciendo el agua de mar, previamente calentada a temperatura de ebullición con vapor de una fuente externa, en una cámara flash a través de un orificio de forma tal que se provoca una caída de presión suficiente para que sea menor a la de saturación a esa temperatura, evaporando parte del agua salada. Debido a la naturaleza violenta y

turbulenta de la evaporación, el área de la superficie del agua expuesta aumenta beneficiándose así la producción de vapor. El vapor así producido pasa a través de mallas ("*demisters*") donde se despoja de las gotas de salmuera que arrastra. Este vapor es condensado luego sobre la superficie de tubos que alimentan el agua de mar a la planta. El agua de mar alimentada a la planta es precalentada también de esta forma con el calor cedido por el vapor durante la condensación del agua desalada producto.



**Proceso de Evaporación Súbita Múltiple Etapa (MSF)**

En este proceso el agua de mar que se alimenta a la planta, precalentada según lo indicado en el párrafo anterior, es llevada a una temperatura de casi 100°C en una cámara de vacío denominada "sector de calentamiento". Este calentamiento se efectúa con vapor de calefacción que ingresa a dicha cámara y condensa sobre los tubos que conducen el agua de mar de alimentación a la planta. La temperatura alcanzada por el agua de mar en esta primera etapa del proceso, llamada temperatura "*top*", es normalmente de 90-110°C. El aumento de la temperatura del agua de mar en este sector de calentamiento está determinado por la optimización del costo de producción del agua en función del GOR ("*gain output ratio*") y del número de etapas. El GOR es la relación entre la producción de agua y el consumo de vapor.

El agua de mar así calentada pasa luego hacia otra cámara de intercambiadores-condensadores denominada primera etapa, donde en su parte baja tenemos la cámara flash que provoca la evaporación parcial del agua salada. La presión en esta cámara es menor que en la anterior, siendo la correspondiente a la de saturación del agua de alimentación que inicia inmediatamente el proceso de ebullición. El vapor generado condensa sobre los tubos que conducen el agua de mar de alimentación a la planta y que atraviesan esta cámara. El condensado es colectado y enviado a la etapa siguiente donde se repite el proceso de evaporación condensación. El agua salada no evaporada también pasa más concentrada a la siguiente etapa (por eso el proceso se llama multietapa, ya que si no se realiza en cascada consumiría demasiada energía para desalar), y al final parte de dicha salmuera es tirada de nuevo al mar. Este proceso se repite en varias etapas más, con menor presión relativa entre cada una de ellas, obteniéndose el agua desalada como condensado de la última etapa; la pureza de esta agua es casi total (< 10 ppm) aún partiendo de aguas de más de 50.000 ppm.

Las plantas de MSF pueden diseñarse para un rango de GOR cuyo límite práctico es de aproximadamente 11:1. Los costos de capital se incrementan con el GOR,

debido a que su aumento implica la necesidad de una mayor área de transferencia de calor y de mayor número de etapas. El valor de GOR óptimo está normalmente en el rango de 7 a 9 dependiendo del costo de la energía. Una planta típica, con un GOR de 8:1, tendría de 16 a 28 etapas con recuperación de calor (precalentamiento del agua de mar de alimentación) y 3 con extracción de calor con descarga al medio.

El porcentaje de recuperación del agua producida en relación con la cantidad de agua de mar ingresada a la planta depende de la calidad del agua de mar de alimentación y de la temperatura "*top*" a la que opera la planta. En el proceso MSF la recuperación máxima es del orden del 12-20% (88-113°C).

Las plantas de MSF se pueden construir con configuraciones del tipo "*once-through*", o sea de un paso sin recirculación del agua bruta precalentada, o bien del tipo con recirculación de salmuera para reducir el aporte de agua bruta a desalar y el consumo de aditivos químicos. Estas plantas a su vez también pueden diseñarse con distintas configuraciones de tubos: tubos largos rectos o bancos de tubos cruzados. En la figura anterior se muestra un diagrama de flujo simplificado de la destilación *flash* multietapa. Este diagrama corresponde a una planta de MSF con configuración del tipo "*once-through*".

## 2.- Destilación por “múltiple efecto” (MED)

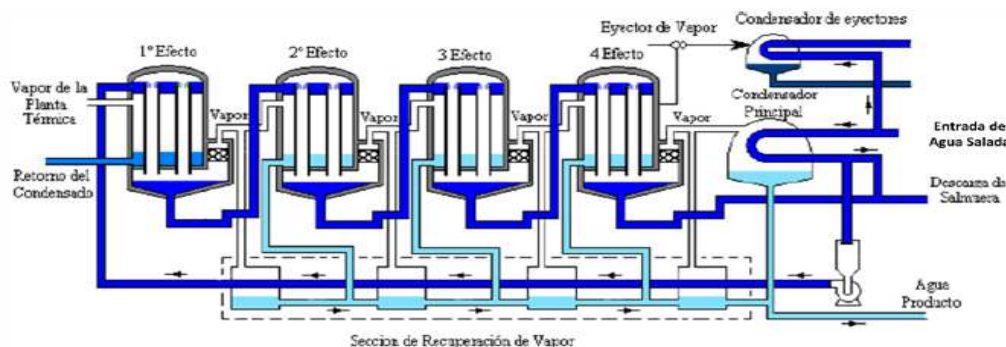
En el proceso MED el agua a desalinizar pasa a través de una serie de evaporadores puestos en serie. El vapor de una de las celdas se usa para evaporar el agua de la siguiente mientras que el aporte de energía primaria se hace sobre la primera de las celdas o etapas.

Los principales componentes que comprende una instalación MED, son los siguientes:

- Pretratamiento.
- Evaporador multiefecto.
- Sistema de evacuación de gases no condensables.

La destilación de múltiple efecto (MED) utiliza el mismo principio que el proceso MSF. La diferencia principal entre el proceso MED y el MSF radica en la forma en que se lleva a cabo la evaporación. En las plantas de MED se utilizan varios evaporadores del tipo de película delgada (la evaporación se produce de forma natural en una cara de los tubos de un intercambiador aprovechando el calor latente desprendido por la condensación del vapor en la otra cara del mismo), con los cuales se logran mejores coeficientes de transferencia de calor que los que se pueden obtener en las plantas de MSF donde se produce la evaporación súbita en forma directa. Las configuraciones disponibles para los evaporadores utilizados son: las de tubo vertical con película ascendente, las de tubo horizontal y vertical con película descendente y las

de tipo plato. Los evaporadores del tipo plato están basados en un diseño de platos corrugados implementado por la firma Alfa Laval.



### Proceso de Evaporación Multiefecto (MED)

La técnica de MED (múltiple efecto) consiste en evaporar en etapas sucesivas. Así, la primera etapa es alimentada con vapor externo (70°-80°) y en el resto de las etapas se va utilizando el calor de condensación del vapor producido por la etapa anterior. De esta forma, se va elevando la temperatura del agua del mar desde unos 22°C, (2-3 grados por etapa), hasta la temperatura del vapor de alimentación. Simultáneamente, el condensado (agua desalada) va perdiendo temperatura hasta igualar, en la salida del proceso, a la del mar. Este proceso se realiza en un vacío constante en todas las etapas, aproximadamente 0.05 Kg/cm<sup>2</sup>, equivalente a un punto de ebullición de 33°C.

En el proceso MED el agua de mar, precalentada en la etapa de condensación del vapor generado en el último efecto, ingresa al primer efecto en donde se eleva su temperatura al punto de ebullición con vapor de calefacción. El agua de mar se rocía sobre la superficie de los tubos del evaporador donde se forma inmediatamente una película delgada la cual favorece su rápida ebullición y evaporación. El vapor producido es colectado en este efecto y enviado al interior de los tubos evaporadores del efecto siguiente, el cual opera a una temperatura y presión inferiores a las del anterior. La salmuera proveniente del primer efecto es también enviada al efecto siguiente donde se rocía formando una película delgada sobre la superficie de los tubos por los que circula el citado vapor repitiendo el proceso de evaporación. El vapor de cada uno de los efectos se convierte así en agua desalada al ser condensado en el evaporador del efecto siguiente. El proceso se repite varias veces, dependiendo del número de efectos en el sistema. Normalmente también existen cámaras flash para evaporar una porción del agua salada que pasa al siguiente efecto, gracias a su menor presión de operación.

Los factores que limitan el número de efectos son el rango de temperatura total disponible y la diferencia de temperatura mínima requerida entre los efectos. La temperatura de salida del último efecto (temperatura "*bottom end*") está normalmente limitada por la temperatura del agua de refrigeración disponible. La temperatura del primer efecto (temperatura "*top*") lo está por las incrustaciones probables de acuerdo a la calidad del agua de mar disponible. La diferencia de temperatura entre efectos es



determinada por la elevación del punto de ebullición, las pérdidas de presión entre los efectos y la necesidad de tener una diferencia de temperatura mínima que permita obtener un caudal de destilado razonable en un evaporador de tamaño finito.

Las plantas de MED, cuando utilizan polímeros para controlar la formación de incrustaciones, generalmente se diseñan para el funcionamiento a baja temperatura en el primer efecto, del orden de 65-70°C, limitando de esta manera la formación de incrustaciones.

El GOR de la planta de MED es aproximadamente igual al número de efectos menos uno (N-1). Para un GOR de 8: 1, el número de efectos necesario en una planta de MED sería 9. Este número es mucho menor que el que correspondería a una planta MSF equivalente. El menor número de efectos de las plantas de MED contribuye a una importante reducción de costos en comparación con las equivalentes de MSF. Además el consumo eléctrico es menor que la MSF ya que necesita menos bombas de circulación al no existir recirculación de salmuera.

La fracción de agua desalada producida en estas plantas es también dependiente de la calidad del agua de alimentación. En este proceso la recuperación máxima es aproximadamente del 30-40% (71-113°C).

El coste de capital es mayor que MSF, pero es más sencilla de operar y tiene un coste de operación menor. El sistema MED se ha utilizado fundamentalmente en plantas de tamaño medio y es muy aconsejable cuando se aprovechan los calores residuales procedentes del vapor de escape de las turbinas, motores diesel, turbinas de gas, etc., en las instalaciones de cogeneración —en las que hay un considerable ahorro energético—, y cuando no se pueden aplicar otros procesos.

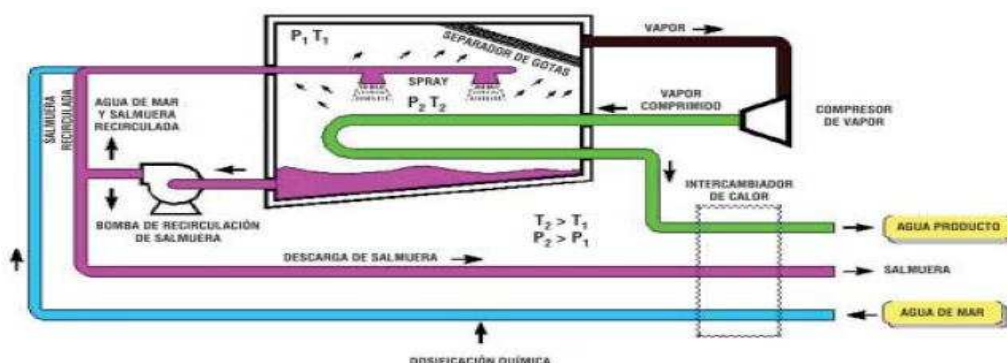
### **3.- Compresión de vapor (CV)**

El sistema de compresión de vapor consiste en evaporar el agua del mar, aumentar la temperatura de condensación de vapores mediante un compresor y su posterior condensación en un intercambiador de calor, enfriado con el mismo agua evaporante.

El diagrama de flujo de un sistema de compresión de vapor comprende las siguientes secciones:

- Pretratamiento.
- Intercambiadores de calor.
- Eliminación de gases no condensables.
- Evaporador: Cámara principal, Tubos de evaporación - condensación.
- Compresor.
- Postratamiento.

La evaporación se produce en la parte más baja de la cámara, previa eliminación de los gases incondensables (aire) mediante una bomba o eyector de vacío. Los vapores son extraídos por el compresor, que los hace circular por el interior de los tubos condensadores.



**Proceso de Compresión de Vapor (CV)**

Cuando el vapor se comprime, aumenta su temperatura de condensación y, al enfriar el condensador con el agua evaporante, se condensan los vapores y el agua dulce así obtenida se extrae del evaporador con la bomba de producto. Para mantener la salinidad constante en el interior del evaporador parte de la salmuera refrigerante se envía al mar. Para compensar la salmuera y producto extraídos hay que introducir agua de mar. Como el agua de mar es fría y la salmuera y producto están calientes, se les hace pasar por un intercambiador y así se recupera gran parte de su energía calorífica.

Normalmente existen intercambiadores de precalentamiento del agua de aporte con el destilado y la salmuera tirada al mar (como el número de etapas es reducido hay que recuperar la energía de salida de la salmuera), ayudados por una resistencia eléctrica en los arranques, así como todos los dispositivos de tratamiento de agua anteriores y posteriores al proceso de destilación.

En la destilación con compresión de vapor (CV) el calor necesario para llevar el agua de mar a ebullición se obtiene directamente del vapor que es removido del evaporador y reinyectado en la primera etapa luego de ser comprimido para elevar su temperatura de saturación. La compresión del vapor puede ser efectuada por un compresor mecánico o por un termocompresor (plantas de CMV y de CTV respectivamente).

En las plantas de CMV la energía que se entrega al sistema, a través del compresor, determina la magnitud del aumento de temperatura y la eficiencia de la planta. En una planta eficiente con bajo ingreso de energía, la diferencia de temperatura para la evaporación es pequeña, lo cual requiere una gran área superficial para la evaporación y por tanto altos costos de capital. Como con la mayoría de los otros procesos, los costos de capital y los costos operacionales deben equilibrarse.

En la compresión mecánica de vapor (CMV), durante la puesta en marcha de la planta se requiere energía adicional para llevar el agua de mar a la temperatura de



ebullición. Esto normalmente se efectúa utilizando vapor externo de baja presión. No obstante, una vez alcanzada la temperatura de operación, el mayor ingreso de energía al sistema es a través del compresor y solamente se requiere vapor para reposición de pérdidas (*make-up*). El consumo de energía del compresor depende del caudal de vapor, la diferencia de temperatura en el evaporador y la temperatura de evaporación.

Las plantas de CMV se diseñan con evaporadores con tubos verticales, tubos horizontales y del tipo de platos, similares a los de las plantas de MED. Las variaciones operacionales pueden ser: evaporación a alta temperatura o a baja temperatura (62-65°C determinada por el nivel de vacío).

La capacidad de las unidades de CMV está limitada por el flujo máximo volumétrico del compresor y la presión desarrollada por el mismo, la temperatura a la que opera y la capacidad de transferencia de calor del evaporador.

El proceso CTV es similar al proceso CMV. Las plantas incluyen evaporadores con tubos verticales, tubos horizontales y de platos, y mejoran la evaporación a través del uso de las configuraciones del tipo de película delgada ascendente, descendente y rociada. Dado que el eyector de vapor es menos eficiente que un compresor centrífugo, las plantas de CTV casi siempre se construyen con muchos efectos para lograr eficacias globales razonables. Las variaciones operacionales son evaporación a alta temperatura o a baja temperatura (62-65°C determinada por el nivel de vacío), aunque en la actualidad las de tipo de baja temperatura son las plantas de CTV que se usan en forma predominante.

Aunque su consumo específico es con mucho el menor de las instalaciones de destilación, tiene un gran inconveniente: la inexistencia de compresores volumétricos de vapor de baja presión de tamaño suficiente para una producción considerable. Así no se conocen unidades CV mayores de 5.000 m<sup>3</sup>/día, y estos compresores sólo permiten un máximo de 3 etapas a diferentes presiones conectadas en cascada (si fueran necesarias más etapas harían falta instalar nuevos compresores).

La fracción de agua desalinizada producida en las plantas de CV es también dependiente de la calidad del agua de alimentación y de la temperatura. En este proceso la recuperación máxima es aproximadamente del 40-50% (Ambiente-88°C).

#### **6.4.2. Filtración mediante membranas**

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

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

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

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

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

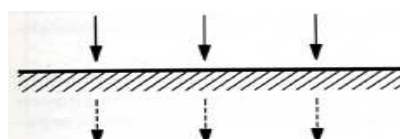
#### *Selectividad de los procesos de separación*

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

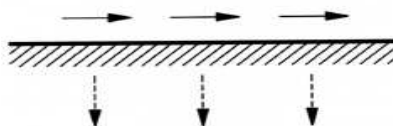
Aunque son los procesos de separación que realizan la eliminación de sales los que nos interesan, hay otros procesos que sin llegar a nivel de separación de iones han jugado también un importante papel en los procesos de adecuación de un agua para determinados usos.

Por consiguiente, conviene hacer una distinción entre los distintos procesos que se enumeran en la tabla.

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



En otros el agua al llegar a la membrana incide en ella transversalmente (*cross-flow filtration*) y se divide en dos flujos o corrientes, una que atraviesa la membrana y otra que circula sobre la superficie de la misma. La separación que realiza la membrana no es en este caso de elementos sólidos sino de iones. Nos encontramos pues con la ósmosis inversa y su variante de nanofiltración.

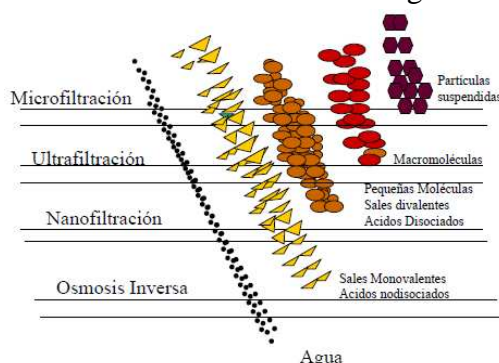


Por último, aparece en el cuadro anterior la electrodiálisis, un proceso también de membranas que permiten el paso de iones con una determinada carga pero no los de carga contraria.

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

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

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



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

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

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

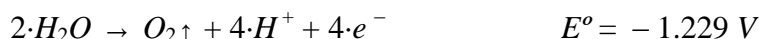
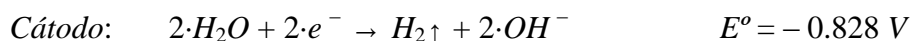
En cuanto a la nanofiltración, hay que decir que se basa en el mismo principio que la ósmosis inversa. La diferencia: el límite de separación es algo inferior. Los iones disueltos en agua se retienen en menor medida que en la ósmosis inversa. Esta técnica puede ser vista como una vasta ósmosis inversa de membrana. Con ello se consigue un ahorro en los costes de funcionamiento.

En definitiva, los dos principales procesos de desalación de importancia comercial que utilizan membranas para separar sales y agua son: Electrodialisis y Ósmosis inversa.

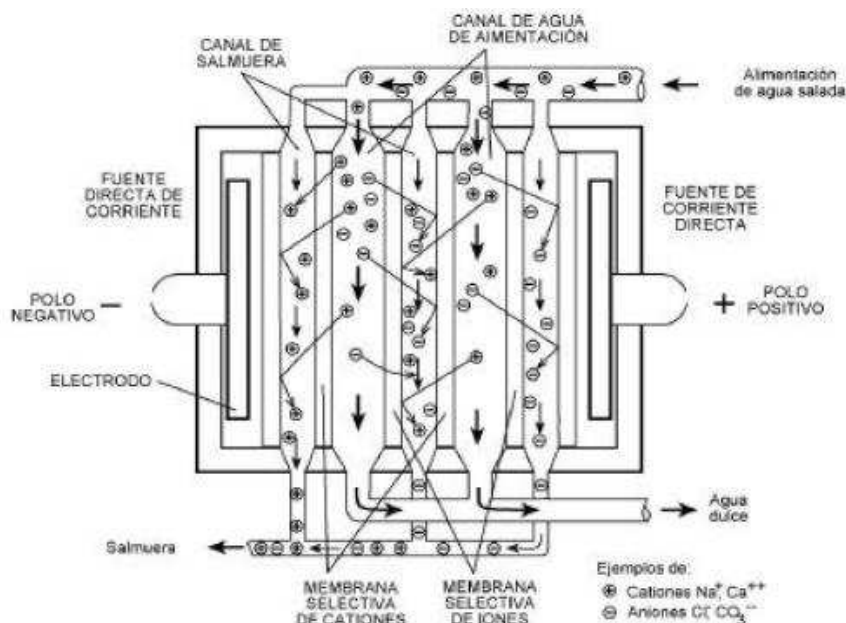
## 1.- Electrodialisis

La electrodialisis (ED) es una técnica de separación basada en el conocido fenómeno mediante el cual, si se hace pasar una corriente eléctrica continua (c.c.) a través de una solución iónica, los iones positivos (cationes) migrarán hacia el electrodo negativo (cátodo), mientras que los iones negativos (aniones) lo harán hacia el electrodo positivo (ánodo). Si entre ambos electrodos se colocan dos membranas semiimpermeables que permiten selectivamente solo el paso del  $\text{Na}^+$  o del  $\text{Cl}^-$ , el agua contenida en el centro de la celda electrolítica se desaliniza progresivamente, obteniéndose agua dulce.

Además de la migración de iones, cuando se aplica un potencial de corriente continua (c.c.) también se produce un intercambio de electrones entre los electrodos del stack. En el ánodo, dos átomos de cloruro ceden dos electrones para formar una molécula de cloro gas. Estos dos electrones son atraídos hacia el cátodo, donde tiene lugar la disociación del agua relacionada con la ganancia de electrones (reducción del agua) para producir hidrógeno gas. Si la disolución no contuviera cloruros, en el ánodo tendría lugar la semireacción de oxidación del agua. Esta semireacción también aparece en caso de haber iones cloruro pero se trata de una semireacción secundaria muy minoritaria por tener un potencial de oxidación sensiblemente inferior en valor absoluto al potencial de la semireacción de formación de cloro gas.



El proceso puede verse claramente en la figura, donde los iones van a los compartimentos atraídos por los electrodos del signo contrario, dejando en cubas paralelas, celdas de dilución, el agua pura y en el resto, celdas de concentración, el agua salada más concentrada. Este producto de desecho, el cual debe ser eliminado debidamente puede llegar a ser hasta el 30 por ciento del total de agua de fuente tratada; 15 a 20 por ciento es un resultado más típico.



**Proceso de electrodialisis**

En algunas ocasiones, la polaridad de los ánodos y cátodos se invierte alternativamente para evitar el ensuciamiento de las membranas selectivas al paso de dichos iones. En este caso se habla de electrodialisis reversible (EDR).

La Electrodialisis Reversible (EDR) es una versión de la Electrodialisis en la que se invierte la polaridad de los electrodos varias veces por hora, lo que induce una autolimpieza química. Esto permite la desalinización de fuentes de agua con recuperaciones muy elevadas del orden del 90%, con mínimo pretratamiento y bajos costos de operación.

El corazón del sistema, conocido como par de célula, está compuesto por dos membranas de intercambio iónico, que permiten de forma selectiva la transferencia de cationes y aniones, y los espaciadores que separan las membranas y permiten la distribución del agua sobre la superficie de las membranas. La acumulación en paralelo de hasta 600 pares de célula constituye lo que se conoce como pila de membranas (una pila típica de ED usada a nivel industrial puede tener entre 500 y 2.000 pares de célula). El espaciador tipo malla genera una gran turbulencia, lo que facilita el transporte de los iones desde el agua de alimentación hasta la superficie de la membrana para su transferencia a la salmuera.

Las membranas de intercambio iónico son membranas sintéticas permeables a iones positivos o negativos en disolución (membranas porosas) que suelen fabricarse con un espesor de entre 50 y 200  $\mu\text{m}$ . Un stack, o pila de membranas, de ED está compuesto por numerosas membranas de intercambio catiónico (MIC) y aniónico (MIA) situadas alternativamente entre un ánodo y un cátodo.

Las membranas permeablemente selectivas a los cationes reciben el nombre de membranas de intercambio catiónico (MIC), mientras que las que son selectivas al paso

de aniones son llamadas membranas de intercambio aniónico (MIA). Esta selectividad es consecuencia de la presencia de cargas iónicas fijadas en la matriz de la membrana. Las MIC contienen cargas iónicas negativas fijas en su estructura, tales como grupos sulfónico ( $-SO_3^-$ ) o carboxilo ( $-COO^-$ ). La carga de estos grupos está neutralizada por contraiones (iones de carga opuesta). Las MIA están formadas por cargas iónicas positivas, generalmente grupos de amonio cuaternario ( $R_1R_2R_3R_4N^+$ ) y, por tanto, los contraiones son negativos. En las membranas de intercambio iónico, la unión entre los iones fijados y sus contraiones puede disociarse, de modo que estos últimos son móviles y pueden ser sustituidos por otro ion. Es por ello que la membrana resulta ser permeable a los contraiones y repele a los coiones (iones de igual signo al de los iones fijados). Este efecto se conoce como *exclusión de Donnan*.

Las membranas de intercambio iónico deben ser insolubles en disolución acuosa y presentar baja resistencia eléctrica a fin de garantizar que la intensidad de corriente que circule a través del stack para una determinada diferencia de potencial sea lo suficientemente elevada para facilitar la migración iónica desde la corriente diluida a la concentrada.

El agua producida por estos tratamientos debe recibir tratamiento para eliminar compuestos orgánicos (si éstos fuesen un problema) y microbios— antes o después del proceso de electrodiálisis. Debido a que el agua fuente no pasa físicamente a través de las membranas en estos sistemas, la mayoría de contaminantes orgánicos no son eliminados. Es un proceso que sólo puede separar sustancias que están ionizadas.

El agua de fuente para estos sistemas deberá ser también prefiltrada, para reducir la turbidez, no obstante que las membranas están menos propensas a contaminarse que como en otros sistemas porque el agua fuente no pasa a través de ellas. Además, las membranas se mantienen limpias mediante la inversión periódica de la polaridad del sistema, lo cual causa un flujo iónico en la dirección opuesta y reduce las acumulaciones.

Los sistemas de electrodiálisis y de inversión de electrodiálisis requieren grandes cantidades de energía para producir la corriente constante que impulsa la purificación y bombea el agua a través del sistema; se utilizan para tratamiento de aguas salobres de baja salinidad en la gama de 1 a 5 gr/l de sales totales disueltas, ya que la cantidad de energía eléctrica necesaria para la purificación es directamente proporcional a la cantidad de sales separadas (para aguas con 5 gr/l de sales totales disueltas, el consumo de energía eléctrica suele estar entre 1 y 2 Kwh/m<sup>3</sup>). Por éste y otros motivos, estas opciones no se usan mucho en instalaciones de tratamiento de agua de gran escala como algunas de las otras tecnologías descritas en este documento. Sin embargo, se las puede ajustar para el uso con sistemas pequeños y por lo general funciona automáticamente con pocos requisitos de mantenimiento y funcionamiento, comparable en muchos casos a la ósmosis.

## 2.- Ósmosis inversa

La ósmosis es un proceso espontáneo por el cual las moléculas de disolvente atraviesan una membrana semipermeable de una solución de menor concentración de soluto hacia una solución con mayor concentración de soluto. La membrana semipermeable divide las soluciones. Las partículas del disolvente se mueven en ambos sentidos, pero con una mayor velocidad hacia el lado de la membrana de la solución mas concentrada, proceso que finaliza cuando se igualan las velocidades. En este momento la presión que ejerce el disolvente es igual en ambos lado de la membrana por lo tanto no hay flujo de partículas del disolvente, la presión ejercida por las partículas se denomina *presión osmótica*.

Al igual que las moléculas de un gas ideal, las partículas de soluto están muy distantes en las soluciones diluidas y no interaccionan en forma significativa entre sí. Para soluciones diluidas, la presión osmótica,  $\pi$ , tiene la siguiente expresión:

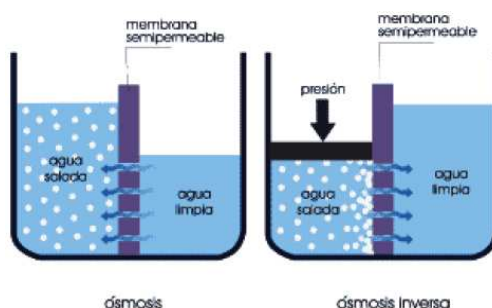
$$\pi = nRT/V$$

donde  $n$  es el número de moles del soluto,  $V$  es el volumen de la solución (en litros),  $R$  es la constante general de los gases y  $T$  la temperatura en °K. Dado que  $n/V$  corresponde a una expresión de concentración, la ecuación anterior toma la forma de:

$$\pi = MRT$$

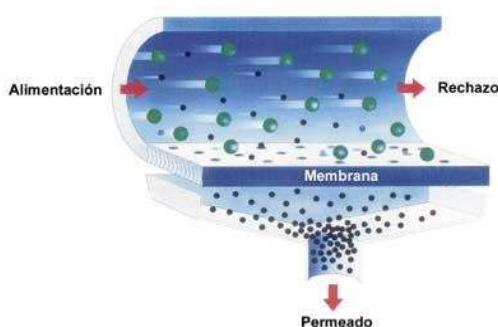
donde  $M$  corresponde a la concentración de la solución expresada en moles/litro, es decir, la molaridad de la solución.

Si invertimos el proceso y aplicamos una presión en el tubo de la solución más concentrada (a través de una bomba), el movimiento se produce de la solución más concentrada a la solución mas diluida. Este proceso es lo que constituye la *ósmosis inversa*. La altura que alcanza la solución en el nuevo equilibrio es función de la presión que se aplica, de las características de las membranas y de las concentraciones de ambas soluciones.



**Principios del proceso de ósmosis natural y ósmosis inversa**

En consecuencia, para desalar por ósmosis inversa es preciso disponer de una membrana semipermeable y de una fuerza exterior que impulse el agua a través de la membrana.



En comparación con la destilación y la electrodiálisis, la ósmosis inversa es un proceso relativamente nuevo, ya que la comercialización con éxito de aplicaciones en agua salobre fue a principios de los años 70 del siglo pasado, y para agua de mar a finales de esa misma década.

La OI utiliza la presión para forzar el agua a través de una membrana especial, dejando atrás las sales disueltas en el lado de alimentación de la membrana. En este proceso de separación no se necesita calentamiento ni cambio de fase (líquido a vapor). La mayoría de la energía se requiere para la presurización del agua de alimentación. Los sistemas de OI se comercializan en cuatro configuraciones: placa plana, tubulares, arrollamiento en espiral y fibra hueca. Las dos últimas son las que se encuentran en la mayoría de las instalaciones de desalación. Las presiones de operación necesaria y la pureza del producto varían con la concentración salina del agua a tratar y las membranas empleadas.

Una membrana para realizar ósmosis inversa debe resistir presiones mucho mayores a la diferencia de presiones osmóticas de ambas soluciones. *Por ejemplo un agua bruta de 35.000 ppm de SD a 25°C tiene una presión osmótica de alrededor de 25 bar, pero son necesarios 70 bar para obtener permeado.* Además deber ser permeable al agua para permitir el flujo y rechazar un porcentaje elevado de sales.

En este tipo de instalaciones el factor de conversión es aproximadamente del 45%, y la calidad del agua permeada suele estar en torno a los 300-500 ppm de SD, cifra un orden de magnitud mayor al agua obtenida en un proceso de evaporación. El agua de rechazo es normalmente devuelta al mar.

Debido a su flexibilidad en el diseño, los sistemas OI se utilizan para una amplia gama de capacidades de producción, y también una amplia gama de contenidos salinos en el agua. El continuo desarrollo de la tecnología de membranas ha ampliado la utilidad técnica y económica del proceso de OI.

**2.1.- Conceptos básicos de ósmosis inversa:** El proceso de desalación de ósmosis inversa queda enmarcado por una serie de conceptos y ecuaciones que definen o aclaran los distintos aspectos que deben conocerse, y que en última instancia permiten realizar el proyecto o diseño de las distintas instalaciones.



**2.1.1.- Presión osmótica:** Es la diferencia de presión que hay entre una solución concentrada y una solución diluida.

$$\Delta\pi = \pi_{\text{alimento}} - \pi_{\text{permeado}}$$

La presión osmótica de una disolución salina es proporcional a su concentración y puede determinarse simplificada por la ecuación:

$$\pi = 0,00076 \cdot SD \text{ (bar)}$$

SD = Sólidos disueltos totales

y también puede determinarse por la siguiente ecuación:

$$\pi = 0,0762(T + 273)\Sigma m_i$$

$\pi$  = Presión osmótica (atm)

T = Temperatura (°C)

$\Sigma m_i$  = suma de las molalidades de todos los constituyentes iónicos y no iónicos de la disolución.

Por otra parte, la presión osmótica de una disolución se puede calcular con más exactitud por la ley de van't Hoff:

$$P_o = i \cdot M \cdot R \cdot T$$

donde :

$P_o = \pi$  = Presión osmótica que se pretende calcular, expresada en *atmósferas*.

i = es el “factor de van't Hoff” y expresa el grado de disociación del soluto.

M =  $\Sigma m_i$  = es la concentración molar de la disolución, expresada en *moles/litro*.

R = es la constante de los gases, igual a *0,082 atmósferas x litro / Mol / °K*.

T = es la temperatura en *grados Kelvin*.

Para un agua de mar con una salinidad de 35.000 ppm a 25°C, el valor del factor de van 't Hoff es de 1,82. Teniendo en cuenta que la densidad de un agua de mar con 35.000 ppm de salinidad a 25°C es de 1,0233 kg/litro, y que el peso molecular del cloruro sódico es 58,44 la concentración molar de esa agua de mar será:

$$M = 35 \text{ gr sal/kg agua} \cdot 1,0233 \text{ kg agua/litro} / 58,44 \text{ gr sal/mol} = 0,613 \text{ moles/litro}$$

En consecuencia, la presión osmótica del agua de mar con 35.000 ppm a 25 grados centígrados es de:

$$1,82 \cdot 0,613 \text{ mol/l} \cdot 0,082 \text{ atm} \cdot \text{l/mol/}^\circ\text{K} \cdot 298,15 \text{ }^\circ\text{K} = 27,31 \text{ atmósferas}$$

Aplicando una presión de 27,31 atmósferas a un agua marina de 35.000 ppm a 25°C, la “primera gota” de agua pura atravesaría la membrana, pero el flujo de agua sería insignificante, por lo que tal proceso no tendría interés comercial. Para obtener un flujo de agua producto que resulte comercialmente rentable es preciso trabajar a presiones mucho más elevadas. Actualmente las presiones de trabajo en las instalaciones comerciales varían, en la mayor parte de los casos, entre 65 y 70 atmósferas.

**2.1.2.- Presión Neta de trabajo (PNT):** La presión neta ejercida a la membrana menos la presión osmótica y menos la contrapresión.

$$PNT = P_a - P_o - P_p - 0,5 * P_{Dm}$$

$P_a$  = Presión alimentación

$P_o$  = Presión osmótica

$P_p$  = Presión permeado

$P_{Dm}$  = Pérdida de carga en membranas + ensuciamiento

$$PNT = P_{tot} - \pi - \Delta P$$

$P_{tot}$  = Presión hidrostática total

$\pi$  = Presión osmótica

$\Delta P$  = Pérdida de presión

**2.1.3.- Energía mínima de desalación ( $W_{min}$ ):** La energía necesaria para presurizar un volumen  $V$  de cualquier fluido incompresible a la presión  $P$  equivale al producto de la presión por el volumen:

$$W = P \cdot V$$

En el supuesto que la presión en el lado del agua pura es nula, esta será la energía consumida por el volumen de agua  $V$  al atravesar la membrana impulsado por la presión  $P$ .

Dado que la presión osmótica  $P_o$  de una disolución es aquella a la que se pone en marcha el proceso de ósmosis inversa, la energía mínima necesaria para extraer 1 m<sup>3</sup> de agua pura a partir de una disolución mediante un dispositivo ideal de ósmosis inversa será:

$$W_{min} = 0,02815 * P_o \text{ KWh}$$

Esta expresión es generalizable a cualquier proceso de ósmosis inversa desarrollado en condiciones ideales: la energía consumida por 1 m<sup>3</sup> de agua al atravesar una membrana de ósmosis inversa, expresada en kWh/m<sup>3</sup>, equivale a la presión de

trabajo  $P$  expresada en atmósferas, multiplicada por el factor de conversión de la unidad de energía  $\text{atmósferas} \cdot \text{m}^3$  a la unidad  $\text{kWh}$  que es 0,02815.

Para el agua de mar en las condiciones descritas anteriormente, la presión osmótica es de 27,31 atmósferas. Por consiguiente, la mínima energía necesaria para desalar  $1 \text{ m}^3$  de agua de mar con 35.000 ppm de salinidad a  $25^\circ\text{C}$  mediante un dispositivo de ósmosis inversa, en condiciones ideales, es de:

$$W_{\min} = 0,02815 \cdot 27,31 = 0,769 \text{ kWh}$$

Esta sería la energía mínima necesaria para extraer agua pura de un agua de mar con 35.000 ppm de salinidad a  $25^\circ\text{C}$ . Conviene señalar que las condiciones ideales incluyen la necesidad de que el volumen de agua marina presurizado sea suficiente para que su presión osmótica no se vea alterada por la extracción de agua pura.

Para las presiones de trabajo entre 65 y 70 atmósferas, el consumo ideal de energía en el paso por la membrana se sitúa en el rango de 1,83 a  $1,97 \text{ kWh/m}^3$ .

**2.1.4.- Velocidad de filtración ( $J$ ):** Se determina con base en el volumen de solución de la alimentación ( $V$ ) que pasa en un lapso de tiempo ( $t$ ) a través de la membrana ( $A$ ), donde el flujo de alimentación es tangencial a la superficie a permear por unidad de área.

El concepto de velocidad de filtración anterior se expresa matemáticamente como:

$$J = V / (t \cdot A)$$

La resistencia al flujo a través de la membrana se puede obtener como la suma de las resistencias  $R$ :

$$R = R_m + R_a + R_p + R_g + R_{cp}$$

donde:

$R_m$  = Resistencia de la membrana, que depende del grado de porosidad de la membrana y del espesor de la misma.

$R_a$  = Resistencia por la adsorción de solutos sobre la membrana.

$R_p$  = Resistencia por el bloqueo de poros, debido a sustancias en suspensión.

$R_g$  = Resistencia debido a la capa de gel formada a la entrada de flujo a permear la membrana y localizada sobre ella. Es similar a la de polarización de la concentración. Responde a sustancias que se agregan y se compactan formando una segunda capa. No siempre ocurre, pero es causada por la concentración de sólidos sobre la membrana.

$R_{cp}$  = Resistencia debida a la polarización de la concentración, por sólidos que se agrupan a la entrada de la membrana, y se oponen a la filtración.

Las resistencias anteriores no siempre se presentan todas, pero su ocurrencia afecta de forma inversa la velocidad de filtración, de tal manera que si la fuerza impulsora que es la diferencia de presión es directamente proporcional a ella, esta relación se puede expresar como:

$$J = \Delta P / R$$

Como se desprende de la expresión, el aumento de la resistencia va reduciendo la velocidad de filtración, y esta resistencia puede ir en aumento porque el transporte de sólidos hacia la membrana se hace cada vez mayor, y se consolida la capa de gel hasta llevar la velocidad  $J$  a valores límite.

La formación de la torta en un proceso de filtración a presión constante en el cual la dirección del flujo es tangencial a la membrana, y se expresa como:

$$\frac{t}{V} = \frac{\mu}{\Delta P A} \left( \frac{V c_s \alpha}{2A} + R_m \right)$$

donde:

$\mu$  = Viscosidad dinámica de la solución de alimentación.

$c_s$  = Concentración de la solución de alimentación.

$\alpha$  = Característica de la torta, y depende de los sólidos que se aglomeran encima de la superficie de la membrana.

Combinando esta última ecuación con la primera, se obtiene:

$$J = \frac{\Delta P}{\left( \mu \frac{V c_s \alpha}{2A} + R_m \right)}$$

En esta ecuación el término  $V c_s \alpha / 2A$  representa la resistencia de las partículas que se van acumulando.

De acuerdo con la ecuación anterior se puede afirmar que la velocidad de filtración se ve afectada por cambios en la presión; por cambios en la temperatura porque su variación afecta la viscosidad del fluido y por cambios en la concentración de solutos en la alimentación, ya que una mayor concentración de ellos hará más difícil el flujo a través de la membrana.

**2.1.5.- Caudal de alimentación ( $Q_a$ ):** Flujo o caudal de alimentación, que es el que se pretende desalar y se aplica en un lado de la membrana; también se representa por  $F_a$  ( $F_f$  en la bibliografía anglosajona).

**2.1.6.- Caudal que atraviesa la membrana ( $Q_p$ ):** El caudal de agua que atraviesa la membrana en l/m<sup>2</sup>/hora, que corresponde al agua a la que se le han eliminado o reducido las sales; algunos autores lo representan por  $F_p$ .

$$Q_p = A \cdot (P_m - \Delta\phi_m)$$

$A$  = coeficiente de transporte de la membrana en l/m<sup>2</sup>/hora atm.

$P_m$  = presión diferencial a través de la membrana en atm, o Kg/cm<sup>2</sup>.

$\Delta\phi_m$  = presión osmótica diferencial a ambos lados de la membrana, en atm o Kg/cm<sup>2</sup>.

$$Q_p = A \cdot PNT$$

PNT = Presión neta de trabajo.

**2.1.7.- Caudal del concentrado ( $Q_c$ ):** Flujo o caudal de concentrado (rechazo), que arrastra las sales que han sido separadas por la membrana y que se depositarían sobre ella; se representa además por  $F_r$  ( $F_b$  en la bibliografía anglosajona).

$$Q_c = Q_a - Q_p$$

**2.1.8.- Concentraciones del agua ( $C_a - C_p - C_c$ ):** Del mismo modo tendremos las concentraciones del agua de alimentación,  $C_a$  ( $C_f$ ), producto,  $C_p$ , y rechazo,  $C_c$  ( $C_r - C_s - C_b$ ) relacionados entre sí también mediante:

$$C_a \cdot Q_a = C_p \cdot Q_p + C_c \cdot Q_c$$

**2.1.9.- Ecuación del transporte de sales:**

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

$F_s$  = flujo de sales, en g/cm<sup>2</sup>/seg.

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

$C_a$  = concentración de sales en el agua de alimentación, en g/cm<sup>3</sup>.

$C_p$  = concentración de sales en el agua producto, en g/cm<sup>3</sup>.

**2.1.10.- Paso de sales ( $Ps$ ):** Es la relación entre la salinidad del producto y la salinidad promedio de la alimentación.

$$Ps = C_p / C_a$$

$C_p$  = Salinidad del producto

$C_a$  = Salinidad promedio de la alimentación

**2.1.11.- Rechazo de sales ( $R_s$ ):** Es el inverso del paso de sales ( $1-P_s$ ) y un dato muy importante en la especificación de la membrana.

$$R_s = 100 * (1 - P_s) \text{ normalmente se representa en } \%$$

$P_s$  = Paso de sales

**2.1.12.- Factor de conversión ( $F_c$ ):** Es la relación entre el caudal de permeado dividido entre el caudal de alimentación, es decir, es el porcentaje de producto que se obtiene a partir de un determinado volumen de agua de alimentación:

$$F_c = Q_p / Q_a * 100 \text{ se expresa siempre en } \%$$

$Q_p$  = Caudal permeado

$Q_a$  = Caudal de alimentación

**2.1.13.- Factor de Concentración ( $C_f$ ):** El incremento de sales que se produce en el rechazo.

$$C_f = 100 / (100 - F_c) \text{ expresado en número}$$

$F_c$  = Factor conversión

**2.1.14.- Salinidad del Concentrado ( $C_c$ ):** Es el cálculo de la salinidad en función del factor de concentración o del rechazo de sales y factor de conversión.

$$C_c = (C_a - C_p) * C_f$$

$C_a$  = Salinidad promedio de la alimentación

$C_p$  = Salinidad del producto

$C_f$  = Factor concentración

$$C_c = R_s \cdot C_a / (1 - F_c)$$

$R_s$  = Rechazo de sales en tanto por uno

$F_c$  = Factor de conversión o recuperación en tanto por uno

**2.1.15.- Salinidad del producto ( $C_p$ ):** Es el cálculo de la salinidad o concentración en función del rechazo de sales.

$$C_p = (1 - R_s) \cdot (C_a + C_c) / 2$$

$R_s$  = Rechazo de sales en tanto por uno

$C_a$  = Salinidad promedio de la alimentación

$C_c$  = Salinidad del concentrado

**2.1.16.- Proporción (ratio) de reducción:** Este factor es muy indicativo de la calidad de la membrana y sobre todo permite ver claramente la diferencia entre unas y otras.

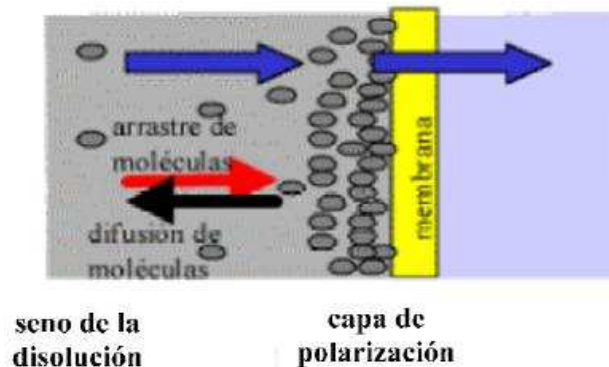
$$C_a/C_p = 1/(1 - R_s)$$

$C_a$  = Salinidad promedio de la alimentación

$C_p$  = Salinidad del producto

$R_s$  = Rechazo de sales en tanto por uno

**2.1.17.- Factor de Polarización (Factor  $\beta$ ):** La polarización de la concentración es un incremento de la salinidad adyacente a la superficie de la membrana de la que se extrae constantemente agua y en el que las sales rechazadas se van acumulando en concentraciones altas debido al paso del agua por la membrana. Aumenta con el factor de conversión y disminuye con el aumento de velocidad del agua por la membrana.



El disolvente (flecha azul) puede atravesar la membrana. Con este flujo se arrastran moléculas o iones, que no pueden atravesar la membrana, hacia ésta (flecha roja). Debido al gradiente de concentraciones entre las proximidades de la membrana y el seno de la disolución se produce un flujo difusional hacia el seno de la disolución (flecha negra). En estado estacionario ambos flujos: el de arrastre y el difusional deben ser los mismos.

El fenómeno de polarización complica tanto desde el punto de vista práctico como teórico el diseño y matematización de un gran número de procesos de separación con membranas.

$$\text{Factor } \beta = K_p * \text{EXP}(Q_p/(Q_a + Q_c)/2)$$

$Q_p$  = Caudal permeado

$Q_a$  = Caudal de alimentación

$Q_c$  = Caudal del concentrado

$K_p$  = constante = 0,99

El aumento de la concentración de la polarización (Factor  $\beta$ ) origina una sobreacumulación de solutos sobre la membrana que lleva a:

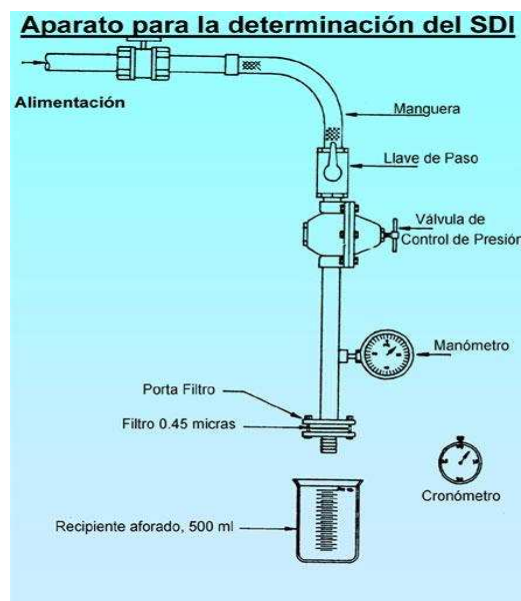
- Aumento de Presión Osmótica → Flujo disminuye.
- Precipitación de sales → Deposición inorgánica → Paso de sales aumenta y flujo disminuye.

**2.1.18.- Coeficiente de permeabilidad:** El flujo que da la membrana por unidad de superficie y unidad de presión se mide en  $\text{l/hm}^2/\text{bar}$ .

**2.1.19.- Flujo medio:** La cantidad de agua que atraviesa la membrana para una presión determinada se mide en  $\text{l/m}^2 \cdot \text{h}$  o en  $\text{gfd galon/ft.day}$ .

**2.1.20.- Factor de ensuciamiento:** Es un coeficiente que representa el deterioro que sufre la membrana en su funcionamiento.

Para conocer el potencial de ensuciamiento de un agua de alimentación a las membranas de Osmosis Inversa se utilizan dos sistemas el SDI –  $\text{SDI}_{15}$  (*Silt Density Index*, *Índice de fouling* o *Índice de atascamiento*) y el MFI (*Índice de fallo en membrana*, “Modified Fouling Index”) el primero es el más usado y si un agua tiene un  $\text{SDI} > 5$  en continuo no es apta para la Osmosis Inversa. Lo normal es que un agua de pozo tenga un  $\text{SDI} < 1$  y un agua de toma abierta el SDI esté entre 3 y 4.



El SDI es una medida indirecta de la presencia de materia particulada o coloidal en el agua capaz de colmatar o atascar las membranas. Se obtiene de forma empírica mediante la fórmula:

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



Siendo  $t_1$  y  $t_2$  los tiempos de filtración inicial ( $t_1$ ) y después de 15 minutos ( $t_2$ ), para pasar 500 ml de agua a través de un filtro de  $0,45 \mu\text{m}$  a 2,07 bares (30 psig) de presión. Norma: D4189-95R02 Test Method for Silt Density Index (SDI) of Water.

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

El MFI es semejante al SDI excepto que se mide el volumen que pasa cada 30 segundos durante los 15 minutos, el valor es obtenido gráficamente tomando la pendiente de la curva  $V/T$  y  $V$  un valor de  $\text{MFI} < 1$  corresponde a un  $\text{SDI} < 3$ .

Para conocer con detalle el tipo de partículas que originan el SDI se emplea el MEB (microscopía electrónica de barrido) tanto en su composición como en su tamaño.

**2.1.21.- Factor de temperatura:** Es un factor importantísimo ya que afecta a la productividad de las membranas a su degradación física y química al mismo tiempo que afecta a la solubilidad de determinadas sales. La temperatura y la presión afectan a determinadas propiedades del agua y en particular a su viscosidad.

Esta determina una mayor o menor facilidad de fluir y permear a través de las membranas. Cuanto mayor sea la temperatura de diseño mayor la temperatura de membranas.

Afecta tanto a la presión osmótica como la permeabilidad del agua a través de la membrana. Normalmente se acepta que la presión y el flujo de permeado se incrementa alrededor de 0,5 bares y 3 % por cada  $^{\circ}\text{C}$  de incremento de temperatura respectivamente y viceversa. El paso de sales aumenta con la temperatura a la misma tasa que el flujo, por lo que al incrementarse la temperatura a flujo de permeado constante, la calidad del permeado disminuye.

El efecto de la temperatura sobre la presión viene dado por el factor de corrección sobre la temperatura (TCF– Temperature Correction Factor–en inglés):

$$TCF = \exp (K * (1/(273 + T) - 1/298))$$

$K$ = depende de la naturaleza de la membrana entre 2100 y 2800 K.



También se define el coeficiente corrector por temperatura como el coeficiente de la productividad a la temperatura de trabajo y la productividad a 25° manteniéndose constantes las otras variables. Para temperaturas mayores de 25° se aplicará la formula:

$$TCF = PT/P25^{\circ C} = 1,03^{(T-25)}$$

Para temperaturas menores de 20 °C y presiones menores de 23 kgs/cm<sup>2</sup> utilizaremos la formula:

$$TCF = 0,35 + (0,26 \times T)$$

La temperatura excesiva puede ocasionar daños a la membrana. Todas las membranas sufren el fenómeno conocido como compactación el cual esta influenciado por la temperatura y presión, y consiste en la compactación de los lechos porosos soporte de la membrana, los cuales van disminuyendo el tamaño de poros causando una disminución de flujo de permeado.

**2.1.22.- Superficie de una membrana:** Superficie filtrante que tiene una membrana en ft<sup>2</sup>.

**2.1.23.- Caudal de producto:** Caudal de permeado que da una membrana medido en gpd o en m<sup>3</sup>/día.

**2.1.24.- Edad de una membrana:** Años que lleva la membrana funcionando.

**2.1.25.- Edad equivalente de las membranas:** Años que llevan funcionando las membranas teniendo en cuenta el % reposición.

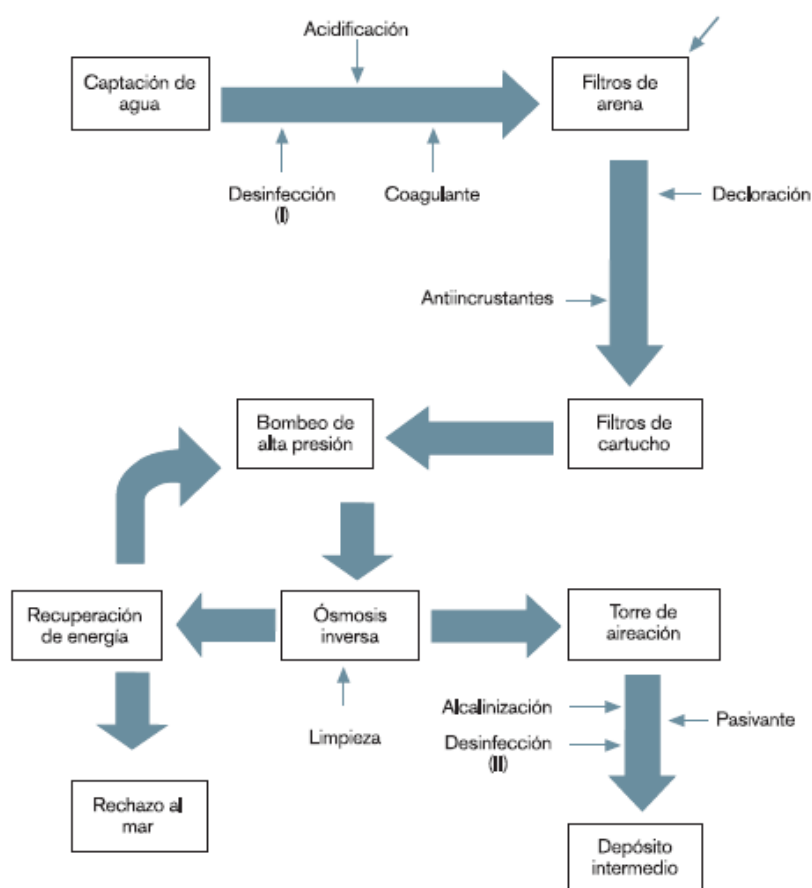
**2.1.26.- Reposición anual:** % que hay que reponer anualmente por deterioro de las membranas.

**2.1.27.- Garantía:** La garantía que da el fabricante de membranas normalmente de 5 años con un (%) de reposición anual salvo el 1° año.

**2.2.- Descripción del proceso de ósmosis inversa:** La OI es un proceso dónde el agua pasa a través de una membrana semipermeable impulsada por una bomba que eleva su presión hasta un valor superior al de su presión osmótica natural. Para este propósito se utiliza típicamente una bomba de alta presión, del orden de 5,4 a 8,2 MPa.

El proceso de ósmosis inversa es tan simple que a priori solo son necesarias las membranas que filtren el contenido salino y el equipo presurizador. *Pero una planta de OI es mucho más compleja que una agrupación de módulos y una o varias bombas*, por ejemplo las membranas se ensucian muy fácilmente con la operación continuada y necesita un pretratamiento intensivo (mucho mayor que en los procesos de destilación).

Además, en las plantas de desalinización de agua de mar con membranas, generalmente se implementa una recuperación de energía de la corriente de salmuera que abandona la membrana a alta presión. Para ello se utilizan, entre otros, dispositivos tipo Pelton Wheel, sistemas de intercambio de presión y los turbocharger. Los citados dispositivos permiten recuperaciones de energía del orden del 28-30%.



**Diagrama simplificado de funcionamiento de una planta de Ósmosis Inversa**

En resumen, la desalación por ósmosis inversa (OI) emplea membranas que separan las sales del agua por hiperfiltración tangencial con alta presión, 55 a 69 bares (800 a 1.000 psi). Este proceso es muy susceptible a la calidad del agua de mar, antes de entrar en contacto con las membranas requiere un tratamiento de acondicionamiento físico y químico con el fin de reducir los riesgos de obturación por partículas en suspensión o por precipitación de sales poco solubles, el agua desalada requiere también de acondicionamiento para equilibrar su contenido de minerales y reducir su naturaleza corrosiva. En este caso la mayor parte de la energía se destina a presurizar el agua de mar y la eficiencia del proceso depende de las bombas de alta presión y de los equipos de recuperación que aprovechan la presión de salida de la salmuera. El consumo de energía oscila entre los 2,8 a 4,2 kWh/m<sup>3</sup>, el porcentaje de rendimiento va de 30 a 50% y el factor de concentración de la salmuera va de 1,25 a 2.

Una instalación desaladora puede ser más o menos compleja según sea el tamaño y el tipo de agua a tratar y debe contemplar todos los elementos desde la toma

de agua hasta el depósito final para el almacenamiento de permeado, para que responda a las prestaciones que deben exigirse a un sistema sofisticado y por tanto caro.

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

- Captación o toma de agua → Suministro de agua de alimentación al proceso.
- Pretratamiento físico-químico → Orientado a prevenir los posibles daños que puedan sufrir las membranas.
- Desalación → Separación del agua bruta en producto potable y salmuera.
- Post-tratamiento → Constituye la etapa final; ajuste de la calidad del agua.

**2.2.1.- Captación de agua:** El diseño de la instalación se inicia con la toma o punto de captación del agua que va a alimentar el sistema, determinándose el tipo de obra a instalar de acuerdo a las propiedades del agua y a las propiedades hidrogeológicas de los acuíferos.

Para la confección del diseño adecuado de la toma de agua, se realiza un estudio hidrogeológico de la zona, incluyendo cartografía geológica continental y marina, batimetría y sondeos verticales de reconocimiento con extracción de muestra continua.

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

<i>Características de los procedimientos de captación</i>	
<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.



**a.- Toma Cerrada:** La toma de agua mediante pozo es la más favorable y la que siempre hay que intentar construir. Sin embargo ello implica la permeabilización de caudales, a veces importantes, a través de los distintos estratos del terreno, que no siempre es posible lograr. Siempre y cuando las condiciones hidrogeológicas lo permitan este tipo de obras de toma es el más recomendable, pero en algunos casos el agua de fuentes subterráneas tiende a ser muy irregular en su caudal y propiedades fisicoquímicas lo que genera más gastos por acondicionamiento.

En el caso concreto de las fuentes superficiales (como son lagos, ríos, o mar) la perforación de un pozo playero puede simplificar tremendamente el costo de inversión y operación del sistema de pretratamiento.

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

Las mayores dificultades en la construcción de los pozos de captación se producen en las zonas costeras (pozos playeros), especialmente por los grandes caudales que se requieren para las instalaciones de agua de mar, que además de tener factores de recuperación menores, 40-50 %, suelen ser de mayores dimensiones para aprovechar la economía de escala. Pero un pozo playero bien diseñado y bien desarrollado, equipado con rejillas, simplemente utiliza el lecho de grava y arena de la playa como un gigante y eficaz filtro de arena.

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

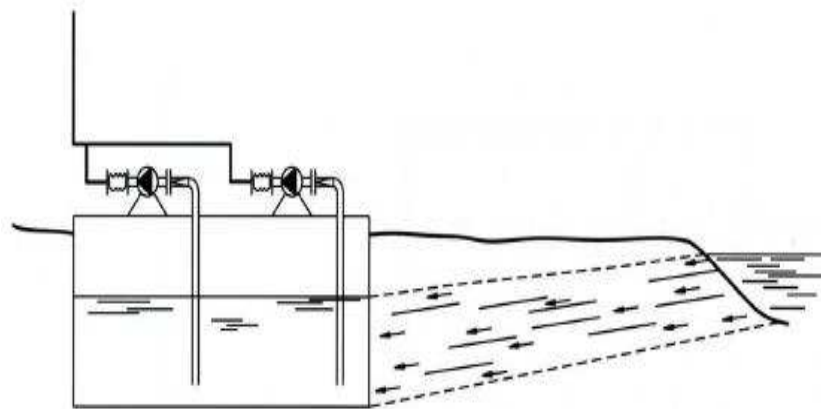
Dentro de las variaciones más frecuentes que se plantean en las tomas cerradas de agua de mar podemos citar:

**a.1.- Cántara de captación:** Consiste en un depósito que se excava por debajo de la cota del agua en el terreno. Su forma puede ser circular en el caso de pozos normales para instalaciones pequeñas, o rectangular cuando son de mayor capacidad.

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

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

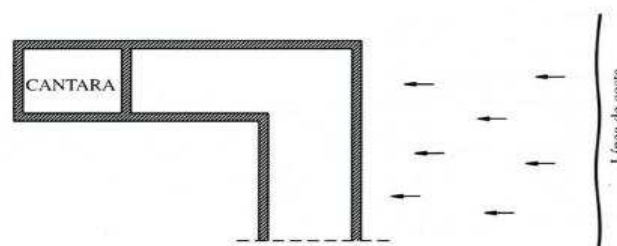
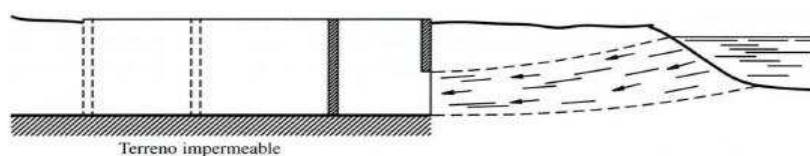
El aspecto más importante de la construcción es la determinación de la cota inferior de la excavación, para que una vez colocadas las bombas se respeten los valores de la altura de aspiración, sumergencia y distancias entre base de la aspiración y fondo del depósito.



**Cántara de captación**

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

Si la capa de terreno permeable a través de la cual se espera la aportación de agua no tiene demasiado espesor, la pared de la galería aguas arriba se excava y construye hasta dentro de la capa impermeable subyacente, mientras que la pared exterior, menos profunda, queda dentro de los límites del terreno permeable. De esta forma se aumenta el frente de entrada de agua.

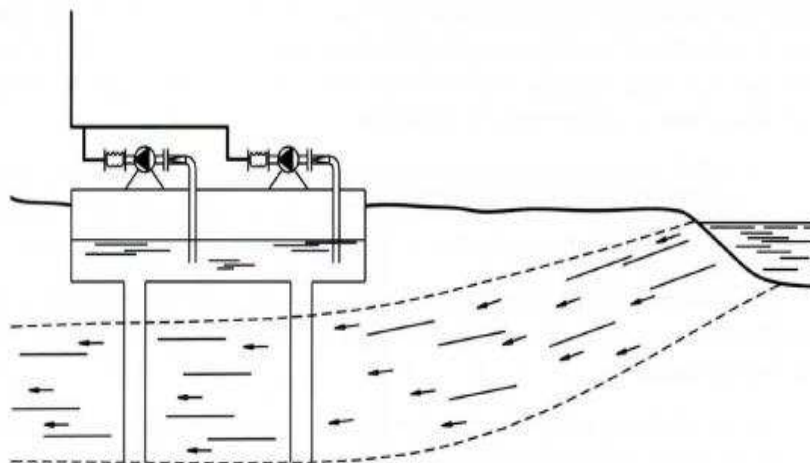


**Canal de toma**

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

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

**a.2.- Cámara de captación con sondeos verticales:** En ocasiones la permeabilidad del terreno es insuficiente para aflorar el caudal necesario y en estos casos suele recurrirse a realizar perforaciones en el fondo de la cántara hasta alcanzar alguna capa de terreno más permeable que incremente el caudal de la captación. Esta situación es más frecuente en las instalaciones de agua de mar, a medida que la toma se aleja de la línea de costa.



**Cántara de captación con sondeos verticales**

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

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

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

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

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



**a.3.- Cántara natural:** Es una cántara formada por una escollera donde el agua puede decantar, porque no está influenciada por el oleaje normalmente. Suele tener 2 tipos de escollera; la de mayor tamaño está en el exterior y otra en el interior de la cántara de menor tamaño que pueda hacer de filtro. Debe ser suficientemente grande con un tiempo de retención de  $> 2$  horas para que se produzca en ella una decantación de arenas.

La toma se hace mediante bomba centrífuga horizontal verticalizada con cebado automático y normalmente en la zona más alejada de la entrada de agua. Para el diseño de las bombas solo hay que tener en cuenta las mareas y el NPSH de este tipo de bombas. Se deben colocar rejillas de plástico rodeando la aspiración de las bombas para evitar entrada de peces y objetos extraños.

Aunque el agua suele llevar pocos sólidos en suspensión su actividad biológica es grande por ser toma superficial y estar a la luz solar.

El agua que se obtiene con este tipo de toma es la de peor calidad ya que normalmente la toma está a poca profundidad  $< 10\text{m}$ .

**b.- Tomas de agua abiertas:** La toma abierta permite la captación de agua de mar mediante tubos inmisarios de gran diámetro y, normalmente, de gran longitud (varios kilómetros), para poder llegar a la batimetría de 30 a 60m, profundidad en la cual el agua goza de condiciones físico-químicas ideales para su tratamiento, quedando siempre expuesta a una posible contaminación externa.

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

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

El objeto de este depósito es garantizar un suministro sin interrupciones a la instalación y actuar a modo de decantador para mejorar las condiciones físicas del agua de alimentación. Es más frecuente en las instalaciones de mayor tamaño, ya que además actúa como reserva en el caso de avería de alguna de las bombas de la toma y se suele emplear también para bombeo del agua de limpieza de los filtros.

**b.1.- Toma en canal:** La toma en canal es de menor longitud y generalmente más superficial, por lo que está sometida a la acción del oleaje y en consecuencia se ve afectada por la presencia de algas contaminantes y turbidez propia de su emplazamiento. Es conveniente instalar a la entrada del mismo los dispositivos de



filtración o separación de gruesos necesarios para evitar sobre todo la entrada de algas y materiales gruesos, que podrían romper las bombas.

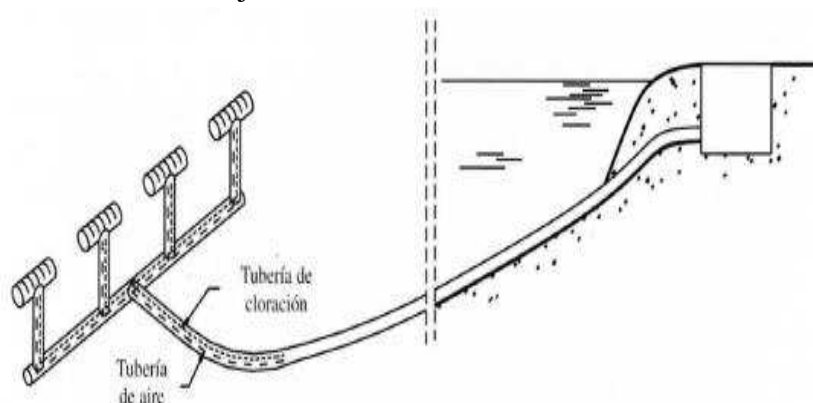
Las rejillas fijas o móviles y con la superficie adecuada para garantizar una operación continua, sin obstrucciones, son imprescindibles. Los materiales empleados en estas rejillas deben ser resistentes a la corrosión, especialmente en el caso del agua de mar.

**b.2.- Toma mediante emisario submarino:** Cuando el oleaje o las características de la costa determinan una elevada turbidez y arrastre de algas o contaminación, es preciso recurrir a emisarios submarinos. Consiste en tomar el agua de mar alejado de la costa y a una cierta profundidad y conducir el agua por tuberías enterradas hasta una cántara situada en la costa de donde se bombea el agua hasta el pretratamiento de la desaladora.

Las partes más importantes que constituyen una toma por emisario submarino son las siguientes:

1. Toma del emisario
2. Tubería de conducción
3. Cántara de bombeo
4. Tuberías de reactivos

La toma del emisario es la obra apoyada sobre el fondo marino que permite tomar agua entre 3 a 5 metros del fondo. Su anclaje en el fondo marino se realiza mediante dados de hormigón. Para evitar su aterramiento u obstrucción por algas o elementos de gran tamaño, incluidos peces, se hace terminar en un colector provisto de varios filtros de entrada con rejilla.

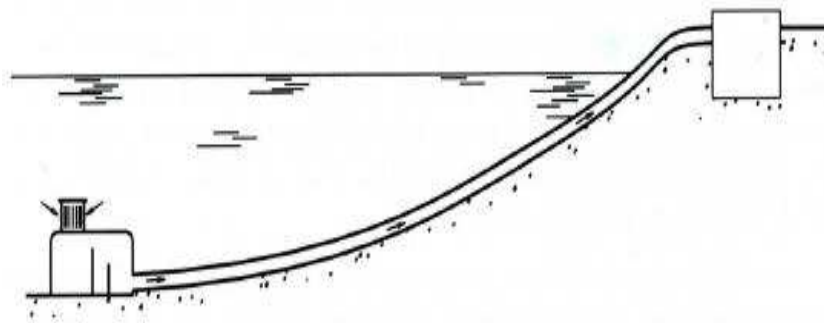


**Colector submarino con filtros y equipos de limpieza**

En este caso la tubería de captación utilizada debe ser de un material resistente a la corrosión y flexible, siendo los más frecuentemente utilizados el polietileno (PE) y el poliéster reforzado con fibra de vidrio (PRFV) y debe sumergirse en el mar a la distancia conveniente para garantizar una profundidad mínima que evite la influencia del oleaje.

La limpieza y mantenimiento de éstas se hace con aire, para lo cual es preciso disponer de los correspondientes equipos y tuberías que lleguen hasta las mismas. En otras ocasiones se dota a la tubería de una estructura más complicada, generalmente de hormigón, en su entrada.

En instalaciones de tamaño medio se puede recurrir a la construcción de pantalanés (jety) de los que se soportan las bombas, aunque en el caso de fondos poco profundos y arenosos, deben protegerse las bombas de la abrasión producida por las arenas.



**Estructura de captación sumergible**

Las tuberías del emisario desembocan en la cántara dentro del edificio de toma de agua. La cántara de bombeo debe tener la suficiente profundidad para que las diferencias de nivel por las mareas y las pérdidas de carga no impidan que las bombas puedan funcionar. Normalmente la profundidad suele estar alrededor de los 4 mts.

Todas las bombas de la cántara descargan a un colector común que conduce el agua al pretratamiento, normalmente se construye en PRFV, presión de diseño la máxima presión de operación y se debe tener muy en cuenta la soportación por estar situado al final del circuito.

En el colector se debe colocar la siguiente instrumentación: PT y FIT (salvo que podamos medir el caudal por suma de caudales de bombas o filtros), este FIT nos permite hacer la dosificación de reactivos proporcional al caudal.

**2.2.2.- Pretratamiento:** Uno de los principales requisitos para que las plantas desaladoras tengan un funcionamiento económicamente viable a largo plazo es realizar un pretratamiento de alta calidad del agua captada. Por lo tanto, los procesos tradicionales de pretratamiento en plantas desaladoras y la dosis correlativa de productos químicos debe optimizarse continuamente para poder adaptarse al día a día, y a veces cada hora, a los cambios en el agua de alimentación, para asegurar que se alcanzan los valores necesarios del agua captada para las unidades de Osmosis Inversa.

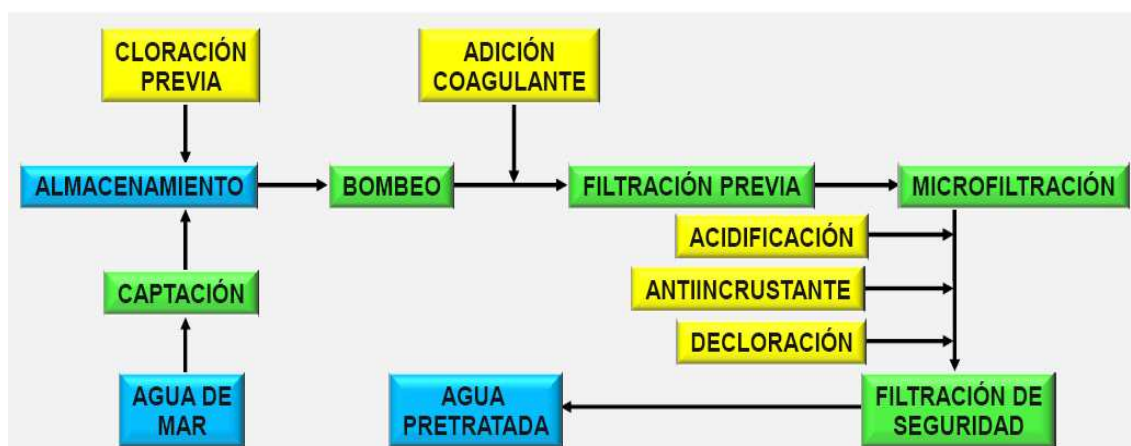
El pretratamiento puede ser más o menos complejo y por tanto más o menos caro, dependiendo de la contaminación existente en el agua. En general siempre se trata de captar el agua de la mejor calidad posible y para ello se opta por uno u otro tipo de toma, seleccionando al mismo tiempo la ubicación de la misma. Por tal motivo el

pretratamiento, salvo en contadas situaciones, suele ser totalmente convencional no alterando en exceso la inversión a realizar respecto al valor medio.

El pretratamiento se requiere en la ósmosis inversa por tres razones de prevención totalmente diferentes: *Incrustación*, *ensuciamiento (Fouling)* y *ataque a las membranas*. Cuando cualquiera de los dos primeros fenómenos ocurre, se traduce en una disminución en el rendimiento de la planta, o en un aumento de la presión de operación. También puede estar acompañado por un aumento en la presión diferencial y en la salinidad del producto. Los síntomas de un ataque bacteriano o químico a las membranas son totalmente opuestos a los que se evidencian por ensuciamiento o por incrustación. Estos ataques en efecto dañan irreversiblemente a la capa de rechazo de sales de la membrana y permiten el paso relativamente libre de sales y de agua.

En definitiva, el agua de captación, antes de ser alimentada a estas plantas, debe ser sometida a una etapa de pretratamiento físico-químico más compleja que la requerida por las tecnologías térmicas. El fin del pretratamiento es minimizar el atascamiento de las membranas semipermeables, donde se da el fenómeno de OI. Consta de una serie de operaciones que se realizan antes de la entrada del agua en las membranas:

- Una *cloración* para interrumpir los posibles desarrollos bacteriológicos.
- Una *coagulación* para eliminar las partículas coloidales del agua bruta.
- Una *filtración*, a través de filtros de arena, con la que se reduce el índice de atascamiento del agua (SDI) a la mitad y elimina los flóculos formados en la etapa anterior.
- Una *microfiltración*, a través de filtros de cartuchos, donde se obtienen valores de SDI inferiores a 3.
- Una *acidificación* para reducir el pH del agua y evitar que se precipite el  $\text{CaCO}_3$  y óxidos metálicos.
- Se añade un *antiincrustante* para que las sustancias disueltas en el agua no se hagan insolubles y formen incrustaciones en las membranas.
- Una *decoloración* para que el cloro no dañe las membranas.
- Una *filtración final* para asegurar un agua pretratada adecuada.





Las innovaciones tecnológicas a los sistemas de pretratamiento consisten en la introducción de módulos de membranas, retrolavables, de micro y ultrafiltración en el sistema de filtración, además de los filtros convencionales de cartucho. Estos equipos pueden operar normalmente con altos porcentajes de recobro y a bajas presiones de trabajo. Este sistema de filtración capilar puede proveer mejor calidad de agua que los filtros de cartucho. Aunque el costo de esta nueva tecnología aun es muy alto si se compara con los filtros convencionales.

No hay que olvidar que las operaciones a realizar en el pretratamiento dependen totalmente de las características del agua de alimentación, y que pueden ser mucho más variadas que las expuestas en este apartado. Como mínimo el agua de alimentación a OI debe ser filtrada en filtros de cartuchos.

Una vez tratada, el agua se envía, mediante bombas de alta presión, hasta las membranas, donde se produce la separación de las sales, obteniendo, por un lado, un flujo de agua potable y, por otro, lo que se denomina “*agua de rechazo o salmuera*”; que no es más que agua con una concentración salina mayor que la del agua del mar.

**2.2.3.- *Desalación:*** Las plantas desaladoras de ósmosis inversa aprovechan el proceso de ósmosis descrito: se incrementa la presión del agua a desalar (mediante bombas alimentadas con energía eléctrica de la red) y se pasa el agua a través de unos tubos con membranas semipermeables en su interior que impiden (con un cierto rendimiento) el paso de sales y dejan pasar agua. De esta forma el agua se separa en dos corrientes; una con alta concentración de sales (la corriente que no ha atravesado la membrana semipermeable) y que es conocida como salmuera y la otra con baja concentración de sales (la corriente que ha atravesado la membrana semipermeable) que es conocida como agua permeada. La corriente que atraviesa la membrana (agua permeada) está a baja presión y el agua que no atraviesa la membrana (salmuera) está a alta presión, por lo que antes de evacuar la salmuera, se recupera parte de su energía, mediante distintos sistemas de recuperación de energía, para aportársela al sistema.

El material de las membranas utilizadas para tratar agua de mar es generalmente poliamida; no obstante también se usan algunas membranas de acetato de celulosa. Las membranas construidas con compuestos de poliamidas están caracterizadas por un flujo específico de agua más alto y por un más bajo pasaje de sal a través de ellas respecto a los de una membrana de acetato de celulosa. Las membranas de poliamida son estables dentro un rango más amplio de pH que el correspondiente a las membranas de acetato de celulosa, pero son más susceptibles a la degradación oxidativa producida por el cloro libre. Se han hecho muchos esfuerzos para mejorar la resistencia de las membranas de poliamida en relación con el cloro, tratando de cambiar la estructura molecular de los monómeros usados en la polimerización.

Para utilizar industrialmente las membranas con el fin de que puedan soportar las diferentes presiones de trabajo, deben colocarse de una determinada manera. La

capacidad de producción de una planta de estas características se consigue instalando en paralelo varias unidades elementales de producción o módulos. Por tanto, un módulo es una agrupación de membranas, con una configuración determinada, que forman la unidad elemental de producción.

### **Clasificación de las membranas en función de distintos parámetros**

<b>Parámetros</b>	<b>Tipos</b>
ESTRUCTURA	- Simétricas - Asimétricas
NATURALEZA	- Integrales - Compuestas de capa fina
FORMA	- Planas - Tubulares - de fibra hueca
COMPOSICIÓN QUÍMICA	- Orgánicas - Inorgánicas
CARGA SUPERFICIAL	- Neutras - Catiónicas - Aniónicas
MORFOLOGÍA DE LA SUPERFICIE	- Lisas - Rugosas

Las dos configuraciones primarias de los módulos de membranas utilizados en las aplicaciones de OI son las de fibra hueca ("*hollow fiber*") y las de arrollamiento en espiral ("*spiral wound*"). Otros dos tipos de configuraciones de los módulos de membranas son las tubulares y las de plato y marco. Estas últimas configuraciones han sido usadas con menor frecuencia en las aplicaciones de tratamiento de agua.

Los módulos de placas son los más antiguos. Está formado por un conjunto de membranas planas, recortadas generalmente en forma rectangular o de disco circular. Se apoyan sobre mallas de drenaje o placas porosas que les sirven de soporte. Las membranas se mantienen separadas entre sí por medio de espaciadores. El módulo se obtiene apilando “paquetes”, formados por espaciador-placa porosa-membrana. El conjunto así formado se comprime mediante un sistema de espárragos de manera que pueda soportar la presión de trabajo.

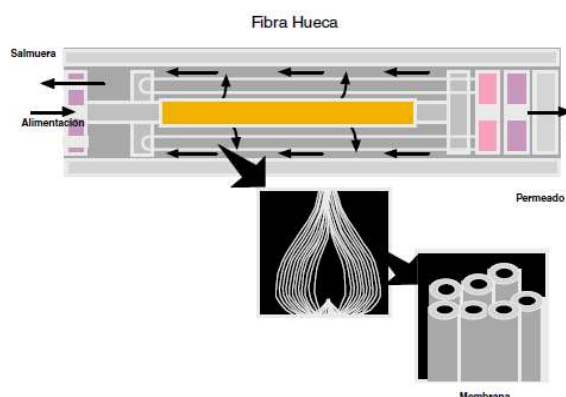
Los módulos tubulares se fabrican a partir de membranas tubulares y tubos perforados o porosos que les sirven de soporte. Como esta configuración suele utilizarse para el tratamiento de líquidos cargados, se colocan, a veces, en el interior de los tubos, dispositivos especiales destinados a producir altas turbulencias que aseguren elevadas velocidades de circulación sobre la superficie de las membranas e impidan la deposición sobre ellas de las distintas sustancias en suspensión existentes en el líquido a tratar.

## Configuraciones de los módulos de membranas

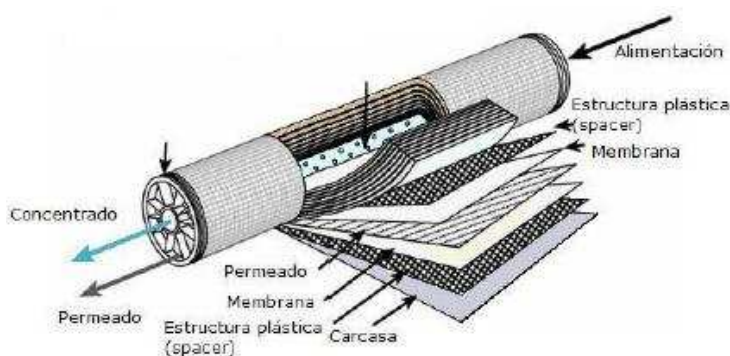
CARACTERÍSTICA		DE PLACAS	TUBULAR	ESPIRAL	FIBRA HUECA
Superficie de membrana por módulo (m <sup>2</sup> )		15-50	1,5-7	30-34	370-575
Volumen de cada módulo (m <sup>3</sup> )		0,30-0,40	0,03-0,1	0,03	0,04-0,08
Caudal por módulo (m <sup>3</sup> /d)		9-50	0,9-7	30-38	40-70
Grado de compactación (m <sup>2</sup> de membrana por m <sup>3</sup> )		50-125	50-70	1.000-1.100	5.000-14.000
Productividad por unidad de superficie (m <sup>3</sup> /d por m <sup>2</sup> )		0,6-1	0,6-1	1-1,1	0,1-0,15
Productividad por unidad de volumen (m <sup>3</sup> /d por m <sup>3</sup> )		30-125	30-70	1.000-1.250	900-1.500
Conversión de trabajo por módulo (%)		10	10	10-50	30-50
Pérdida de carga por tubo de presión (bar)		2-4	2-3	1-2	1-2
Intercambiabilidad por otra marca		Nula	Nula	Total	Nula
Tolerancia frente a las sustancias coloidales		Mala	Buena	Mala	Mala
Tolerancia frente a las sustancias en suspensión		Mala	Buena	Mala	Muy mala
Comportamiento frente a la limpieza	Mecánica	Regular	Bueno	No aplicable	No aplicable
	Químicas	Bueno	Bueno	Bueno	Bueno
	Agua a presión	Excelente	Bueno	Bueno	Bueno
Pretratamiento necesario		Coagulación + filtración a 5 micras	Filtración	Coagulación + filtración a 5 micras	Coagulación + filtración a 1 micra
Aplicaciones		Alimentación	Alimentación	Desalación de aguas salobres y de mar	Desalación de aguas salobres y de mar
		Líquidos poco cargados	Aguas residuales y líquidos cargados	Obtención de aguas de alta pureza	Obtención de aguas de alta pureza
		Concentración y recuperación de sustancias	Concentración y recuperación de sustancias	Aguas residuales y líquidos poco cargados. Concentración y recuperación de sustancias	Concentración y recuperación de sustancias

La configuración de fibra fina hueca ("*hollow fiber*") usa la membrana en la forma de fibras huecas que son extrudadas del material celulósico o del material polimérico. Se fabrican con varios centenares de miles de membranas de fibra hueca dobladas en forma de "U" y colocadas paralelamente a un tubo central. Las membranas se fijan en ambos extremos mediante resina epoxi para dar estabilidad al haz así formado. La unidad del módulo de membrana del tipo de fibra hueca ofrece un área mayor de membrana por unidad de volumen, lo cual hace que los sistemas resulten más compactos. No obstante, en esta configuración el flujo específico de agua por unidad de área de membrana es relativamente bajo (debido a la muy alta área superficial de las fibras) pudiendo resultar laminar. Por lo tanto, la polarización de la concentración en la

superficie de la membrana es alta y debe cuidarse la formación de incrustaciones y/o ensuciamiento frecuente en la membrana. Las membranas del tipo de fibra hueca requieren que el agua de alimentación tenga muy baja concentración de sólidos suspendidos, SS. Esta es una de las razones por la cual los módulos de fibra hueca no son tan utilizados como los módulos de arrollamiento en espiral.



La configuración de arrollamiento en espiral se obtiene a partir de una hoja formada con dos placas planas de membrana separadas por un colector de permeado. Para obtener un elemento se enrollan varias hojas de éstas alrededor de un tubo plástico hueco, en cuyo centro se recogerá el permeado. El típico elemento de la membrana industrial de arrollamiento en espiral tiene como dimensiones principales 100 ó 150 centímetros de largo y 20 centímetros de diámetro. La fracción de recuperación obtenible en cada módulo depende de la longitud que pueda atravesar la salmuera. Para operar a valores de recuperación aceptables, los módulos de las membranas de arrollamiento en espiral se arman con tres a siete elementos del tipo de los indicados, conectados en serie en un tubo de presión.



**Membrana tipo espiral**

El deterioro de las membranas, que se irá produciendo a lo largo de la vida operativa de la planta, creará una reducción del flujo permeado. De esta manera, la instalación se diseña para obtener el caudal deseado al cabo de unos años. Es por esto, que en el momento de la puesta en marcha el caudal que se obtiene es superior.

Las membranas tienen una superficie limitada y también una producción determinada. Como por otra parte el porcentaje de recuperación por elemento es

relativamente pequeño, 10-50 %, si colocáramos un solo elemento en la instalación, una gran parte del caudal de agua a tratar sería desperdiciado como salmuera, con la consiguiente ineficiencia del sistema. De aquí surgen los distintos tipos de estructuras de producción en que se colocan las membranas.

Para aprovechar mejor el caudal de salmuera las membranas se colocan en serie, para que el rechazo de una membrana sea utilizado como alimentación de la siguiente, pero para adaptarse a la producción deseada deben colocarse por tanto los distintos módulos en paralelo y a partir de aquí tendríamos las siguientes estructuras básicas de producción, existiendo otras configuraciones en aplicaciones reales:

*1.- Configuración básica:*

- Un Solo Paso (Simple – 1 etapa)
- Etapas de Concentración (1, 2 ó más etapas).
- Pasos de Desalación (Etapa de producto).

*2.- Otras configuraciones en aplicaciones reales:*

- Recirculaciones y Mezcla de Permeados.
- Separación de Permeados. Sistemas Híbridos de Membranas.
- Combinación con otras tecnologías de separación de sales.

Para comprender el funcionamiento de dichas estructuras, es necesario conocer previamente dos conceptos importantes:

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

**b.- Paso:** Es el conjunto de tubos de presión o membranas que siendo alimentadas con los caudales de agua que salen de las membranas de la primera etapa de la ósmosis precisan de otra fuente de energía distinta de la anterior para recuperar un nuevo caudal. Resumiendo, si el caudal de agua producto o el caudal de rechazo de una instalación de ósmosis es rebombeado mediante otra bomba que eleva su anterior presión, para alimentar a otro conjunto de membranas, estamos hablando de un paso.

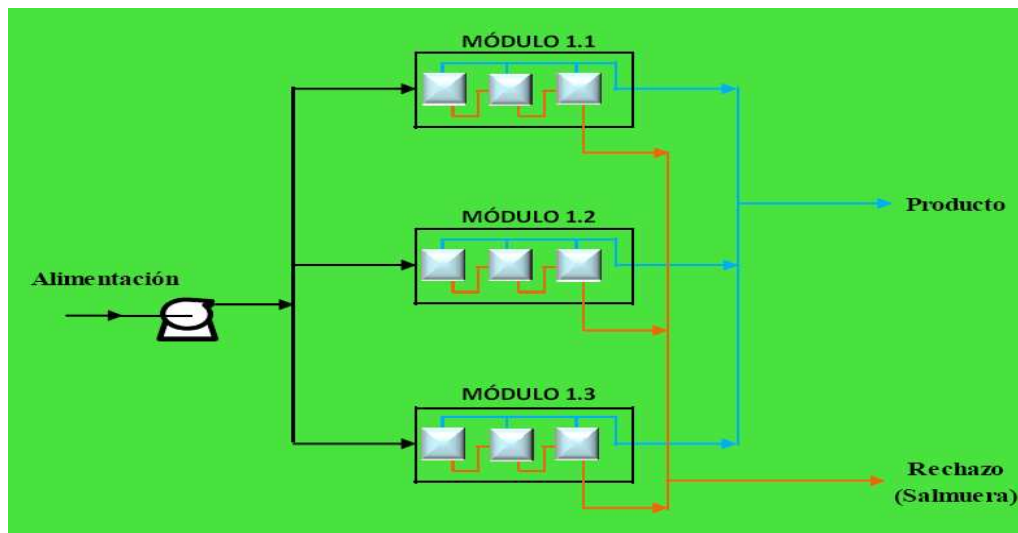
A partir de estos conceptos, las estructuras de producción se pueden describen de la siguiente forma:

• *Membranas en serie y módulos en paralelo (Simple - 1etapa):* Es un conjunto de membranas individuales o en tubos de presión, colocados en paralelo, que son alimentadas desde una bomba. La figura muestra una disposición de membranas en serie y módulos en paralelo, configurando una etapa simple.

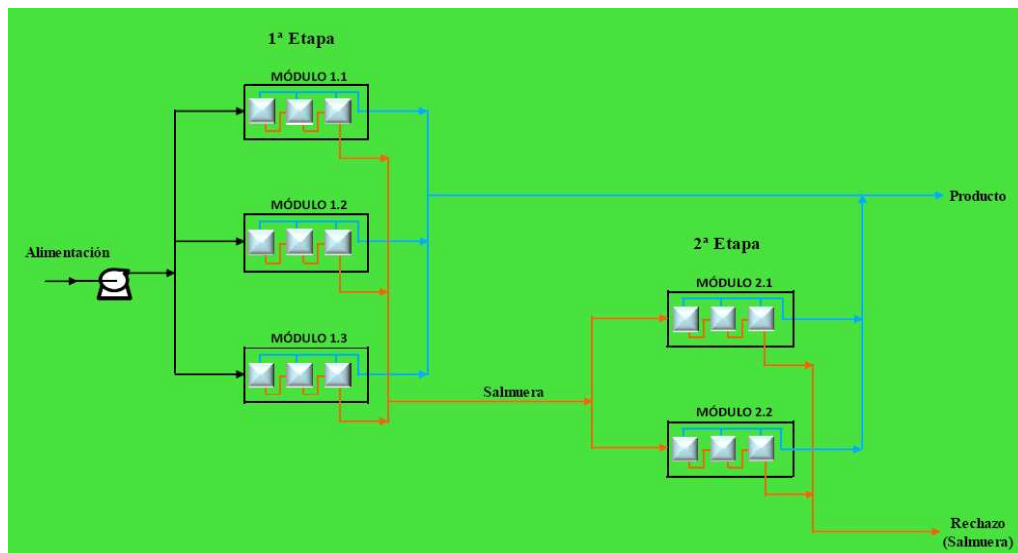


Este tipo de estructuras, demasiado ineficientes, solo se usa en instalaciones piloto o experimentales, o en la industria para extracción de jugos u otros líquidos o sólidos de gran valor.

También las instalaciones de agua de mar, por su baja recuperación, admiten este tipo de estructura. Este tipo de configuración permite operar para alrededor de 50% o más de conversión de agua de mar.



• *Etapas de salmuera (1, 2 ó más etapas):* Es la estructura más frecuente de producción y consiste en una serie de tubos colocados en paralelo y otros en serie, de forma que la salmuera de los primeros es utilizada como alimentación de los segundos.



Esta configuración también llamada configuración en árbol permite producir más o mejor. La figura muestra una disposición de dos etapas que permite conversiones mayores del 50 %. En este tipo de configuración el rechazo de la primera etapa se introduce como alimentación en la segunda etapa, el resultado es la consecución de una mayor producción de permeado.

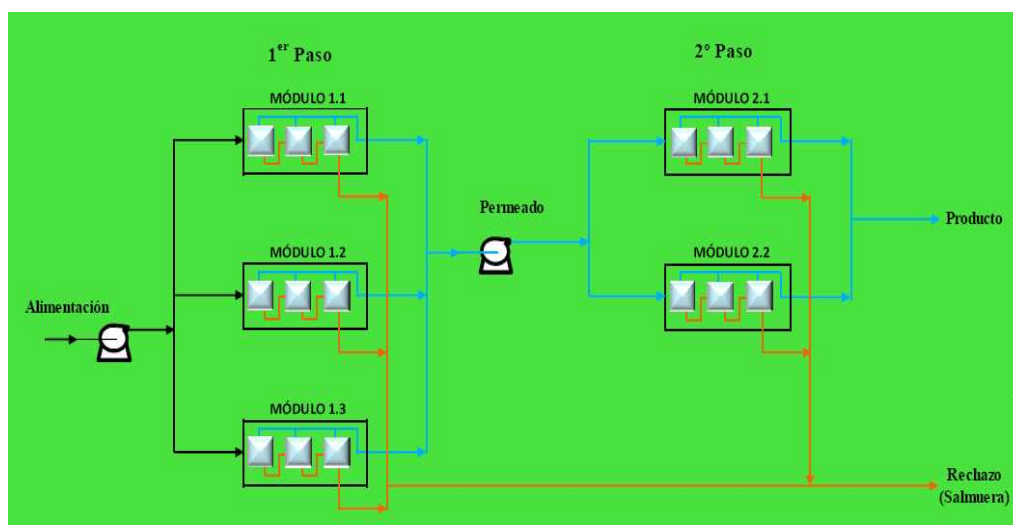
Dado que en cada etapa se recupera una parte de producto, el caudal de salmuera que llega a la segunda etapa es menor que el inicial y así sucesivamente, por lo que en cada etapa disminuye el número de tubos.

De acuerdo con las características de recuperación de la membrana, el porcentaje máximo de recuperación por tubos de presión de 6 elementos es del 50%, por lo que el máximo de etapas que se suelen colocar son tres. Mediante la primera se recuperaría el 50%, mediante la segunda un 25% y mediante la tercera un 12,5%. En total sería un 87,5%.

Recuperaciones mayores sería difícil y no justificarían una cuarta etapa: sería preferible recuperar algo más de límite del 50% en cada una de las tres etapas.

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

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



Como resultado de esta última configuración, se disminuye la cantidad de permeado (sólo será generado el permeado de la segunda etapa como producción), pero se aumenta la calidad del mismo.

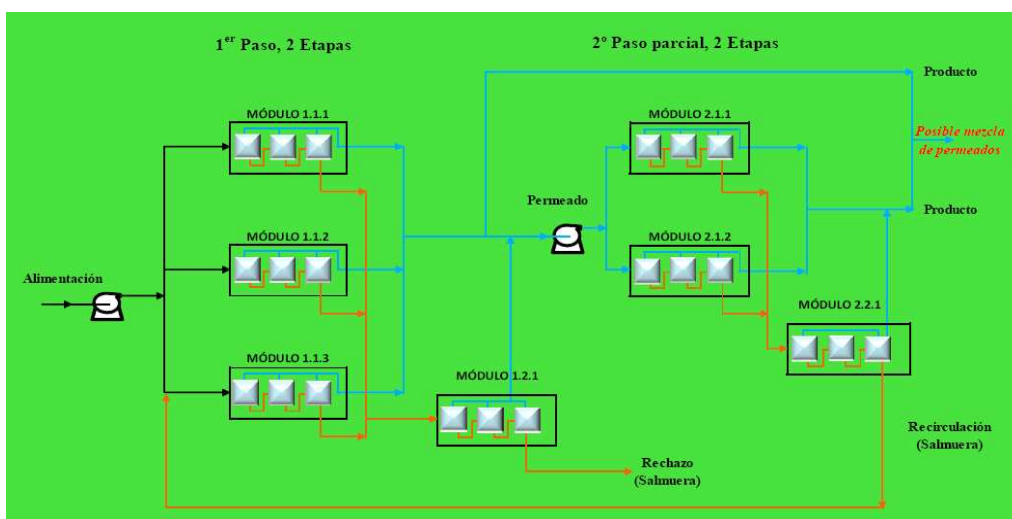
Según la figura, el permeado de la primera etapa se introduce como alimentación de la segunda etapa; para ello es necesario el empleo de una bomba inter-etapas.

Su utilización es cada vez menor, inicialmente se empleaba en las instalaciones de agua de mar en las que era imposible conseguir un agua de suficiente calidad con un solo paso.

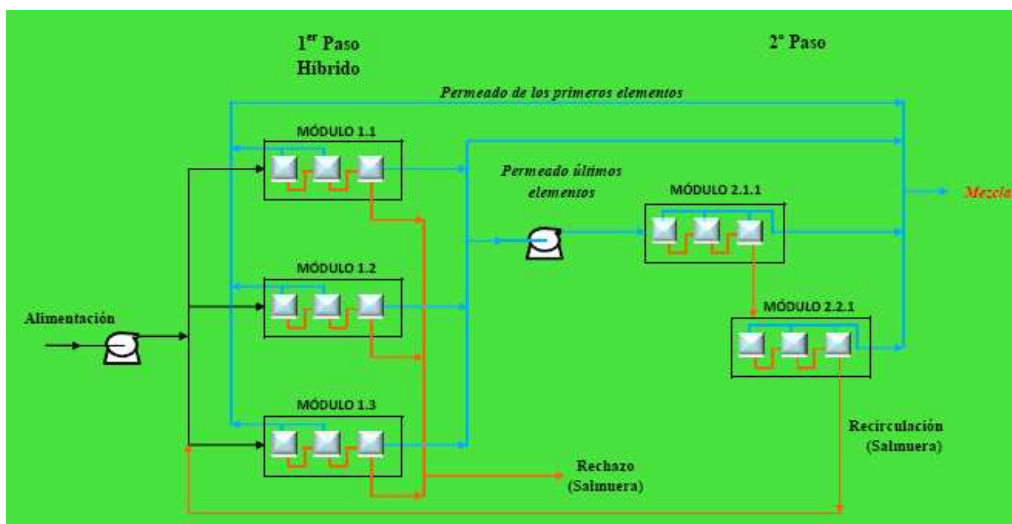
La posterior aparición de membranas de agua de mar con rechazo superiores al 99,3%, que permiten obtener agua potable en un solo paso, ha hecho innecesario este tipo de instalaciones.

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

- *Recirculaciones y Mezcla de Permeados*: Con frecuencia en aplicaciones reales suele darse una combinación de configuraciones básicas adaptadas a las necesidades específicas de cada caso, aprovechando al máximo cada una de las distintas sub-corrientes y minimizando los vertidos.

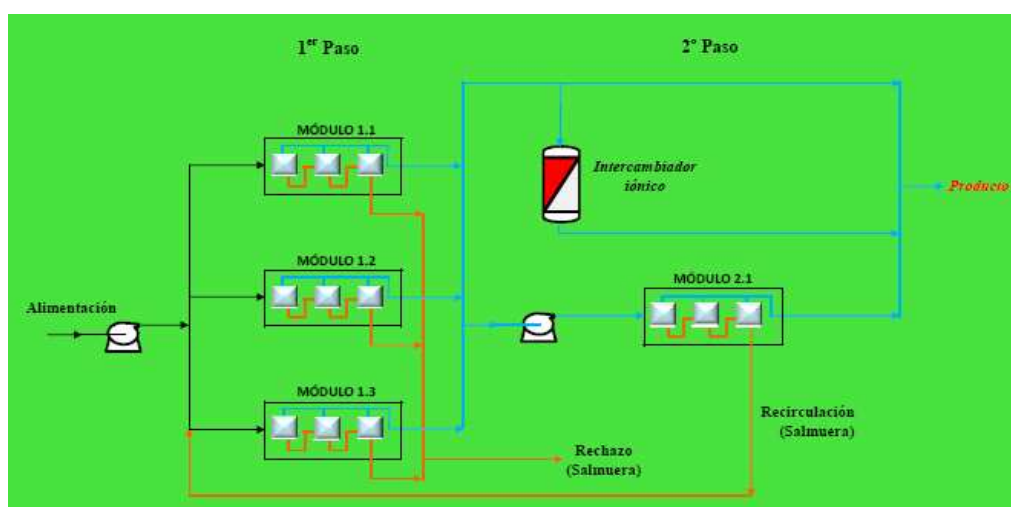


- *Separación de Permeados. Sistemas Híbridos de Membranas*: El concepto de una segunda etapa con diferentes membranas puede adaptarse a la inclusión de membranas diferentes dentro de un mismo tubo de presión.



Debido a la peor calidad del permeado de la segunda extracción, estos diseños suelen demandar un tratamiento posterior (2º paso o de otro tipo) de esta corriente, si bien, éste se reduce mucho en dimensiones.

- *Combinación con otras tecnologías de separación de sales:* Hay muchas formas para mejorar la eficiencia y costo del agua como producto de las plantas de desalación. Un medio es combinar dos o más sistemas de desalación, resultando una planta híbrida. Los sistemas híbridos pueden ofrecer mejoramiento en el funcionamiento, ahorros en el pretratamiento y reducción en el costo total del agua. Las combinaciones con otras tecnologías pueden ser muy variadas, a modo de ejemplo, presentamos la combinación con intercambio iónico empleada para controlar el boro y con un 2º paso pequeño para reducir la salinidad.



Las aplicaciones de la ósmosis inversa y las del intercambio iónico no son intercambiables. La desmineralización por Intercambio Iónico puede proporcionar agua de excelente calidad muy superior a la obtenida por Ósmosis Inversa. Pero no es posible emplear el intercambio iónico para desmineralizar aguas de alta concentración salina. Los rendimientos serían muy pequeños y los consumos de reactivos muy elevados. Lo que sí puede tener sentido es un paso previo de OI antes de desmineralizar un agua con una alta concentración salina. Con ello el consumo de reactivos y los tiempos de parada, para la regeneración de las columnas de intercambio, disminuirían muchísimo.

Entre las propuestas más interesantes, realizada a través del tiempo en relación a la OI, tenemos varios sistemas híbridos de desalación, a saber:

- Combinación de Ósmosis Inversa con procesos de destilación.
- Combinación de Ósmosis Inversa con procesos de compresión de vapor.
- Combinación de Ósmosis Inversa con procesos de ultrafiltración y nanofiltración.

- *Ósmosis inversa con destilación:* La integración de los sistemas MSF y OI ó MED y OI en la misma localización ofrecen la oportunidad de reducir costos y reunir

diversos requerimientos de la calidad del agua como producto cuando las plantas industriales son parte de la base del cliente.

El costo se puede reducir mediante el uso de la salmuera rechazada de la planta OI como alimentación en la planta de destilación, de tal manera que reduce el pretratamiento químico y los costos de entrada y salida. Otra opción es usar la corriente de la salmuera rechazada de la planta de destilación como alimentación para la planta OI.

En el caso del MED, el agua de mar, requerida como agua de enfriamiento por el efecto del condensador (último efecto), es calentada arriba de 3-5 °C. Esta agua de mar ligeramente calentada, puede ser usada como agua de alimentación para OI. Una elevación de temperatura de 5 °C del agua de alimentación significa alrededor de 15-20% menos área de la membrana requerida. Además la salmuera rechazada de la planta OI puede ser usada como alimentación para el MED, produciendo agua de alta calidad como producto.

- *Combinación de OI con CV*: Las tecnologías CV y OI, pueden ser acopladas en un sistema híbrido, con el mismo conjunto de ventajas ofrecidas por las plantas híbridas de destilación y Ósmosis Inversa.

Ambas unidades solo consumen energía eléctrica, por lo tanto no se requiere de una fuente de calor.

- *Combinación de OI con ultrafiltración y nanofiltración*: Se han llevado a cabo el uso de ultrafiltración (UF), como pretratamiento en plantas OI y nanofiltración (NF) como un medio para mejorar el funcionamiento de las plantas OI y MSF. La adopción del sistema de UF reduce la contaminación y las incrustaciones en las plantas OI, mejorando la vida de la membrana. La NF incrementa la recuperación del producto en plantas OI por eliminación parcial de las sales y de la mayoría de las incrustaciones constituyentes. Una combinación de NF, agua de mar OI y MSF puede ser una opción prometedora.

**2.2.4.- Limpieza de las membranas:** Durante la operación normal de los módulos de ósmosis inversa se puede presentar la acumulación de material en la superficie de las membranas. Este material puede ser de naturaleza inorgánica y orgánica y es lo suficientemente fino como para atravesar los filtros de cartucho del pretratamiento. La acumulación de este material provoca la obturación gradual de las membranas y reduce el desempeño de la ósmosis. Esta situación queda en evidencia cuando se requiere la aplicación de mayor presión para mantener el mismo porcentaje de rendimiento, se incrementa el consumo de energía y el costo de operación.

Cuando las membranas se ensucian y sobre todo si dicho ensuciamiento tiene lugar en un corto período de tiempo, las posibilidades de recuperación dependen fundamentalmente de la rapidez con que se actúe en remover el material de riesgo



mediante la aplicación del adecuado proceso de limpieza. Si una membrana sucia continua operando, su deterioro puede ser irreversible, con problemas tan difíciles de resolver como el ensuciamiento en el interior de los poros, dificultando la recuperación total de la membrana a pesar de que se use agentes químicos a elevadas temperaturas.

A modo de resumen, es necesario realizar una limpieza si ocurre cualquiera de las situaciones siguiente:

- El paso de sales se incrementa en más de un 15%
- La producción aumenta o disminuye más de un 10%
- El caudal de rechazo varía en más de un 10%
- La pérdida de carga de los módulos se incrementa en más de un 20%
- La presión de alimentación se incrementa en más de un 10%
- Ante largos períodos de parada (más de una semana)
- Antes de aplicar cualquier reactivo de regeneración de las membranas
- Antes de una parada de más de 24 horas, tras haber operado con un producto orgánico susceptible de favorecer los desarrollos biológicos (ácido cítrico por ejemplo).

Consecuentemente, lo primero que hay que conocer es el origen y el tipo de ensuciamiento producido para, por un lado tratar de eliminarlo de las membranas, y por otro, evitar que se vuelva a producir en el futuro.

El ensuciamiento se debe a las interacciones soluto-soluto y soluto –membrana, pero para cada aplicación tiene un origen determinado, de acuerdo con el material de la membrana y la solución a tratar:

- *Físico-químicos*: adsorción de moléculas sobre la superficie de la membrana o su interior.
- *Químicos*: poca solubilidad en la capa de polarización o insolubilización por cambio de condiciones. Precipitación sobre la superficie de la membrana de sales minerales y óxidos metálicos.
- *Mecánicos*: depósitos en los poros de la membrana, bloqueándolos.
- *Hidrodinámicos*: irregularidad en el reparto del flujo, que acelera la concentración por polarización y el ensuciamiento en zonas de la membrana que trabajan con conversiones elevadas, y la existencia de zonas muertas, que tienen muy poco flujo.
- *Otros*: ensuciamientos extraños, como el de azufre coloidal, cuando en un pozo de captación de agua, hay  $H_2S$ , y se inyecta cloro o entra aire en el pozo, se puede llegar a formar azufre coloidal por oxidación del  $H_2S$  por parte del oxígeno o del cloro. Este azufre coloidal es muy difícil de eliminar.

Los agentes causantes del ensuciamiento en las membranas se dividen en cinco categorías:

- *Metales*: suelen ser hierro, manganeso y aluminio. A veces también se encuentran zinc, cobre y níquel. El hierro y el manganeso suelen encontrarse en aguas subterráneas como iones divalentes solubles. Si se exponen estos iones al aire o al cloro precipitan sobre la membrana en forma de hidróxidos (insolubles). El ensuciamiento por hierro también puede ser debido a la corrosión en las tuberías o equipos. Otra fuente pueden ser los coagulantes que se usan antes de los filtros, que suelen ser sales de hierro ( $\text{FeCl}_3$  es el más común). El ensuciamiento por hidróxido de aluminio también es frecuente y suele ocurrir por un exceso en la utilización de coagulantes basados en aluminio.

- *Sales*: la sobresaturación de algunas sales poco solubles puede incrustar la superficie de las membranas. Las más frecuentes son carbonato cálcico, sulfatos de calcio, estroncio y bario. Menos comunes son la sílice y el fluoruro de calcio. La sílice es difícil de eliminar una vez depositada.

- *Coloides y sólidos en suspensión*: son los agentes de ensuciamiento más comunes y pueden ser arcillas, sílice coloidal y/o bacterias. Los coloides son partículas cuyo diámetro es inferior a una micra y no se decantan de forma natural, permaneciendo en suspensión. Las partículas sólidas en suspensión suelen tener un tamaño superior a una micra y suelen decantarse de forma natural con el tiempo.

- *Compuestos orgánicos*: los ácidos húmicos y fúlvicos resultan de la degradación de hojas y otras plantas que ocurre en aguas superficiales. Pueden causar graves problemas de ensuciamiento dependiendo de la naturaleza del agua y suelen ensuciar más a la poliamida que al acetato de celulosa. Los ácidos de elevado peso molecular son más problemáticos. Los iones calcio y magnesio pueden contribuir a este tipo de ensuciamiento al servir de nexo entre las membranas aniónicas y estos ácidos.

Dentro de este apartado también se incluye el ensuciamiento biológico. Cuando la solución de aporte contiene suficientes elementos nutritivos se favorece el rápido desarrollo de microorganismos en el interior de los módulos. Dichos desarrollos pueden afectar al rendimiento de la instalación de tres formas distintas:

- Destruyendo la capa activa de las membranas, ya que pueden digerir enzimáticamente el acetato de celulosa.
- Ensuciando las membranas: produce los mismos efectos que el ensuciamiento por coloides.
- Apareciendo bacterias en el permeado: las membranas, por sí mismas, no permiten el paso de ninguna bacteria, virus, etc., desde la solución de aporte al permeado, el permeado está separado del rechazo mediante juntas tóricas. Algún pequeño fallo en estas juntas permitiría el paso de algunas bacterias al permeado, contaminándolo.

- *Agentes químicos*: suelen proceder de reacciones químicas entre dos o más compuestos químicos incompatibles. El ejemplo más común es la reacción entre un antiincrustante polimérico (suelen ser poliacrilatos) y un coagulante orgánico.

Los efectos que produce cada tipo de ensuciamiento sobre los valores normalizados del paso de sales, sobre la pérdida de carga de los módulos y sobre el caudal de permeado así como la localización del problema se muestran en la siguiente tabla:

Tipo de ensuciamiento	Paso de sales	Caudal de permeado	Pérdida de carga	Localización del problema	Métodos de confirmación
Precipitación de sales : CaCO <sub>3</sub> CaSO <sub>4</sub> BaSO <sub>4</sub> SrSO <sub>4</sub> CaF <sub>2</sub> SiO <sub>2</sub>	Incremento importante (10-25%)	Reducción moderada o importante	Aumento moderado o importante	En las últimas membranas del tubo	- Comprobación del SDI en el rechazo - Análisis de los iones de la solución de limpieza
Precipitación de óxidos e hidróxidos metálicos	Incremento rápido(24 horas) e importante (mayor o igual al doble)	Reducción importante y rápida (20-50%)	Aumento importante y rápido ( mayor o igual al doble)	En las primeras membranas	- Análisis de los iones metálicos en la solución de limpieza
Depósitos de partículas abrasivas	Incremento según el alcance del problema	Incremento según el alcance del problema	Estable o ligera reducción	Sobre todo en la primera membrana	- Presencia de partículas en la solución de aporte - Análisis destructivo de las membranas
Ensuciamiento coloidal	Incremento notable pero no rápido (mayor o igual al doble)	Reducción importante pero no rápida (50%)	Aumento notable pero no rápido (mayor o igual al doble)	Primeras membranas	- Medida del SDI de la solución de aporte - Análisis por difracción de rayos X
Desarrollos biológicos	Incremento gradual e importante sobre todo tras las paradas si no se añade un biocida (mayor o igual al doble)	Descenso gradual e importante sobre todo tras las paradas si no se añade un biocida (50%)	Incremento gradual e importante sobre todo tras las paradas si no se añade un biocida (mayor o igual al doble)	En todas, más acusado en las primeras	- Recuento de bacterias tanto en permeado como en rechazo - Existencia de desarrollos en tuberías y recipientes
Compuestos orgánicos	Reducción moderada	Reducción importante	Aumento muy ligero	En todas las membranas	- Análisis destructivo de las membranas

El control del ensuciamiento de membranas tiene un vacío grande en la práctica de la ósmosis inversa desde hace mucho tiempo. Cada planta tiene que encontrar su





solución de lavado óptima, ya que, literalmente no existen dos aguas con condiciones idénticas, y la disponibilidad de reactivos varía en cada caso. La selección de un método específico depende del agente que provoca el ensuciamiento, pero en principio se hace un enjuague con agua para que la suciedad no se quede adherida a su superficie. Luego se hacen unos tratamientos, hasta que recupere sus condiciones iniciales. Sin embargo, la experiencia establece ciertas reglas generales que pueden acortar la búsqueda de la solución óptima:

**a.-** Limpiaremos las membranas lo menos posible. Si estamos lavando más de 4 veces al año, trataremos de mejorar el pretratamiento, para evitar tantas sucesivas limpiezas. Los lavados cuestan dinero, irrumpen la producción, y pueden acortar la vida útil de las membranas.

**b.-** Seguiremos las recomendaciones de los fabricantes de las membranas. Los reactivos que ellos recomiendan son los más adecuados para cada tipo de membrana.

Normalmente, se suelen distinguir los siguientes métodos de limpieza para el control del ensuciamiento de membranas en el proceso de ósmosis inversa:

- Limpieza hidráulica
- Limpieza mecánica
- Limpieza química
- Limpieza eléctrica

**1.- Limpieza Hidráulica.** Incluye el lavado con permeado a presión y retroalimentación, que solo es aplicable a membranas de microfiltración y ultrafiltración. Se utiliza normalmente durante las paradas, a fin de:

- Reducir el retorno de solvente debido al fenómeno de ósmosis natural.
- Desplazar totalmente la solución a tratar del interior de las tuberías y de los módulos del sistema, impidiendo así la corrosión de las partes metálicas y la precipitación de sales.
- Desplazar reactivos cuando se ha sometido a una limpieza química.

Son limpieza hidráulica también la presurización y despresurización, y el cambio en la dirección del flujo con una frecuencia dada.

**2.- Limpieza Mecánica.** Solo se puede aplicar a sistemas tubulares, donde se utiliza un cepillo o una esponja para retirar la suciedad de las membranas. También haciendo circular bolas de esponja, como se acostumbra a hacer con los condensadores de las centrales térmicas.

Esta limpieza mecánica no es posible en los módulos espirales ni de fibra hueca, por no tener acceso a su superficie activa. Pero debido a lo delicado de la superficie activa no se recomienda este método de limpieza, en general.



**3.- Limpieza Química.** Es el método más importante para reducir el ensuciamiento, con diversos químicos que se utilizan separados o en combinación, que se hacen recircular por los módulos para disolver las precipitaciones o remover depósitos de las membranas.

Los pasos recomendados a seguir para realizar la limpieza química son:

- Identificación del problema
- Selección del sistema de limpieza
- Formulación para el tipo de ensuciamiento.

*La tabla siguiente recoge las formulaciones de limpieza más recomendables en función del tipo de ensuciamiento existente.*

<i>Formulación química</i>	<i>CaCO<sub>3</sub></i>	<i>CaF<sub>2</sub></i>	<i>CaSO<sub>4</sub> BaSO<sub>4</sub> SrSO<sub>4</sub></i>	<i>Óxidos metálicos</i>	<i>Coloides inorgánicos</i>	<i>Desarrollos biológicos</i>	<i>Compuestos orgánicos</i>	<i>Sílice</i>
Ácido clorhídrico pH 2	x				x			
H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub> 0,5%	x		x	x				
NH <sub>2</sub> SO <sub>3</sub> 0,2%	x		x	x				
Ácido cítrico 2% NH <sub>4</sub> OH pH 2	x		x	x	x			
Ácido cítrico 2% Na <sub>2</sub> EDTA 2% NH <sub>4</sub> OH hasta pH 4			x	x	x			
Ácido cítrico 2% NH <sub>4</sub> OH hasta pH 8		x						
Na <sub>2</sub> EDTA 1,5% NaOH hasta pH 7-8		x						
Na <sub>4</sub> EDTA 1,5% HCl hasta pH 7-8		x						
Na <sub>2</sub> EDTA 1% NaOH hasta pH 11-12						x	x	x
NaOH pH 11-12					x			x
Ácido cítrico 2,4% Bifluoruro amónico 2,4% pH 1,5-2,5	x				x			x
Na <sub>2</sub> S <sub>2</sub> O <sub>4</sub> 1-2,4%				x				
Fosfato trisódico 1% Trifosfato sódico 1% Na <sub>2</sub> EDTA 1%						x	x	
Dodecil sulfato sódico 0,5% NaOH hasta pH 11-12			x		x		x	x
Na <sub>2</sub> EDTA 0,1% NaOH hasta pH 11-12						x	x	x
Hexametáfosfato de sodio 1%				x	x		x	
Perborato sódico 0,3% Dodecil sulfato sódico 0,25% pH 10					x	x	x	x
Trifosfato sódico 2% Dodecil sulfato sódico 0,2% pH 10					x		x	x
NaHSO <sub>3</sub> 0,1%						x		
Formaldehído 0,1%						x		



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

El conocimiento de la carga eléctrica superficial de las membranas es importante a efectos de su utilización en aguas que pueden presentar problemas y para poder determinar su limpieza mediante la aplicación de corriente eléctrica.

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

Si trabajamos con membranas de fibra hueca y están padeciendo problemas de taponamiento o incrustaciones, que acortan la vida de las membranas a menos de 3 años, la primera recomendación es cambiar al tipo espiral. Se recomienda esto por una razón muy sencilla: se ha demostrado que las membranas del tipo espiral, en la mayoría de los casos se lavan y regresan al 100% de su capacidad de diseño. Las de tipo fibra hueca nunca regresan al 100% y van perdiendo productividad hasta que resulta incosteables operarlas.

La limpieza de las membranas de fibra hueca requiere además la aplicación de una capa química, que se adhiere a la superficie de la membrana y que es la responsable del rechazo de sales. Es decir, que actúa como si esta capa fuera una especie de membrana dinámica; comprobando que esta capa actúa como barrera protectora de la matriz de la fibra, de forma que en situaciones de ambientes oxidantes o con productos extraños en el agua, es esta capa y no la verdadera membrana la que se deteriora y por tanto puede ser sustituida fácilmente.

Las etapas de limpieza utilizadas normalmente para solucionar el ensuciamiento de las membranas de ósmosis inversa son:

1. Desplazamiento del agua de mar.
2. Llenado de membranas con la solución de limpieza.
3. Recirculación a bajo caudal 15- 30 minutos.
4. Remojo de las membranas de 1 a 12 horas.
5. Recirculación al máximo caudal 1 hora.
6. Desplazamiento del producto de limpieza con agua de mar.

El caudal de recirculación, a máximo caudal, está entre 30 y 45 gpm o entre 6 y 10 m<sup>3</sup>/h por tubo de 8".

La frecuencia de los periodos de mantenimiento va a depender de la calidad del agua de alimentación y del desempeño del pretratamiento.

**2.2.5.- Recuperación de energía:** El rechazo (salmuera) al salir de las membranas conserva gran parte de la presión del agua de alimentación, por ello es conveniente recuperar esta presión.

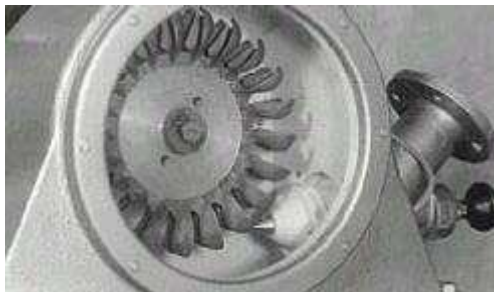
Como es sabido, para producir la separación de las sales y el agua en las membranas, es necesario darle a éstas una presión superior a la presión osmótica de la disolución salina. Esto tiene como consecuencia práctica que, para desalar el agua de mar, sea preciso llevar el agua de mar hasta una presión de 70 bares, aproximadamente, en la entrada de las membranas. Esta presión no se pierde en el interior de las membranas, sino que la salmuera a la salida tiene esa misma presión menos las pérdidas de carga al pasar por las membranas, unos tres bares aproximadamente, es decir, a la salida de las membranas de ósmosis inversa la salmuera tiene unos 67 bares de presión. Como esta salmuera debe ser devuelta al mar, hay que quitarle previamente esa presión. Las primeras plantas de ósmosis inversa, de tamaño muy pequeño y en las que la preocupación era el comportamiento de las membranas, solían tener una válvula reductora de presión, para romper carga de la salmuera antes de su envío al mar. Esta situación duró muy poco, pues pronto se vio la mejora que suponía recuperar la energía de la salmuera en vez de tirarla. Por otra parte, las plantas aumentaban de tamaño y en términos absolutos la energía que se tiraba era muy importante. La primera idea para recuperar la energía fue instalar una *bomba invertida* movida por la presión y el caudal de salmuera. Este sistema de recuperación de la energía era poco flexible con las variaciones en la operación de la planta; a lo largo del año las membranas se ensucian, con lo que la presión de salida de la salmuera varía. Así mismo con las variaciones de temperatura la presión de alimentación había que cambiarla y, en consecuencia, variaba la presión de salida de la salmuera. Al ser el sistema recuperador una bomba invertida, su funcionamiento venía definido por la curva caudal/altura, pero al variar la presión de entrada debería variar el caudal siguiendo la curva; como esto no era posible, pues tendríamos producciones variables, había que tener un pequeño *by-pass* con una válvula reductora de presión por donde desviar el caudal que, en determinadas situaciones, la bomba no podía evacuar. En resumen, se traducía en ineficiencias del sistema.

La introducción de la *turbina Pelton* como sistema de recuperación de la energía de la salmuera solucionó gran parte de estas ineficiencias, ya que tenían un mayor rendimiento en la recuperación, 88 % frente al 77 % de la bomba invertida y, además, la curva de operación de una turbina Pelton es un área, que admite variaciones en la presión de entrada a la turbina sin que por ello se afecte al rendimiento. Por otra parte, en la turbina Pelton la salmuera se descarga a la atmósfera, es decir, se aprovecha toda la energía de presión que trae. En cambio, las bombas invertidas necesitaban una contrapresión en la descarga, el equivalente al NPSH (Net Positive Suction Head) de las bombas, pues si no, cavitaban; esto suponía perder parte de la energía que traía la salmuera.

Las turbinas Pelton básicamente consisten en una boquilla que transforma el fluido a presión en un chorro a alta velocidad que incide sobre los álabes de una turbina

que transforma esta presión en un movimiento giratorio que puede acoplarse al motor de la bomba de alta presión.

### ***Turbina Pelton***



El conversor hidráulico (Turbocharger) es un equipo que combina en un mismo eje una bomba centrífuga y una turbina (bomba invertida) no usa motor y la energía que recupera la turbina la emplea la bomba para incrementar la presión del agua de alimentación. Se puede utilizar en las dobles etapas donde la bomba de alimentación lleva variador de velocidad y puede ser que se salga del rango de funcionamiento de la turbina Pelton. El rendimiento varía en función del caudal que llega a la bomba, está entre un 60-80% y los caudales de 300 a 5000 gpm. Normalmente está pensado para agua salobre o en instalaciones de agua de mar pequeñas.

Hace algunos años que han aparecido nuevos sistemas que sobrepasan el 90% de eficacia en la recuperación de energía, con el consiguiente ahorro energético para la planta de ósmosis inversa (uno de sus puntos más problemáticos). Entre estos sistemas se encuentran las “*Cámaras de Intercambio de Presión*”; que al igual que los cambiadores de calor intercambian el calor entre dos corrientes, en las cámaras de intercambio de presión lo que se intercambia es la presión entre dos corrientes de agua. Los tipos de Cámaras de Intercambio de Presión (CIP) que existen en el mercado se pueden agrupar en dos grupos: *de desplazamiento* y *de rotación*.

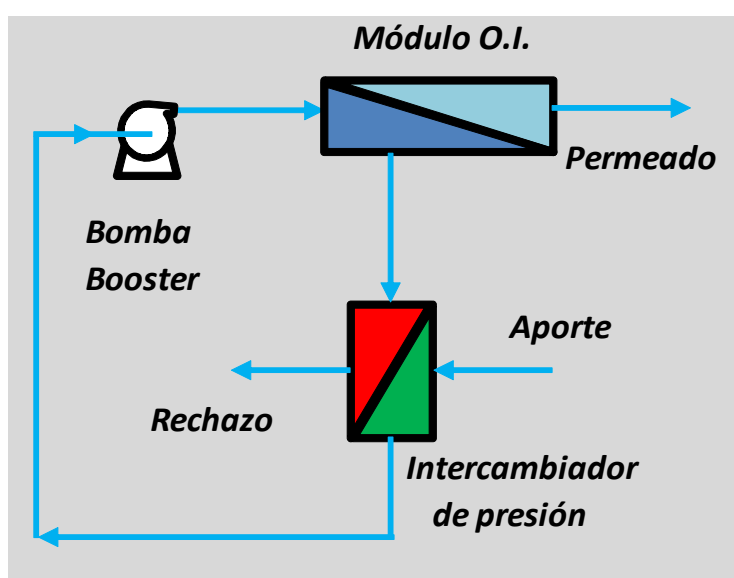
Las CIP de desplazamiento transmiten la energía potencial (presión) que tiene la salmuera al agua de mar en unos cilindros mediante pistones, sin tener que transformar esta energía potencial en energía de rotación. De forma resumida se puede decir que consisten en dos cilindros con pistones y un juego de válvulas. En un lado de uno de los cilindros entra el agua de alimentación sin presión. Cuando se ha llenado se abre una válvula y comienza a entrar por el lado opuesto el rechazo con alta presión, comunicándole la misma al agua de alimentación. Cuando ha llegado al final de la carrera vuelve a repetirse el ciclo. En el otro cilindro se da el mismo ciclo pero invertido de forma que se tenga un caudal lo menos pausado posible.

Algunos fabricantes realizan el contacto entre agua de mar y salmuera directamente, ya que, gracias a la diferencia de salinidad entre ellas, tienen diferencia de densidades y de viscosidad, lo que permite realizar esta operación de esta forma. Otros fabricantes prefieren situar un pistón separador entre ambos fluidos que realiza un cierre

hermético. Finalmente, otros sitúan un pistón flotante entre ambos fluidos que, sin realizar un cierre hermético, los mantiene cuasi-separados. Otro aspecto que diferencia a unos fabricantes de otros es el sistema elegido para dar paso y salida a cada fluido de las cámaras.

Las cámaras del tipo de rotación se basan en el mismo principio que las anteriores, poner en contacto ambas corrientes. Lo que las diferencia es que en el caso anterior las partes móviles del equipo son los elementos, válvulas generalmente, que dan paso a una corriente u otra. En este caso el elemento que da paso no existe y lo que se mueve es la propia cámara. En este sistema el contacto entre los fluidos es directo, no existiendo ninguna separación física, ni pistón entre ambas corrientes.

Como se puede deducir, al tener las cámaras de ambos tipos un volumen determinado y ser el mismo para llenarlas de salmuera que de agua de mar, y como la frecuencia de los ciclos es, lógicamente, la misma para ambas corrientes, el caudal de agua de mar presurizada tiene que ser sensiblemente igual al de salmuera de alta presión. Por otra parte, la presión de salida de la salmuera es inferior a la de entrada del agua de mar a membranas, como ya hemos comentado. La presión de la salmuera entrando a las cámaras es aún menor que la de salida de las membranas, ya que hay que restarle las pérdidas de carga en tuberías y válvulas hasta llegar a las cámaras. Como además las cámaras tienen un rendimiento en la transmisión de presión al agua de mar, cuando ésta sale presurizada de las cámaras, requiere un incremento de presión para alcanzar la de entrada a las membranas. Es necesaria, por tanto, la instalación de una bomba *booster*, entre la salida de las cámaras y la entrada a las membranas, que le proporcione dicho incremento.



*Esquema de un proceso de OI con intercambiador de presión*

El rechazo (salmuera) pierde 2,53 bar y el sistema de ahorro le hace perder 1,5 bar. Por tanto, la presión que ha de dar la bomba booster es de 4 bares y un caudal igual

al caudal de rechazo. Esta bomba también dispondrá de variador de frecuencia como método de regulación.

Para equilibrar los flujos es necesario colocar caudalímetros, tanto en la entrada de agua de alimentación a baja presión como en la salida de rechazo a alta presión. El sistema de control debe igualar ambos caudales.

Cuando se analiza con más detenimiento el funcionamiento de las CIP, hay que tener en consideración una serie de conceptos y cuyo valor máximo hay que pedir al fabricante del equipo que garantice con su oferta. Entre estos conceptos enumeramos los siguientes:

- Mezcla (*Mixing*): Es la medida de la contaminación del agua de mar por la salmuera, y se define como un cociente cuyo numerador es la diferencia de salinidad del agua de mar a la salida de las cámaras menos la salinidad del agua de mar y cuyo denominador es la diferencia de salinidad de la salmuera a la salida de las cámaras menos la salinidad del agua de mar. Expresado como tanto por ciento.

- Agua de barrido (*Overflush*): Es un caudal de agua de mar que se pierde con la salida de la salmuera, y está motivado por varias razones: necesidad de lubricar el giro del rotor, lavar la cámara de la salmuera que queda para reducir el valor anterior de mezcla, pérdidas de los cierres de válvulas, etc. Este caudal se mide en tanto por ciento y se define como el cociente entre el agua de mar entrando en las cámaras dividido entre el caudal de agua de mar saliendo de las cámaras y restando uno a dicho cociente.

- Pérdidas de salmuera (*Leak*): Es un caudal de salmuera que se pierde antes de realizar el trabajo, de forma que representa finalmente una pérdida de rendimiento. Esta pérdida es debida a fugas que se producen de salmuera desde el lado de alta presión al de baja presión directamente. Se mide en valores absolutos de caudal y es igual al caudal de salmuera entrando a las cámaras menos el caudal de salmuera saliendo de las cámaras.

- Presión mínima de entrada del agua de mar a las cámaras. Es un valor absoluto y que el fabricante de las cámaras impone para que pueda entrar el agua de mar, y es consecuencia de las pérdidas de carga en los sistemas de entrada, en el llenado de las cámaras, etc.

- Presión mínima de salida de salmuera de las cámaras. Es un valor absoluto y que el fabricante de las cámaras impone para que pueda salir la salmuera, y es consecuencia de las pérdidas de carga en los sistemas de salida, en el vaciado de las cámaras, etc. Hay cámaras que cavitan si el valor es inferior al especificado.

Todos los parámetros anteriores tienen como consecuencia una reducción del rendimiento de las cámaras. Por tanto, hay que redefinir qué se entiende por rendimiento de una Cámara de Intercambio de Presión; esta definición es la siguiente:

• Rendimiento (*Efficiency*): Se define por un cociente cuyo numerador es la energía recuperada útil para nosotros, que es el producto del caudal de agua de mar saliendo de las cámaras por la presión de ese agua de mar a la salida de las cámaras, y cuyo denominador es la energía que le hemos entregado a las cámaras para hacer su trabajo, que es la suma del caudal de agua de mar entrando a las cámaras por su presión de entrada, más el caudal de salmuera entrando a las cámaras por su presión de entrada.

El Rendimiento, definido de esta forma, tiene en cuenta todos los factores arriba mencionados excepto uno, la Mezcla, ya que este valor solo puede ser cuantificado conociendo cuánto incrementa la presión a la entrada de membranas por culpa de este efecto. Este cálculo es más complejo y dependiente del diseño global de la instalación. Otro efecto colateral no contemplado es el incremento de la potencia de las bombas de agua de mar para dar el caudal extra pedido por las cámaras, debido al agua de barrido.

A pesar de todo lo mencionado sobre las CIP, son los equipos que más rendimiento tienen globalmente, recuperando la energía en las plantas de ósmosis inversa. Al mencionar todos estos conceptos el objetivo es hacer ver la complejidad de factores que intervienen, que el cálculo final del consumo específico tiene que ser adecuadamente realizado y que, en las ofertas de las CIP, hay que obtener garantías sobre los parámetros indicados.

**2.2.6.- Calidad del agua producto de OI:** Mediante el uso de la técnica de O.I., generalmente se obtiene una calidad de producto menor de 500 ppm en sales. En la tabla se muestra la capacidad de conversión de una planta de producción media.

Elemento	C <sub>A</sub> (mg/l)	C <sub>P</sub> (mg/l)	C <sub>R</sub> (mg/l)
Sodio, Na <sup>+</sup>	11.650	113,1	19.341,3
Potasio, K <sup>+</sup>	450	4,24	760,5
Calcio, Ca <sup>+2</sup>	362	1,35	602,4
Magnesio, Mg <sup>+2</sup>	1.285	4,8	2.138,5
Cloruros, Cl <sup>-</sup>	20.150	186,7	33.459
Sulfatos, SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup>	2.341	8,73	3.895,8
Bicarbonatos, HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	121	3,03	199,6
Sílice, SiO <sub>2</sub>	2	0,03	3,3
<b>Total sólidos disueltos, SD (mg/l)</b>	<b>36.361</b>	<b>322</b>	<b>60.400</b>

Estas concentraciones deben aproximarse a las establecidas por la *Organización Mundial de la Salud* para que el agua sea aceptada como agua potable. La tabla siguiente indica los valores de algunas de las sustancias presentes en el agua desalada por ósmosis inversa y los valores recomendados por dicha organización. Todos los valores, exceptuando el del sodio, son inferiores a los establecidos.



	OMS (mg/l)	Agua desalada (mg/l)
Sodio, Na <sup>+</sup>	100	113,1
Potasio, K <sup>+</sup>	12 (Max)	4,24
Calcio, Ca <sup>+2</sup>	200	1,35
Magnesio, Mg <sup>+2</sup>	50	4,8
Cloruros, Cl <sup>-</sup>	250	186,7
Sulfatos, SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup>	200	8,73

En cuanto a la diferencia de calidad con respecto a distintos procesos de desalación se representan en la siguiente tabla:

	O.I. (1 paso)	O.I. (2 pasos)	Evaporación
Ca <sup>++</sup> (mg/l)	2	0,1	0,5
Mg <sup>++</sup> (mg/l)	6	0,3	1,5
Na <sup>+</sup> (mg/l)	128	15	12
K <sup>+</sup> (mg/l)	4	0,8	0,5
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (mg/l)	8	0,4	0,1
SO <sub>4</sub> <sup>=</sup> (mg/l)	11	0,6	3
Cl <sup>-</sup> (mg/l)	208	23	22
SD (mg/l)	367	40	40
SiO <sub>2</sub> (mg/l)	0,1	0,0	0,0
CO <sub>2</sub> (mg/l)	23	12	-
pH	5,8	5,2	7,2

La tabla muestra la calidad media del agua obtenida por los procesos de OI de un único y doble paso, y los procesos de evaporación.

Por lo tanto, viendo la calidad obtenida con los procesos y los requerimientos legales, en el postratamiento de las aguas desaladas se tienen que considerar dos aspectos. El primero contemplará el equilibrio químico del agua con el fin de eliminar su alta agresividad y así proteger las redes de distribución, para ello es necesario reducir el alto contenido de CO<sub>2</sub> con la adición de cal –Ca(OH)<sub>2</sub>– para conseguir un agua ligeramente incrustante. El segundo aspecto se refiere al contenido de dureza del agua de abastecimiento, con el mínimo de 60 mg/l. La práctica más habitual es su mezcla con aguas superficiales con alto contenido de Ca y Mg, y en el caso de que esto no sea posible se dosifican sales cálcicas como CaCl<sub>2</sub> o CaSO<sub>4</sub>, aunque supongan un incremento de Cl<sup>-</sup> o SO<sub>4</sub><sup>=</sup> en el agua de abastecimiento. El coste del postratamiento es prácticamente despreciable frente a los de la desalación propiamente dicha.

La calidad del agua obtenida por cualquier método de desalación es apta para el consumo humano tan sólo con un pequeño postratamiento en algunos casos. El pretratamiento es necesario para el adecuado funcionamiento de la instalación desaladora.



En el caso de aguas para uso agrícola o industrial, es necesario estudiar de forma individualizada cada caso. En la mayoría de ellos, los requerimientos mínimos siempre van a ser menores que el del agua potable, con lo que cualquier método desalador cumple holgadamente dichos requerimientos.

**2.2.7.- *Postratamiento*:** El agua desalada mediante membranas tiene un pH bajo (5,5), es pobre en calcio y de baja alcalinidad, debido al elevado rechazo de iones. Es por tanto un agua desequilibrada. Su baja alcalinidad y la presencia de  $\text{CO}_2$ , la hacen corrosiva, pudiendo disolver los precipitados de las tuberías e incluso incumplir algunos aspectos de la normativa Técnico Sanitaria. Por ello no puede utilizarse directamente ni para bebida ni para riego, por lo que es necesario someterla a un tratamiento complementario o de afino que permitan adecuar los parámetros de calidad a los usos a los que se destine el agua producida.

Para estabilizarla hay que llevar estos parámetros a su equilibrio de saturación de  $\text{CaCO}_3$ . También en ocasiones contiene  $\text{SH}_2$ , especialmente cuando se tratan aguas subterráneas. La estabilización se consigue por tres procedimientos: descarbonatación o desgasificación, adición de productos químicos y mezcla con otras aguas.

Como el agua que se va a desalar, ha sido desprovista de sus características oxidantes mediante la dosificación de bisulfito sódico, en el producto no existen rastros de cloro residual y por tanto puede que vuelva a contaminarse de nuevo.

Por ello si el agua se va a dedicar a abastecimientos urbanos es necesario volverla a clorar para cumplir la normativa sanitaria en cuanto a presencia de cloro residual de la red.

En la mayoría de los casos, el postratamiento para adaptar la calidad del agua osmotizada, como agua potable, consiste en la remineralización del agua para incremento del pH, mediante la dosificación de hidróxido cálcico o carbonato cálcico (calcita); y en la dosificación de hipoclorito sódico para mantener los niveles adecuados de desinfectante residual.

En el caso de aguas para uso agrícola o industrial, es necesario estudiar de forma individualizada cada caso. En la mayoría de ellos, los requerimientos mínimos siempre van a ser menores que el del agua potable, con lo que cualquier método desalador cumple holgadamente dichos requerimientos.

Consecuentemente, como se ha explicado, el tratamiento de afino no es el mismo si el agua se dedica a abastecimiento que si se dedica a riego. Aunque las diferencias de inversión entre uno y otro sistema no son significativas sí lo son los costes de operación, porque en el caso del agua de abastecimiento su coste en reactivos es más elevado.

Si el agua desalada quiere utilizarse para riego hay que rebajar su SAR (Razón de Absorción de Sodio), añadiéndole para ello calcio en forma de lechada de cal. La relación de absorción de sodio SAR es un parámetro que refleja la posible influencia del ión sodio sobre las propiedades del suelo, ya que tiene efectos dispersantes sobre los coloides del suelo y afecta a la permeabilidad. Sus efectos no dependen solo de la concentración en sodio sino también del resto de cationes. Se basa en una fórmula empírica que relaciona los contenidos de sodio, calcio y magnesio y expresa el porcentaje de sodio de cambio en el suelo en situación de equilibrio.

$$SAR = Na / ((Ca + Mg) / 2)^{1/2}$$

Por lo tanto, viendo la calidad obtenida con los procesos y los requerimientos legales, en el postratamiento de las aguas desaladas se tienen que considerar dos aspectos. El primero contemplará el equilibrio químico del agua con el fin de eliminar su alta agresividad y así proteger las redes de distribución, para ello es necesario reducir el alto contenido de  $CO_2$  con la adición de cal  $-Ca(OH)_2-$  para conseguir un agua ligeramente incrustante. El segundo aspecto se refiere al contenido de dureza del agua de abastecimiento, con el mínimo para ingesta humana de 60 mg/l  $CaCO_3$  y de 90 mg/l  $CaCO_3$  para evitar la corrosión de tuberías. La práctica más habitual es su mezcla con aguas superficiales con alto contenido de Ca y Mg, y en el caso de que esto no sea posible se pueden dosificar sales cálcicas como  $CaCl_2$  o  $CaSO_4$  (da al agua dureza de calcio) y  $MgSO_4$  (mineraliza y da dureza permanente), aunque supongan un incremento de  $Cl^-$  o  $SO_4^{=}$  en el agua de abastecimiento. El coste del postratamiento es prácticamente despreciable frente a los de la desalación propiamente dicha.

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.

Algunas de las recomendaciones más importantes para el postratamiento del agua osmotizada son:

- El postratamiento debe aportar calcio para reducir el alto índice de peligrosidad de sodio.
- El postratamiento debe también aumentar el contenido en calcio y la alcalinidad para reducir la corrosión.
- El postratamiento más recomendado es la dosificación de carbonato cálcico.
- La remineralización con carbonato cálcico debe hacerse preferiblemente a la salida de los bastidores para aprovechar el  $CO_2$  libre del agua recién osmotizada.
- La excesiva dosificación de carbonato cálcico puede producir su precipitación e incrustaciones en los goteros.
- La dosificación sólo con hidróxido cálcico es menos eficaz y produce rápidamente la sobresaturación y la precipitación en forma de carbonato cálcico.

En función de la calidad requerida del agua producto y/o de su aplicación, será necesario tratar el agua después del proceso de ósmosis inversa. A modo de ejemplo, para el suministro de agua potable, se llevará a cabo las siguientes operaciones:

- Una *desgasificación* para eliminar el  $H_2S$  y/o  $CO_2$  que contiene el agua y que las membranas no pueden retener.
- Una *alcalinización* con el fin de incrementar el pH añadiendo NaOH ó cal.
- Una *pasivación* para eliminar la acción corrosiva del agua frente a los metales.
- Una *cloración*.

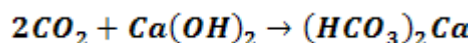


**1.- Aireación.** Como el  $CO_2$  presente en el permeado no es, en general, suficiente para reaccionar con toda la cal o calcita necesaria para obtener la dureza requerida del agua, debe por tanto introducirse desde el exterior en forma de gas. No obstante, si el permeado que sale de los módulos de ósmosis inversa tiene un contenido en dióxido de carbono disuelto muy elevado y/o  $H_2S$ , se hace pasar el agua a través de una torre de aireación en la que se pone en contacto a contracorriente el fluido con el aire; de este modo, el agua se enriquece en oxígeno y se empobrece en  $CO_2$  y/o  $H_2S$ . Esta operación no suele ser necesaria en la gran mayoría de plantas de ósmosis.

**2.- Alcalinización.** El agua que sale de ósmosis o de la torre de aireación tiene un pH de 5,5 a 4,84 que hace falta aumentar hasta valores próximos a 7,2 para que sea apta para el consumo humano. Consiste en añadir bicarbonatos al agua tratada para aumentar su alcalinidad, aumentar el pH y reducir el grado de agresividad según el índice de Langelier de forma que este sea 0 o ligeramente positivo para que el agua no se sea corrosiva. La normativa actual exige que el índice LSI sea  $\pm 0,5$ .

Existen dos métodos para remineralizar el agua: (1) *con hidróxido cálcico (cal)* y  $CO_2$  y el (2) *con calcita y  $CO_2$* . La dosificación con cal es más económica en inversión pero más cara en explotación por el mayor consumo de  $CO_2$ .

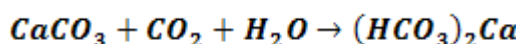
**2.1.- Remineralización del agua con hidróxido cálcico (cal) y CO<sub>2</sub>.** Se parte de cal en polvo grado alimenticio y CO<sub>2</sub> grado alimenticio, y la reacción que se desarrolla es la siguiente:



También se puede utilizar Oxido de cal en vez de Hidróxido cálcico pero se necesita convertir el oxido en hidróxido de cal mediante agua, esta reacción es exotérmica y se debe hacer en equipos llamados apagadores de cal, aunque es más económico el oxido que el hidróxido no lo recomiendo usar por los problemas que tiene su manejo, además el oxido de cal tiene más impurezas que el hidróxido de cal.

**2.2.- Remineralización con calcita y CO<sub>2</sub>.** Los carbonatos de la calcita, reaccionan con el anhídrido carbónico producido por la acción del ácido sulfúrico en el pretratamiento y el dosificado posteriormente al producto, produciendo bicarbonatos y por consiguiente aumentando la alcalinidad y la dureza.

La reacción principal que gobierna la disolución de un lecho de carbonato cálcico (calcita) es la siguiente:



Esta reacción alcanza un pH de equilibrio cuyo valor depende de una serie de factores como son: el pH inicial, el contenido en CO<sub>2</sub>, calcio, carbonatos, bicarbonatos, sólidos totales disueltos y la temperatura. Se ve que el consumo de CO<sub>2</sub> es la mitad que con lechada de cal.

**3.- Desinfección.** Durante el proceso de desalinización el agua ha vuelto a aumentar la presencia de microorganismos, de manera que hace falta volver a desinfectar el agua antes de que sea consumida por los seres vivos. La sustancia utilizada normalmente es, al igual que en el pretratamiento, hipoclorito de sodio del 16% en peso y la dosis necesaria para eliminar pequeños organismos, de aproximadamente 0,5 mg Cl<sub>2</sub>/m<sup>3</sup> de agua.

**4.- Pasivación.** Una vez que se ha potabilizado el agua, puede suceder que durante la distribución, el fluido vuelva a contener agentes corrosivos que afecten negativamente a las tuberías. Para evitar este problema, se añadirá una sustancia inhibidora de la corrosión como puede ser el polifosfato sólido a base de fosfato de zinc.

**2.2.8.- Evacuación de la salmuera de rechazo:** La salmuera de rechazo de una desaladora es el elemento que más impacto medioambiental puede producir si no se dispersa adecuadamente.



En todo proceso desalador, tenemos una porción del agua previamente introducida que es rechazada y devuelta normalmente al reservorio original de donde se aportó el agua bruta a desalar.

El problema de estos vertidos debe tratarse cuidadosamente dependiendo del tipo de proceso utilizado, y de las características del reservorio donde se tira la salmuera de rechazo.

El rechazo contiene, no solo las sales del agua bruta, ya sean naturales o generadas en algún proceso de contaminación, también todo aquel compuesto que se utilice como aditivo en el proceso de ósmosis.

De todas formas, es necesario abordar de forma separada la desalación de aguas marinas y de aguas salobres, porque son dos problemáticas completamente diferentes ya que afectan a medios naturales distintos.

Las diferentes soluciones aportadas actualmente para la evacuación de las salmueras procedentes de la desalación de aguas salobres son:

- *Vertido directo a ramblas o cauces cercanos.* Es una solución común pero poco recomendable porque puede salinizar dichos cauces y los suelos adyacentes, afectando incluso a la población asentada aguas debajo de dicho cauce.

- *Vertido al mar en el caso de cercanía al mismo.* Debe estudiarse en cada caso ya que en este caso la salinidad es menor que la marina y puede afectar a la diversidad biológica en ese tramo costero.

- *Inyección en acuíferos más profundos incluso que el de aporte.* Es una solución altamente peligrosa, ya que puede afectar a acuíferos cercanos y además los convierte en inservibles para su uso futuro.

- *Instalación de balsas de evaporación o incluso salinas para obtener sal.* La extensión necesaria para este tipo de solución suele disuadir a los propietarios de las explotaciones, pero es de las más adecuadas aunque desaparece todo caudal posible de retorno a la cuenca hidrográfica.

- *Creación de colectores de vertido o “salmueroconductos” que recojan los rechazos de una o varias plantas desaladoras próximas hasta el mar.* Parece la solución más aceptable, aunque con coste algo superior a otras opciones, y además debe estudiarse el punto exacto de vertido en el mar, al igual que en el segundo punto, para no alterar las condiciones biológicas de la fauna y flora marinas.

Debe tenerse en cuenta también que excepto la segunda y última opciones, los vertidos de salmuera retornan finalmente a la cuenca hidrográfica de donde se extrajo el agua salobre, con lo que deberían rechazarse a priori.

Respecto al vertido de rechazos de agua marina, se sabe que la fauna marina no queda afectada significativamente por la existencia de emisarios de esta agua (gracias

por supuesto a su movilidad), incluso hay experiencias de una mayor cuota de captura pesquera alrededor de desagües de plantas desaladoras.

Medioambientalmente hay que tratar con especial atención a la flora marina existente en el litoral. Es por tanto imprescindible mezclarla rápidamente con el resto del agua del mar, para eliminar su potencial riesgo ambiental.

A la hora de dispersar la salmuera existen distintas posibilidades técnicas en función del tipo de costa disponible (rocosa, arenosa, etc.), del estado del mar, de la forma y pendiente del fondo, etc.

La adopción de una técnica u otra de dispersión puede significar un aumento o una reducción importante de la inversión.

De entre las posibilidades de actuación en cuanto a la evacuación de la salmuera al mar, no hay soluciones concluyentes, sobretodo en cuanto a la cuantificación del efecto de cada una de ellas sobre la flora marina, se muestran aquí las soluciones comúnmente adoptadas:

- *Vertido directo al mar a través de ramblas y cauces.* Esta posibilidad puede ser la más adecuada en zonas de corrientes y vientos considerables, ya que en zonas cercanas a la costa, los oleajes y la mayor temperatura de las aguas favorecen la mayor dilución de las descargas de salmuera.

- *Construcción de emisarios submarinos que sobrepasen la pradera de flora marina.* No está muy claro si el efecto de la obra necesaria para construir el emisario va a ser más perjudicial para la pradera que su vertido en la costa. Además, se han realizado estudios sobre la dilución de los emisarios submarinos construidos específicamente para una mejor mezcla con el agua marina, pero la experiencia de laboratorio ha demostrado grandes diferencias con respecto a la dilución real en los fondos marinos, debido fundamentalmente al efecto de las corrientes marinas, oleaje, condiciones del fondo, etc., difícilmente reproducibles en condiciones de laboratorio.

- *Utilización de emisarios ya existentes de aguas residuales.* Se sabe que las aguas residuales urbanas tienen un efecto más pernicioso para la flora marina que los rechazos de plantas desaladoras. Por lo tanto un mal menor puede ser verter dichos rechazos a colectores residuales o lugares anejos a ellos, en zonas ya previamente degradadas por el efecto de las aguas residuales urbanas.

La solución evidente a la problemática existente en la actualidad en esta materia, sería la de poder contar con un *módulo de alto vacío* que obviara la problemática citada. De forma más concreta, el rechazo líquido producido en la osmosis inversa se transfiere al módulo de alto vacío de donde se obtiene agua desalada y un rechazo líquido concentrado de salmuera, que tras una serie de secados pasa a ser un residuo sólido fácilmente manejable y con posibilidad de recuperación de elementos químicos que los componen.

La ventaja de este proceso, sin obviar su coste, estriba en la mayor cantidad de agua desalada obtenida a partir de un caudal de agua bruta, sin obtener residuo líquido contaminante e integrándolo en un sistema de cogeneración para aumentar el rendimiento de la osmosis y el alto vacío, el residuo final generado en la planta se configura como un sólido fácilmente manejable.

**2.2.9.- *Evacuación o reutilización de agua de lavados:*** Por otra parte, no podemos olvidar que en las plantas desaladoras hay otros tipos de efluentes; los procedente de los lavados de filtros y los procedente de lavados de membranas y filtros de cartuchos.

- Lavados de filtros de arena, pueden llevar o no dosificación de cloruro férrico.
- Filtros de precapa.
- Lavado de membranas y filtros de cartuchos.

El vertido o reutilización de estas aguas hacen necesario su tratamiento a priori, el cuál se puede dividir en dos tipos:

**1.- *Neutralización sin tratamiento de sólidos en suspensión:*** Este tratamiento se utiliza en plantas que llevan filtros de arena sin dosificación de coagulante (cloruro férrico) son vertidos que llevan pocos sólidos en suspensión.

Normalmente son aguas que proceden de pozos verticales u horizontales, la frecuencia de lavado de los filtros es poco frecuente > 48 horas y la frecuencia de lavado de membranas es poco frecuente > (3) meses.

En este caso lo que se utiliza es un depósito de neutralización donde se recogen todos vertidos y tiene capacidad para recoger el lavado de al menos un filtro de arena, el depósito esta normalmente enterrado para que por gravedad pueda recoger todos los vertidos.

La neutralización del lavado de membranas se hace con ácido sulfúrico o con agua saturada de cal para los lavados ácidos, pero en este tipos de plantas lo normal son lavados alcalinos.

**2.- *Neutralización y tratamiento de los sólidos en suspensión:*** Este tratamiento se utiliza en plantas que llevan filtros de arena con dosificación de coagulante (cloruro férrico), son vertidos que llevan sólidos en suspensión y color rojizo de hidróxido férrico, y en alguna planta que puede llevar filtros de precapa y donde el vertido de diatomeas es necesario tratarlo.

En estas plantas llevan dos sistemas de tratamiento uno para el agua procedente del lavado de filtros y el otro para el tratamiento del lavado de las membranas y los filtros de cartuchos.





**2.1.- Tratamiento agua lavado filtros:** Para el tratamiento de esta agua debemos distinguir varios aspectos.

**2.1.1.- Si se quiere recuperar el agua lavado porque lavamos con agua de mar en vez de salmuera:** Para este caso el agua de lavado debe ser tratada en un decantador lamelar cuyo caudal dependerá del nº de filtros y del intervalo entre lavados.

El decantador será de de recirculación de fangos y espesador, utilizando como reactivos normalmente polielectrolito y/o lechada de cal si fuera necesario subir el pH.

Dependiendo de la cantidad de fangos que queremos almacenar (horas de funcionamiento del secado de fangos) puede ser necesario un depósito con agitador sumergido para su almacenamiento y posterior secado mediante filtro de banda o centrifuga.

**2.1.2.- No recuperamos el agua de lavado porque lavamos con salmuera:** Se consideran dos formas de realizar su tratamiento.

**a.- Tratando el agua de lavado en un decantador espesador:** En este caso el agua de lavado debe ser tratado en un decantador espesador (sin recirculación de fangos) con una cámara de mezcla rápida para los reactivos que lleve (polielectrolito y/o lechada de cal).

Debemos tener en cuenta que el agua de salida se mezcla con la salmuera en relación de 1 a 12, de forma que un agua con 50 ppm de (SS) al mezclarla con la salmuera queda reducido a 5ppm los (SS).

**b.- Tratando el agua de lavado en un flotador :** En este caso el agua de lavado de filtros debe ser lavado en un flotador de plástico.

Este equipo como los flotadores lleva 1 balón de presurización por equipo y 2 bombas de agua presurizada y un floculador común a los dos equipos. En su conjunto parece que puede resultar más caro que el decantador espesador.

El inconveniente de este sistema es que tienes que utilizar un depósito de fangos para su almacenamiento antes de su envío a secado, el depósito debe llevar cámara de mezcla para la mezcla con cal y agitador sumergido.

En ambos casos, el tratamiento de fangos se puede hacer con centrifugadora o filtro banda, teniendo en cuenta que en el tanque de lavado se recoge con los fangos las arenas y antracita que escapan de los filtros, este material es abrasivo y puede dañar a la centrifugadora.



**2.2.- Tratamiento lavado membranas y filtros de cartuchos:** Se usa el tratamiento de balsa o depósito de neutralización pero con capacidad para el volumen de lavado de 1 bastidor. En ambos casos usar bomba para recirculación y neutralización.

En definitiva, hay que tener en cuenta que la reutilización, siempre que las características del agua tratada lo permita, es la mejor solución desde el punto de vista económico y medioambiental.

Si el vertido de estos efluentes es indispensable, la mejor solución suele ser su incorporación a los vertidos de salmuera, sin que su dilución represente ningún problema adicional.

### **6.4.3. Otros procesos de desalación**

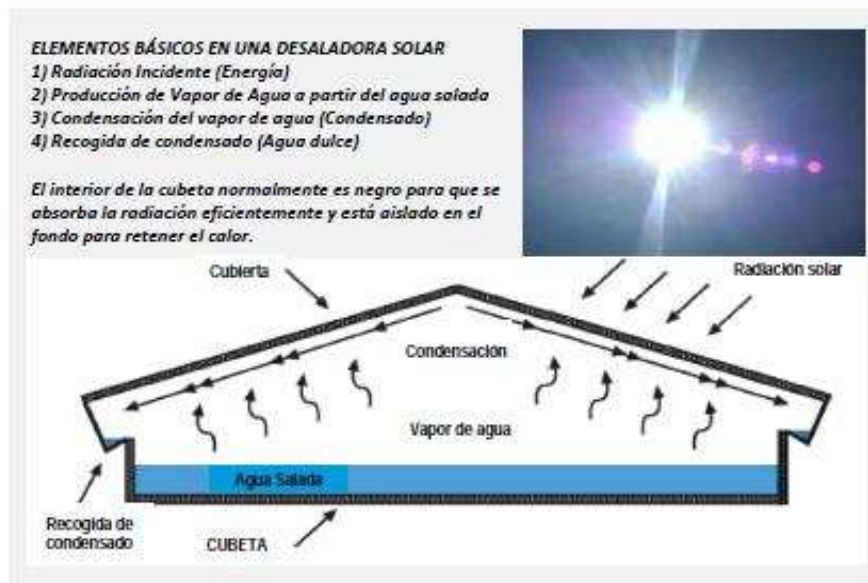
Un buen número de procesos han sido usados para desalar agua. Estos procesos no han sido llevados exitosamente a nivel comercial, sin embargo algunos de ellos están siendo utilizados en determinadas aplicaciones.

**1.- Destilación Solar:** Estos dispositivos generalmente imitan parte del ciclo natural del agua en el que la energía del sol calienta el agua marina y la producción de vapor de agua (humidificación) se incrementa. El vapor de agua es condensado en una superficie, y recolectado como agua fresca.

Constituyen el sistema más antiguo de desalinización y el principio básico en que se fundamenta es el del efecto invernadero: el sol calienta una cámara de aire a través de un cristal transparente, en cuyo fondo tenemos agua salada en reposo. Dependiendo de la radiación solar y otros factores como la velocidad del viento (que enfría el vidrio exterior), una fracción de esta agua salada se evapora y se condensa en la cara interior del vidrio. Como dicho vidrio está colocado inclinado, las gotas caen en un canal que va recogiendo dicho condensado evitando que vuelvan a caer en el proceso de condensación a la lámina inferior de salmuera. Aunque pueden utilizarse técnicas de concentración de los rayos solares apoyándose en lentes ó espejos (parabólicos ó lisos), no suelen compensar las mayores pérdidas de calor que ello acarrea y su mayor coste económico. El proceso no recupera calor y necesita un aporte masivo de energía, que cuando es solar se puede considerar gratis, excepto por la consideración que hay que hacer al equipo. La energía es gratis pero no el equipo ni el terreno necesario para ubicar los colectores.

Este tipo de destiladores solares se denominan de batea y efecto simple, y presentan rendimientos típicos del 30% (cantidad de agua destilada producida, frente a la cantidad máxima que podría producirse considerando la radiación solar incidente de la que se dispone y el calor de vaporización del agua). La mayor pérdida de energía se produce en forma de calor latente de condensación del agua en la cubierta, con lo que la

energía que es necesaria para producir el destilado es aproximadamente igual a su calor de vaporización (2270 kJ/kg, 630kWh/m<sup>3</sup>). La producción específica diaria se encuentra entre 1 y 4 litros por cada m<sup>2</sup> de superficie.



**Esquema de un colector solar para destilación**

Si se reutilizara dicho calor en dos o más etapas, se podría incrementar el rendimiento térmico de los destiladores solares. En un destilador solar como el descrito anteriormente (tipo batea), se puede incorporar una segunda superficie (o más) entre la parte de la piscina y la cubierta. Este tipo de destiladores solares se denominan multiefecto.

Otro tipo de destiladores solares, son los de mecha: el agua de alimentación fluye lentamente a través de un material poroso (mecha), que absorbe la radiación. Este tipo permite que el material poroso por el que discurre el agua pueda inclinarse, para obtener un mejor ángulo con el Sol, consiguiendo una menor reflexión y una mayor superficie efectiva. También el material que conforma la mecha permite tener una capa de agua a desalar con un espesor muy fino, pudiéndose calentar más rápidamente y al presentar una menor capacidad calorífica obtener una temperatura mayor.

El proceso de destilación solar no se emplea para la producción de grandes cantidades de agua desalada, es apropiado para el suministro de familias o pequeños núcleos de población, donde la energía solar y la mano de obra sean abundantes pero no se disponga de suministro eléctrico.

Algunas de las principales características de este tipo de planta desaladora son:

- Instalación lo más sencilla posible.
- Construir con materiales de fácil disponibilidad.
- Resistir vientos moderados.
- Ser al mismo tiempo superficie captadora de lluvia.



Otra técnica de desalación solar térmica directa se basa en la preevaporación a través de membranas. Consistente en la separación de una mezcla de dos líquidos mediante su vaporización parcial a través de una membrana no porosa. Su funcionamiento sigue el siguiente proceso:

- Se hace circular agua salada a lo largo del interior de unas membranas en forma de tubo. Que hacen también las funciones de colectores solares.

- Estas membranas son de color negro para mejorar su eficiencia, y se montan bajo una cubierta con una estructura tipo invernadero o túnel, lo que evita la posterior pérdida de vapor.

- El agua salada atraviesa la pared de la membrana por permeación, y llega hasta la superficie de la misma.

- Una vez sobre la superficie de la membrana y gracias al calor, dicho caudal se convierte en vapor (vaporización) que fluye hasta la parte más fría del sistema donde es condensado.

- El destilado líquido obtenido es recogido en unos canales, como resultado final, los compuestos no deseados (sales, metales pesados, sólidos en suspensión...) acaban concentrados en el interior de la membrana y son posteriormente eliminados.

Con este proceso se ha conseguido porcentajes de conversión del 90% (de cada 100 partes de agua de aporte, 90 se obtienen como destilado y 10 como salmuera o vertido). La producción específica por unidad de superficie es muy reducida (entre 5 y 7 litros por  $\text{m}^2$  y día), por lo que respecta a las temperaturas de operación, se sitúan entre los 50 °C y los 80 °C. Un factor muy positivo a destacar es que no permite que elementos volátiles puedan evaporarse y acaben junto con el destilado.

En resumen, la energía solar es el método ideal para producir agua en zonas áridas y muy aisladas del resto de poblaciones. A pesar de tener un coste energético nulo y escasa inversión necesaria, su baja rentabilidad reside en su escasa producción por metro cuadrado de colector al destilarse tan sólo unos litros al día en el caso de condiciones climatológicas favorables. Por lo tanto no se han desarrollado a gran escala en lugares con un consumo elevado de agua dulce y sólo es posible pensar en estas instalaciones en sitios totalmente aislados y faltos de suministro de electricidad y agua.

Pero la energía solar también puede ser la fuente de energía de un proceso de destilación, incluso de producción eléctrica para pequeñas instalaciones de ósmosis inversa. Por ejemplo, el uso de colectores de concentración parabólicos (PTC) puede usarse en procesos MSF ó MED dependiendo del coste de los colectores, que son los que determinan la producción de agua por metro cuadrado de PTC (de media producen 10  $\text{m}^3$  de agua dulce por  $\text{m}^2$  de colector) y factores climáticos tales como el porcentaje del día en que la planta consume energía solar (factor solar SF). Como se puede ver el



gran problema de estas instalaciones es que no evita la instalación convencional para producir agua dulce en circunstancias climatológicas adversas.

Queda muy claro que estos métodos hoy por hoy no son competitivos económicamente, tan sólo en lugares aislados de suministro eléctrico y de agua es factible pensar en estas instalaciones.

**2.- Congelación:** El proceso de congelación es un fenómeno natural que se contempla con mucha facilidad en nuestro Planeta, alrededor del 70% del agua dulce está contenida en los polos terrestres. La congelación del agua salobre (-1.9 a -3 °C) suministra cristales de hielo puro que se separan de la solución, mientras que el agua en forma líquida se concentra en sales. Algunos científicos han sugerido que una solución parcial para la escasez de agua en las zonas desérticas del planeta sería remolcar los témpanos desde el Ártico o la Antártica, pero la utilización de hielo de los polos para el consumo humano es muy poco conveniente para la conservación del equilibrio térmico del Planeta.

Enfriando agua salada para formar cristales de hielo bajo condiciones controladas puede llegar a desalinizar agua. Este proceso consiste en congelar el agua y recoger los cristales de agua pura formados para fundirlos y obtener un agua dulce independientemente de la concentración del agua inicial. Aunque pueda parecer un proceso muy sencillo tiene problemas de adaptación para su implantación a escala industrial, ya que *el aislamiento térmico para mantener el frío y los mecanismos para la separación de los cristales de hielo deben mejorarse para que este proceso sea algún día competitivo, así como adaptar la tecnología a intercambiadores de frío*. No se ofrecen datos del consumo específico de este proceso porque sólo existen experimentos de pequeña escala no extrapolables a la realidad.

En teoría, el congelamiento tiene algunas ventajas sobre la destilación, que era la opción para desalinizar predominante en el tiempo en que se desarrolló la tecnología de congelación. Estas ventajas incluyen un menor requerimiento energético para un proceso de una sola etapa (el calor de evaporación del agua es 40,79 kJ/mol, mientras que el calor de fusión es de sólo 6,01 kJ/mol), un menor potencial de corrosión, y pocos problemas de escalamiento y de precipitación. Una desventaja es que el proceso involucra la manipulación de mezclas de agua y hielo que son mecánicamente complejas de manejar y procesar, es decir, la principal desventaja de la congelación se relaciona con el lento crecimiento de cristales de hielo y con la eliminación de los depósitos salinos en los cristales.

Existen dos procedimientos de congelación directa:

**2.1.- Por expansión del agua (congelación en vacío):** El agua de mar se congela parcialmente a una presión absoluta de 3 mm de mercurio, a -4 °C. A esta presión se



produce una evaporación, acompañada del enfriamiento correspondiente, que es el que provoca la congelación.

Para mantener el vacío necesario es preciso aspirar de continuo el vapor de agua formado, pudiendo ser realizada esta operación bien por un compresor mecánico, o por absorción en una solución higroscópica (que absorbe agua).

En la práctica, los problemas de compresión del gran volumen de vapor producido a baja presión son considerables.

**2.2.- Congelación con ayuda de un agente refrigerante:** Se utiliza un refrigerante auxiliar cuya tensión de vapor sea netamente superior a la del agua y que no sea mezclable con ella. El butano por ejemplo, satisface estas condiciones. El agua de mar se congela parcialmente por la expansión del butano. Este procedimiento evita los problemas de compresión inherentes a la congelación en vacío.

**3.- Formación de hidratos:** Es otro método basado en el principio de la cristalización, que consiste en obtener, mediante la adición de hidrocarburos a la solución salina, unos hidratos complejos en forma cristalina, con una relación molécula de hidrocarburo/molécula de agua del orden de 1/18. Al igual que el proceso de congelación, su rendimiento energético es mayor que los de destilación, pero *conlleva una gran dificultad tecnológica a resolver en cuanto a la separación y el lavado de los cristales que impiden su aplicación industrial.*

**4.- Destilación por membranas:** Es un proceso combinado de evaporación y filtración. El agua salada bruta se calienta para mejorar la producción de vapor, que se expone a una membrana que permite el paso de vapor pero no del agua (membrana hidrófoba). Después de atravesar la membrana el vapor se condensa, sobre una superficie más fría, para producir agua desalada. En estado líquido, esta agua no puede retroceder atravesando la membrana por lo que es recogida y conducida hacia la salida.

Esta es una técnica por membrana que involucra transporte de vapor de agua a través de los poros de una membrana hidrófoba debido a la fuerza que ejerce la presión de vapor provista por la temperatura y/o la diferencia de concentración del soluto a través de la membrana

En este método, las superficies de las membranas están en contacto directo con dos fases líquidas, una solución caliente y una fría también conocida como el “impregnando”. Como ha sido entendido, hay una diferencia de temperaturas pero el equilibrio térmico está bien establecido. Este método está basado en un flujo a contracorriente de un fluido con diferentes temperaturas. La corriente de entrada de agua de mar fría fluye a través de un condensador de paredes no permeables. Este sistema trabaja con un par de tubos, un condensador y un evaporador. Estos tubos están separados por un hueco de aire. La pared del evaporador está hecha de una membrana hidrófoba. Las membranas recomendadas son aquellas con un 60, 70 u 80% de



porosidad y un tamaño de poro de  $0.1-0.5 \times 10^{-6} \mu\text{m}$ . Vapor de agua puro pasa a través de las membranas, mientras los sólidos (sales, minerales, etc.) se quedan del otro lado de la membrana. Como fue mencionado, la diferencia de temperaturas de los fluidos, generan una diferencia de presión de vapor, la cual, obliga al vapor para que pase a través de los poros de la membrana del tubo del evaporador y este se condensa en el “hueco” de aire, de esta forma el calor es parcialmente recuperado.

El método de destilación por membranas, que combina los procesos de evaporación y filtración, además de consumir más energía, necesita mayor espacio para su instalación. Sólo ha sido probado en laboratorio.

**5.- Intercambio iónico:** El intercambio iónico también es un proceso que separa sales y se basa en las propiedades que presentan ciertas sustancias sólidas insolubles que son capaces de intercambiar aniones o cationes cuando se ponen en contacto con un electrolito. Las resinas liberarán iones  $\text{H}^+$  y  $\text{OH}^-$  y fijarán los iones de electrolito. Las resinas normalmente necesitan regeneración con agentes químicos para sustituir los iones originales y los fijados en la resina, y terminan por agotarse. Su cambio implica un coste difícilmente asumible para aguas de mar y aguas salobres. Sólo es de aplicación en aguas poco concentradas y como tratamiento en procesos industriales.

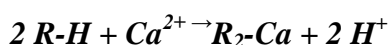
La desmineralización por intercambio iónico proporciona agua de gran calidad si la concentración de sal es menor de 1 gr/l. Por lo tanto se utiliza para acondicionar agua para calderas a partir de vapores recogidos o acuíferos, o en procesos industriales con tratamiento de afino.

Este intercambio iónico es el proceso más empleado hasta la fecha en el tratamiento de aguas para calderas. Las unidades de tratamiento de agua para caldera más usado consisten de pre-filtración, intercambio iónico, tanques de almacenamiento, y distribución a través de tuberías.

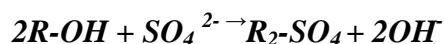
En este proceso el agua a tratar pasa por una columna, donde hay una resina sintética cambiadora de cationes, y luego por otra torre donde se encuentra una resina cambiadora de aniones. Se puede tener un lecho mixto que realice ambos procesos de intercambio iónico en forma simultánea.

En el intercambio iónico los cationes como el  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{Mg}^{2+}$  reemplazan en la resina a los iones  $\text{H}^+$  (permutación ácida) que se pasan a la disolución y los aniones como  $\text{HCO}_3^-$  y  $\text{SO}_4^{2-}$  son retenidos en la resina aniónica y sustituyen a los aniones  $\text{OH}^-$  (permutación básica) que van al agua y allí se neutralizan con los  $\text{H}^+$  que quedaron libres en el intercambio catiónico, y así se obtiene un agua neutra.

Para cationes el intercambio es:



Para aniones el intercambio es:



Este intercambio se produce hasta el agotamiento de la capacidad de intercambio de la resina, y se requiere regenerarla con un ácido fuerte como el sulfúrico, y una base fuerte como el hidróxido sódico. Lo anterior indica que es un proceso reversible.

Tras el proceso de desmineralización, el agua se envía a una torre de desgasificación, con lo que se evitan problemas de corrosión en la instalación, y por último se hace un ajuste del pH.

El intercambio iónico que se aplica en calderas no sólo trata el agua fresca que se aporta al ciclo, sino el condensado que se recicla, para evitar la acumulación de óxidos de hierro, sólidos en suspensión y la contaminación de efluentes.

Este proceso también tiene una implantación industrial muy profunda en las plantas de tratamiento de aguas para el ciclo de vapor de centrales térmicas.

**6.- Evaporación a baja presión (EBP):** La evaporación a baja presión, se realiza mediante un equipo que consta de dos tanques unidos mediante un tubo condensador, uno de los tanques (donde se encuentra el agua destilada), tiene una recirculación con un *tubo Venturi* acoplado para el flujo de agua logre realizar una caída de presión significativa sobre el tanque donde se encuentra el agua salada. La presión baja a la que se encontrará dicho tanque servirá para que la temperatura de saturación del agua disminuya y logre evaporarse con un bajo suministro de energía. La caída de presión debe ser suficientemente baja para disminuir la temperatura de saturación, así la evaporación se lleva a cabo a una menor temperatura que a presión atmosférica. El vapor saliente del tanque a baja presión entra a la unidad de condensación, hasta que alcanza el segundo tanque donde se recupera el agua fresca que se mantiene a presión atmosférica.

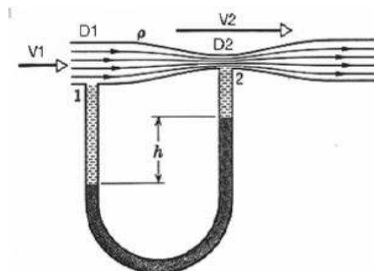
Sin embargo, este proceso no es 100% eficiente, los siguientes factores deben ser considerados para operar el equipo:

- Tener un intercambiador de calor eficiente.
- Incrustación
- Tener suficiente energía para alcanzar la temperatura de saturación para la presión indicada
- Obtener la caída de presión requerida
- El punto de ebullición se elevará conforme la concentración de sales en la salmuera se eleve.



La caída de presión en este tipo de evaporación se puede llevar a cabo de varias maneras, un ejemplo de ellas es: mediante el acoplamiento de tubos Venturi, o bombas de vacío.

**6.1.- Tubo de Venturi:** El Tubo de Venturi es un dispositivo que origina una caída de presión, al pasar por él un fluido, que se utiliza para hacer vacío en uno de los tanques y poder destilar a baja presión aplicando menos energía.



El medidor Venturi estándar tipo Herschel consiste en un tubo recto, corto, que se conecta en cualquiera de los extremos de la tubería por medio de secciones cónicas. Las proporciones recomendadas son ángulo del cono de entrada  $\alpha_1 = 21^\circ \pm 2^\circ$ , ángulo del cono de salida  $\alpha_2 = 5$  a  $15^\circ$ , longitud de la garganta = un diámetro de garganta, toma de corriente arriba localizada de 0,25 a 0,5 diámetro de tubería corriente arriba en relación con el cono de entrada. Para asegurar mejores resultados, conviene que las secciones recta y cónica estén unidas por medio de superficies curvas lisas.

La pérdida de presión permanente para un tubo Venturi tipo Herschel depende de la razón del diámetro  $\beta$  y el ángulo del cono de descarga  $\alpha_2$ . Varía de 10 a 15% de la diferencia de presión ( $p_1 - p_2$ ) para ángulos pequeños (de 5 a 7 grados) y de 10 a 30% para ángulos mayores (15 grados), donde las pérdidas mayores ocurren a los valores más bajos de  $\beta$  para una ecuación general de pérdida de presión para tubos Venturi instalados en tuberías o con entrada plena.

Para el flujo de líquidos debe darse un margen para el cambio de energía potencial cuando se trate de un medidor Venturi inclinado o vertical.

**6.2.- Bombas de vacío:** Una bomba de vacío es un equipo mediante el cual se puede extraer aire de un sistema, llevándolo a presiones menores que la atmosférica. Existen tres diferentes clases de bombas de vacío: mecánicas, turbomoleculares (turbobombas) y criogénicas (criobombas). A pesar de su amplio diseño todas tienen el mismo principio en su funcionamiento, empujar gases hacia fuera de un lugar cerrado.

**7.- Alternativas energéticas:** El aspecto energético supone en la mayoría de los casos el mayor de los costes de explotación. Como consecuencia de esto, se han considerado diversos métodos de incrementar la presencia de los distintos tipos de fuentes de energía en el ámbito de la generación de agua potable, tanto partiendo de agua de mar, como de agua salobre proveniente de pozos y galerías.

El planteamiento persigue los siguientes objetivos:

- Cubrir simultáneamente la nueva demanda eléctrica requerida y los déficits hídricos consolidados.
- Reducir al mínimo los costes energéticos de la desalación, optimizando su integración en centrales de nueva construcción, con el diseño adaptado a su función.

Entre los distintos sistemas que se pueden proponer, según las distintas fuentes de energía que intervengan, destacamos los siguientes:

**7.1.- Cogeneración:** En circunstancias justificadas, si se emplea el sistema de cogeneración para producir simultáneamente energía eléctrica —que pueda ser utilizada para procesos de desalinización—, los resultados son interesantes, pues se abarata importantemente el precio del agua, al considerarse comercialmente como un subproducto de la electricidad, que es el auténtico objetivo. En este caso, sí es muy importante tener en cuenta la energía empleada, y sus fuentes de generación, para evitar impactos medioambientales contraproducentes, derivados de los efluentes gaseosos producidos —que no serían admisibles—, si es que no están debidamente contrarrestados y controlados. En estos campos tendríamos que tener un desarrollo de investigación análogo a los de Israel y Japón, para acercarnos a sus niveles. Las expectativas del sector lo merecen.

**7.2.- Centrales térmicas:** Otro caso diferente es el de las centrales térmicas —paralizadas o no—, que se pueden convertir en plantas de desalinización, y que, por considerarse ya amortizadas, pueden proporcionar agua muy barata, al ser un producto residual, comercialmente hablando. Las centrales térmicas eléctricas, así como las nucleares, imprescindiblemente, necesitan agua para su refrigeración, que termina convertida en vapor de agua. Cuando estas centrales —de ambos tipos— están en la línea de costa, utilizan agua marina como refrigerante, agua que se desecha convertida en vapor. Si ese vapor se enfría, se convierte en agua recuperada y desalinizada, ya que se licúa separadamente de sus sales. Y esto requiere muy pequeña inversión y supone escasos problemas de adaptación. El agua así obtenida, por su exagerada pureza, necesita de tratamientos potabilizantes adicionales, que no son ni complicados ni costosos. Por el contrario, a esta situación se le puede sacar mucho provecho si se actúa adecuada e inteligentemente, agregando los aditivos más aconsejados, según sus destinos y usos.

**7.3.- Energías no convencionales:** Se puede también utilizar la energía procedente de la biomasa almacenada en los residuos orgánicos urbanos —como se viene haciendo en EEUU—, los cuales constituyen fuentes de energías que hoy se dilapidan, sin ningún tipo de aprovechamiento e, incluso, produciendo problemas y causando daños innecesarios, que son evitables y reconvertibles. En el caso de usar, para las desalinizadoras, la energía eléctrica procedente de la gasificación de una planta de tratamiento de residuos orgánicos urbanos, según patentes que utilizan firmas

especializadas en este sector, se consiguen varios objetivos medio-ambientales y paisajísticos importantes, de forma simultánea y modo muy rentable. Es un sistema altamente aconsejable al resolver, a la vez, el problema del abastecimiento de agua y el del tratamiento de los residuos sólidos urbanos de origen orgánico.

**7.4.- Energías renovables:** Desde el punto de vista medioambiental resultan claros los beneficios que aportan las energías renovables. El problema principal al que sin embargo se enfrentan las formas de energía renovable más extendidas hoy en día, que son la energía eólica y la solar fotovoltaica, es la falta de poder garantizar un suministro continuo y constante de energía. A eso se suma la imposibilidad de predecir la producción a corto plazo. Este dilema tendría solución si existiese algún medio limpio y práctico de almacenar grandes cantidades de energía eléctrica.

Hoy por hoy, la forma más común y cómoda de almacenamiento directo de energía eléctrica a corto o medio plazo del que dispone comercialmente la humanidad son las baterías químicas. Estas son caras de producir, contienen elementos contaminantes que son descargados al medioambiente cuando finaliza su vida útil y no existe un estricto control de vertidos. Se da además la circunstancia de que el almacenamiento de grandes cantidades de agua, para su posterior consumo, resulta mucho menos comprometido que el antes mencionado almacenamiento de energía eléctrica.

De esta forma, los distintos sistemas que se pueden plantear en el ámbito de la desalación mediante el aporte de energías renovables son susceptibles de ser clasificados en dos grandes grupos:

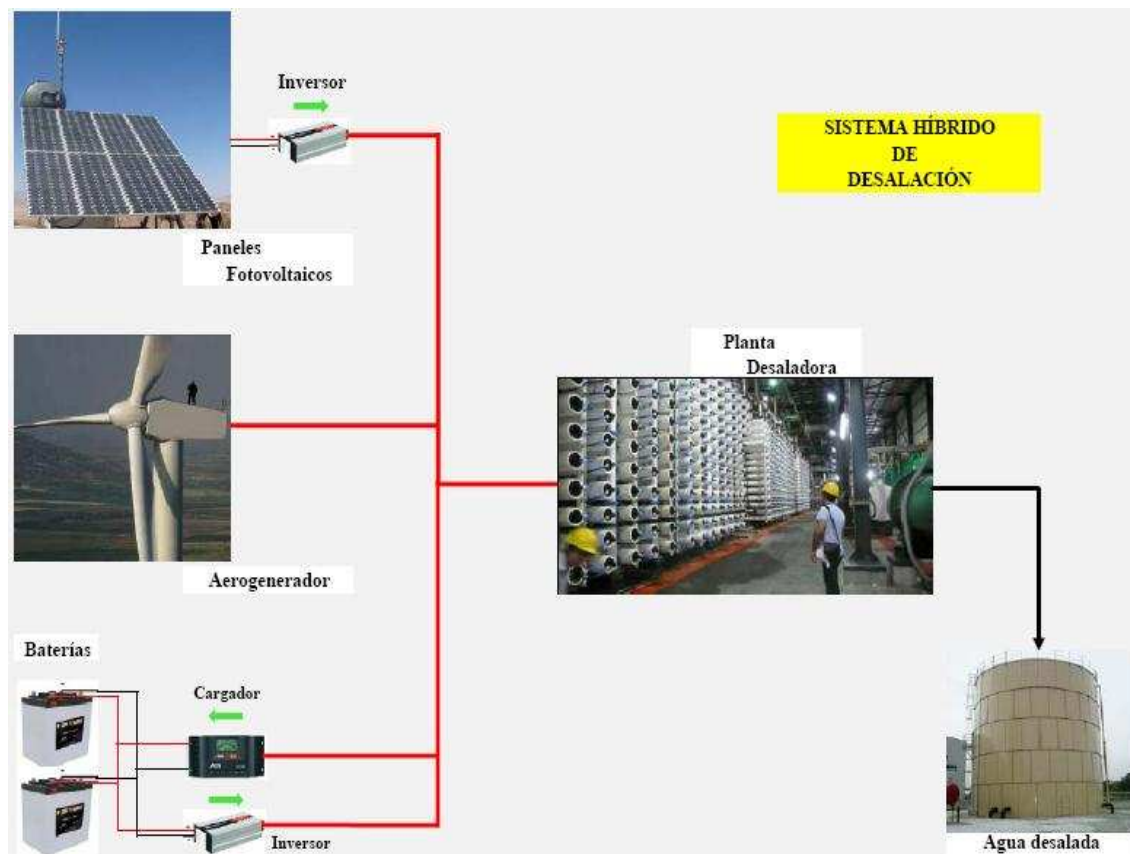
- Sistemas con una sola fuente de energía renovable
- Sistemas con múltiples fuentes de energía renovable (híbridos).

**a.- Sistemas con una sola fuente de energía renovable:** El sistema más simple lo constituye una planta de desalación alimentada directamente desde la red de suministro eléctrico. La presencia de las diversas formas de energía renovables que quepa imaginar sería siempre indirectamente a través del acoplamiento de éstas a la red de suministro en forma de elementos de generación. Esto conlleva, en muchas ocasiones, complicaciones de índole técnica que no se producirían de generarse la energía en el lugar de consumo.

**b.- Sistemas con múltiples fuentes de energía renovable:** Son los llamados sistemas híbridos de desalación. El concepto abstracto de uno de tales sistemas consiste en una serie de elementos de generación de energía unidos mediante una red aislada a una planta de desalación. Aquí se combina la disponibilidad de diversas fuentes de energía renovable para garantizar mejor un aporte continuado de la energía necesaria para la planta.

Como resumen de lo expuesto, y a modo de ejemplos, presentamos los dos siguientes sistemas de utilización de las energías renovables en la generación de agua potable por desalación.

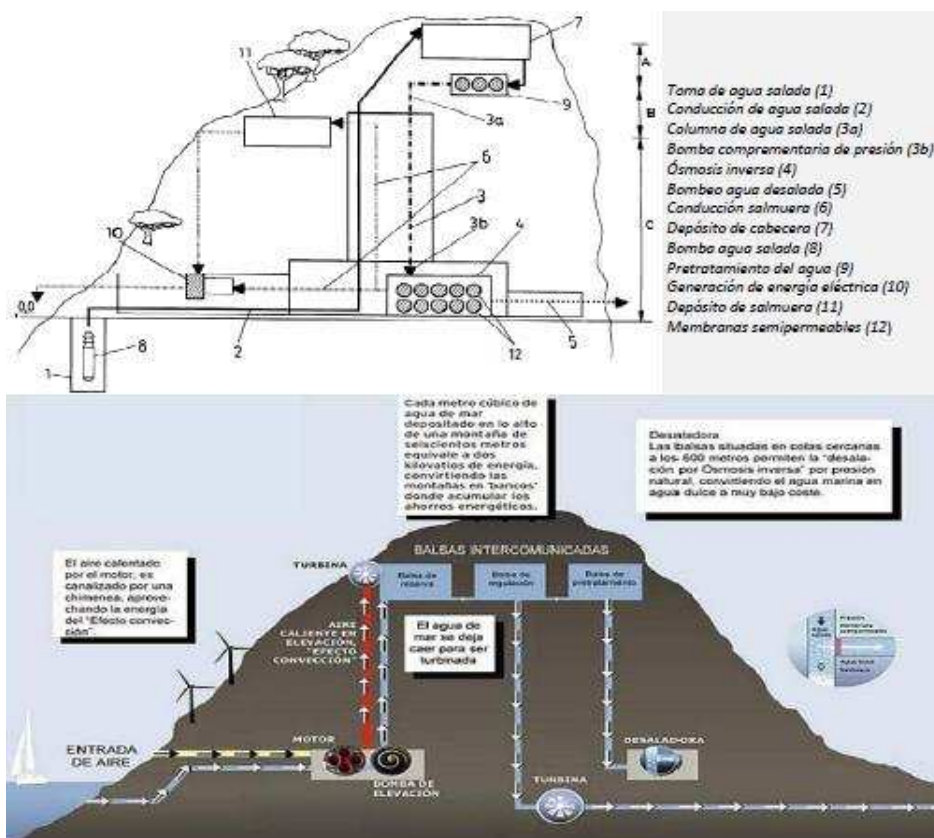
**7.4.1.- Sistema MEGA-Híbrido:** En el esquema que sigue podemos ver el sistema híbrido planteado para el proyecto MEGA-Híbrido de la Unión Europea para el Parque Eólico de Granadilla (Tenerife).



Este sistema consta de un grupo de paneles fotovoltaicos, un aerogenerador, un grupo de baterías y una planta de OI para desalación de agua de mar. La interconexión de los elementos del sistema se lleva a cabo mediante un enlace de corriente alterna, lo cual obliga a conectar los paneles a la red aislada a través de un ondulador. Esta red es mantenida por las baterías, a través de otro ondulador, y a ella está conectado un aerogenerador con generador síncrono. Se estima que en una gran parte de los días de calma que se producen, sobre todo en los meses en los que soplan los contra-alisios, podrá ser garantizado el funcionamiento de la planta gracias a la acción combinada de las baterías y los paneles.

**7.4.2.- Sistema Integral VF:** Se trata en sí mismo de una Central Hidráulica Reversible pero trabajando con agua de mar. Con ello se consigue generar agua dulce, por presión natural, y a su vez, electricidad. Se almacena la energía procedente de las renovables para disponer de ella cuando más se necesite a lo largo del día. El sistema fue ideado por el escritor e inventor *Alberto Vázquez-Figueroa*.

El llamado Sistema Integral VF se basa en las patentes 9500705 /07-04-95 y 9502446/ 12-12-95 y su principal objetivo se centra en equilibrar la curva de consumo energético disminuyendo sus costes, al tiempo que se desala agua de mar.



El resultado del proceso es que el coste energético total del metro cúbico de agua desalinizada se ve reducido sustancialmente, ya sea por la propia autogeneración de energía eléctrica o por la compensación de las distintas tarifas eléctricas correspondientes al consumo y a la producción y devolución de esta energía a la red comercial.

Aunque no ha sido probado a nivel industrial, los estudios realizados por los Ministerios de Medio Ambiente, Agricultura e Industria de España a través de sus empresas "Tragsa" y "Acuamed", así como de la Compañía Eléctrica, el Consejo Superior de Investigaciones Científicas y el del Colegio de Ingenieros Industriales de Madrid demuestra que dicho sistema desala agua de mar a un coste siete veces inferior al de los métodos tradicionales.

Para conseguirlo la única condición imprescindible se limita a disponer de una montaña cercana al mar, algo muy común en nuestra geografía.

El primer paso consiste en elevar agua de mar a una serie de balsas intercomunicadas entre si, que ejercen las funciones de regulación, reserva o pretratamiento. Simultáneamente el agua se deja caer con objeto de que accione las turbinas (preferentemente pelton) que generen la energía eléctrica que se envía a la red.

En apariencia significa un trabajo inútil, pero no es así; de ese modo la curva de consumo diario no se equilibra como hasta ahora por el costoso sistema de aumentar o disminuir grupos de producción, sino a base de regular el caudal hidráulico abriendo o cerrando una “llave de paso” según las necesidades de cada instante. Ello evita a “La Red” la obligación de programar a diario las expectativas de demanda, así como la necesidad de mantener una de “Reserva contra Imprevistos”. La energía hidráulica es la única que siempre esta disponible de forma inmediata.

Los fines de semana, cuando el consumo energético disminuye de forma notable, se reabastecen las balsas de reserva disponiéndolas para cinco días de consumo normal y como su capacidad está calculada para que sobrepase cualquier posible demanda diaria, las motores funcionan siempre en un régimen continuo lo que aumenta su eficacia.

Los gases de escape que producen por perdida de rendimiento (que en los casos de motores alimentados con gasoil puede alcanzar temperaturas increíblemente altas) calientan una corriente de aire que asciende por una chimenea interior generando una gran cantidad de energía a causa del llamado “*Efecto Convección*”. Si la chimenea es lo suficientemente alta se consigue que las pérdidas de un motor se conviertan en ganancias, obteniendo un rendimiento que en ocasiones supera el ciento veinte por cien, algo impensable en cualquier otra circunstancia.

Cuando la balsa “de pre-tratamiento” se encuentran a más de quinientos metros de altura se puede desalar agua por el sistema de “*Osmosis Inversa por Presión Natural*”, ya que cada diez metros de columna de agua equivale a una atmósfera de presión. La mitad del agua se convierte en potable mientras la otra mitad se trasforma en salmuera que al mezclarse con la gran masa de agua proveniente de las turbinas pierde su salinidad por lo que regresa al mar sin afectar ni a la flora ni a la fauna.

En determinados casos se pueden utilizar aerogeneradores que contribuyan de forma directa a subir agua a las balsas transformando la inestable energía eólica en energía hidráulica controlada e incluso se podría pensar en otras energías renovables.

Diversificar los puntos de producción constituye un notable ahorro ya que disminuye de forma drástica las pérdidas de energía (en ocasiones hasta del cuarenta por ciento) motivadas por la necesidad de enviarla a grandes distancias desde los centros de producción. Esa descentralización impide que pueda producirse un colapso general de la red tal como se ha producido en algunas ocasiones.

En definitiva, el espíritu del Sistema Integral VF se inscribe en el marco de un óptimo aprovechamiento de los recursos que tanto la tecnología como la naturaleza ponen a nuestro alcance.

### 6.4.4. Comparación de tecnologías

Cada uno de los procesos mediante los cuales se puede desalar el agua, tiene sus propias características diferenciadoras, que lo hace más o menos adecuado para cada caso. A modo de recopilación es conveniente realizar un análisis comparativo de las ventajas e inconvenientes de cada uno de estos métodos tecnológicamente viables actualmente a escala industrial para la producción de agua desalada. La siguiente tabla, muestra la valoración de todos los métodos comentados anteriormente frente a ciertas características exigibles a un método desalador.

Características	MSF	MED	CV	OI		ED
				1 PASO	2 PASOS	
Tecnología	Evaporación	Evaporación	Evaporación	Membranas		Membranas
Tipo energía	Térmica	Térmica	Eléctrica	Eléctrica		Eléctrica
Consumo energético	Alto	Alto/medio	Medio	Bajo	Bajo	Bajo
Calorífica (Kcal/m <sup>3</sup> )	50.000-60.000	30.000-50.000	-	-	-	-
Eléctrica (KWh/m <sup>3</sup> )	3-6	1,5-2,5	8-12	3-5	4-6	1,6-1,9
Total (KWh/m <sup>3</sup> )	61-76	36-60	8-12	3-5	4-6	1,6-1,9
Coste instalaciones	Alto	Alto/medio	Alto	Medio		Medio
Plazos instalación (meses)	24	18-24	12	18		15
Fabricantes	Numerosos	Escasos	Escasos	Numerosos		Numerosos
Capacidad producción	Alta	Media	Baja	Alta		Media
Producción por unidad (m <sup>3</sup> /día)	5.000-60.000	100-20.000	10-2.500	1-10.000		
Capacidad máxima instalada (m <sup>3</sup> /día)	45.000	10.000-18.000	(< 5.000)	(> 50.000)		(< 30.000)
Temperatura máxima proceso	90-120° C	70-75° C	70-75° C	< 45° C		< 45° C
Posibilidad ampliación	Difícil	Difícil	Difícil	Fácil		Fácil
Fiabilidad de operación	Alta	Media	Baja	Alta		Alta
Desalación agua de mar	sí	sí	sí	sí		no
Calidad agua bruta (ppm)	30.000-100.000	30.000-100.000	30.000-50.000	1.000-45.000		1.000-15.000
Producto/Agua de mar bombeada	10-25 %	15-30 %	40-50 %	35-45 %		15-30 %
Calidad agua desalada (ppm)	Alta (< 40)	Alta (< 40)	Alta (< 40)	Media (400-espiral) (200-fibra hueca)	Alta (< 40)	Media (< 300)
Flexibilidad planta	60-100 %	30-100 %	-	Por módulos		Por módulos
Limpiezas de mantenimiento	2-4 veces/año	0,5-2 veces/año	0,5-2 veces/año	1-4 veces/año		0,5-2 veces/año
Sensibilidad a condiciones agua de mar	Media	Reducida	Reducida	Alta		-
Pretratamiento	Moderado	Simple	Simple	Exigente		Exigente
Influencia condiciones operación	Media-alta	Baja-media	Baja	Muy alta		Muy alta
Superficie terreno requerida de instalación	Mucha	Media	Poca	Poca		Poca

En resumen, hay una diversidad de factores que hay que tener presentes antes de elegir el proceso más adecuado a nuestras necesidades y particularidades. No existe un proceso absolutamente mejor que los demás, siendo este el motivo de que no exista un proceso que haya desplazado del mercado a los demás.

Como característica general, se tiene que el consumo energético de los procesos de desalación mediante cambio de fases no depende de la salinidad del agua a tratar. La cantidad de energía térmica (calor) necesaria para obtener un Kg de agua destilada es

prácticamente independiente de la salinidad inicial del agua. En cambio, los procesos sin cambio de fase (Osmosis Inversa y Electro diálisis) consumen mayor cantidad energía cuanto mayor es la salinidad del agua de partida. Este es el motivo por el que estos procesos resultan más ventajosos cuando se trabaja con aguas salobres del subsuelo, cuya salinidad es muy inferior a la del agua del mar (35.000 ppm).

De los procesos analizados, observamos que el de ósmosis inversa presenta ventajas significativas, en cuanto a consumo de energía fósil, costos unitarios e impacto ambiental; esto último debido a que el proceso no requiere de cambios de estado, como los de MED y MSF, que utilizan mayor consumo energético e incrementan la emisión de CO<sub>2</sub>, provocando el efecto invernadero.

Otra característica de los procesos sin cambio de fases es que requieren un cuidadoso pretratamiento del agua de proceso, ya que en caso contrario se vería gravemente amenazada la vida útil de las membranas de Osmosis o Electrodiálisis. Hay que tener presente que el coste de las membranas constituye una parte importante (20% aproximadamente) del costo total de la planta, debido a la sustitución de las membranas cada 3-5 años. Este es el motivo por el que estas plantas requieren mano de obra de cierta calificación para operarlas adecuadamente.

Unos intereses bancarios elevados penalizan la implementación de plantas de destilación, ya que el costo inicial de la inversión es superior al de otros tipos de plantas. Pero tienen la ventaja de que pueden utilizar energía residual a baja temperatura, como la que se tiene en los circuitos de refrigeración de las máquinas alternativas. Esto hace que las plantas MED y MSF sean las más adecuadas para plantas de cogeneración.

Desde el punto de vista de la interdependencia, la osmosis inversa presenta una clara ventaja al acoplarse con una central eléctrica, ya que pueden ser bastante independientes las ofertas y demandas externas de agua y electricidad, porque la energía eléctrica que necesita la planta de Osmosis Inversa puede ser suministrada por una fuente externa. Esta ventaja ayuda a compensar los inconvenientes derivados de la incertidumbre que presenta el componente clave de la planta desaladora: las membranas de osmosis.

Dentro de los procesos evaporativos (con cambio de fase), se puede decir que, actualmente, las plantas de compresión de vapor están claramente enfocadas al mercado de plantas con una capacidad inferior a los 4.000 m<sup>3</sup>/día, mientras que para plantas de gran capacidad que trabajan con agua de mar, solo se instalan plantas MSF y MED. Los problemas técnicos que presentaban las plantas MED al principio han sido solucionados y en la actualidad las plantas MED están avanzando en el mercado frente a las plantas MSF. Esto se debe a las ventajas energéticas de las plantas MED, ya que aunque el consumo de energía térmica es similar en ambas plantas, la energía equivalente derivada del consumo de vapor a menor temperatura en una planta MED es prácticamente del





50%. Solo en los países árabes, donde no existe problema energético alguno, se siguen instalando grandes plantas MSF. Otra ventaja adicional de las plantas MED frente a las MSF son sus menores costos de operación y mantenimiento (derivados de la menor temperatura de operación).

En lo que respecta a las plantas de Osmosis, están teniendo un rápido crecimiento en los últimos años para el tratamiento de aguas con baja salinidad, ya que su consumo energético resulta muy pequeño en estos casos. Además, puede operarse a cualquier capacidad de producción, ya que ésta depende del número de membranas utilizadas.

La electrodiálisis, compite con la ósmosis inversa en la desalación de agua salobre, sobre todo si ésta tiene alto contenido en sílice que impide obtener rendimientos adecuados con la ósmosis. Sin embargo, la electrodiálisis, hoy por hoy no se puede utilizar en agua de mar.

Como simple referencia de sus características, podemos resumir todo lo anterior diciendo que:

<b>1.- La destilación:</b>	<b>2.- La ósmosis inversa:</b>	<b>3.- La electrodiálisis:</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Tiene un elevado consumo energético.</li> <li>- Requiere una elevada inversión inicial.</li> <li>- Precisa de una extensión de terreno importante.</li> <li>- Su eficiencia es baja.</li> <li>- No depende de la salinidad del agua.</li> <li>- Necesita una fuente de vapor que según los casos puede o no ser independiente del proceso.</li> <li>- Produce un agua de calidad casi pura.</li> <li>- Puede acoplarse a una central eléctrica productora de energía.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Tiene el menor consumo energético.</li> <li>- Se puede utilizar tanto en agua salobre como de mar.</li> <li>- La inversión precisa está muy ligada a las características del agua que se pretende desalar y en general es inferior a la de los otros sistemas.</li> <li>- Precisa pretratamiento físico-químico que a veces pueden ser importantes.</li> <li>- Precisa una extensión de terreno de tipo medio.</li> <li>- Necesita una fuente exterior de energía.</li> <li>- Además de iones separa bacterias y virus por lo que también tiene aplicaciones como sistema de desinfección.</li> <li>- La presencia de iones específicos limita sus posibilidades de aplicación eficiente.</li> <li>- Su manejo se complica en función de las características físico-químicas del agua.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Tiene un consumo energético de tipo medio que para aguas de salinidades bajas puede ser similar a la ósmosis inversa.</li> <li>- Necesita menores tratamientos químicos que los otros sistemas.</li> <li>- Sus necesidades de espacio e inversión son intermedias entre las de los otros sistemas.</li> <li>- Su coste de instalación es superior a la ósmosis inversa.</li> <li>- El agua producto es de inferior calidad a la de las otras tecnologías.</li> <li>- Su consumo de reactivos es menor que en los otros sistemas.</li> <li>- Su manejo es sencillo en todos los casos.</li> </ul>

De las cinco tecnologías mencionadas (MSF, Osmosis, MED, CV y Electrodiálisis), cada una tiene su propia cuota de mercado. Esto se debe a que para cada caso concreto hay que evaluar muy cuidadosamente todas las ventajas e inconvenientes de cada uno de los procesos si se quiere elegir el proceso más adecuado, ocurriendo que lo que en un caso concreto puede ser considerado un inconveniente, resulta ser una ventaja bajo otras circunstancias. Por consiguiente, como ya se ha explicado, hay que analizar cuidadosamente todos los factores antes de poder decidir cuál es el proceso óptimo para cada caso concreto.

**Conclusiones:** La desalación es una tecnología madura, fiable y segura, que nos permite obtener agua del mar a un precio adecuado para la gran mayoría de los usos. Por tanto, es una fuente más que hay que considerar en el suministro de agua de las zonas costeras. No tiene impactos ambientales que no puedan resolverse, están optimizadas en cuanto al consumo energético y es una tecnología que se lleva utilizando a gran escala desde hace casi sesenta años.

En la actualidad, las instalaciones de desalación por O.I. se han impuesto a otras tecnologías por su:

- Versatilidad y adaptabilidad a las distintas aguas a tratar.
- Capacidad de producir un agua “a la carta” o posibilidad de combinarse con otras tecnologías de afino.
- Su menor consumo energético.
- Sus menores costes de instalación y operación.
- No existe un diseño único de proceso para todos los casos. Búsqueda de soluciones concretas.
- Necesidad de introducción de sistemas de recuperación de energía.
- La introducción de sistemas de recuperación de energía en ciertas bombas representan una mejora sustancial del consumo energético, y una seguridad del proceso por su mejor control a las condiciones cambiantes.

En suma, el proceso para desalación de agua de mar por ósmosis inversa reúne mejores parámetros tecnológicos y de eficiencia; otros procesos de destilación como multiefecto (MED) y evaporación multietapas flash (MSF) son adecuados, pero implicaría una inversión inicial muy costosa y un gasto de mantenimiento y limpieza muy altos, además consumen cantidades considerables de energía por los cambios de estado físico. Así las cosas, la única tecnología que puede competir en la práctica con la ósmosis inversa es la destilación por múltiple efecto.

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

## ***BIBLIOGRAFÍA.***

- 1.- 2º Informe de Naciones Unidas sobre Desarrollo Recursos Hídricos en el Mundo.
- 2.- Abel. P. D. 1989. Water pollution biology. Ellis Horwood, Chichester, England.
- 3.- Ainhoa Albaina Urcelay. Tecnologías Sostenibles sobre la gestión del agua: La desalación. Estudio del caso en la Costa del Mediterráneo. 2007
- 4.- Alaadhi A.A. (2002) Desalination – where are we now? GCC Countries. Desalination & Water Reuse 12.
- 5.- Alba-Tercedor, J. & Sánchez-Ortega, A., (1988). Un método rápido y simple para evaluar la calidad biológica de las aguas corrientes basado en el de Hallawell (1978). Limnética, 4: 51 – 56.
- 6.- Alba-Tercedor, J. (1996). Macroinvertebrados acuáticos y calidad de las aguas de los ríos. IV Simposio del Agua en Andalucía (SIAGA). Vol. II: 203-213.
- 7.- Alba-Tercedor, J., Jáimez-Cuéllar, P., Álvarez,... (2002). Caracterización del estado ecológico de los ríos mediterráneos ibéricos mediante el índice IBMWP (antes BMWP'). Limnética 21: 175-185.
- 8.- Alberto Vázquez-Figueroa Rial. Patentes 9500705 /07-04-95 y 9502446/ 12-12-95.
- 9.- Alfonso Romero López. Diseño de una Planta desaladora de agua de Mar, por Osmosis Inversa, en el Campo de Dalías (Almería), 2008.
- 10.- Allan, J.D. (1996). Stream Ecology. ED. Chapman and may. Oxford. UK.
- 11.- Al-Shammiri M. and Safar M. (1999) Multi-effect distillation plants: state of the art. Desalination 126.
- 12.- Ansola G. (2000). Aspectos ambientales en las nuevas Fuentes de suministro de agua. Caudales ecológicos y reutilización. Química e Industria. Febrero 2000.
- 13.- A. Estevan y M. García. Energy Consumption in Reverse Osmosis Seawater Desalination: Current Situation and Perspectives. 2007.
- 14.- Asociación Americana de Obras de Agua (1996), El Rothberg, Tamburini y el modelo de Winsor para el Control de Corrosión y Química de Procesos, de Denver, Colorado, EE.UU..
- 15.- ASTM. 1982. Manual de aguas para usos industriales. American Society for Testing and Materials. Ed. Limusa. México.
- 16.- Awwa., et-al. Tratamiento del agua por procesos de membrana: Principios, procesos y aplicaciones, Mc Graw-Hill, Madrid 1998.
- 17.- B. García de Bikuña, H. Fraile, A. Agirre,... 2004. Seguimiento y caracterización de las aguas superficiales en el Parque de Salburua. Informe final 2003-2004. Centro de Estudios Ambientales, Ingurugiro Galetarako Ikastegia. Vitoria-Gasteiz.
- 18.- B. Marín, Aplicación de eductores para dilución de salmuera con agua de mar en instalaciones desaladoras, VI Congreso Nacional AEDyR, Palma de Mallorca, 2006.

- 19.- Baker, R.W. (2004). *Electrodialysis, Membrane Technology and Applications*, Wiley & Sons, Ltd, West Sussex, UK, 393-422.
- 20.- Barnabé Gilbert. 1991. *Acuicultura* 1. Ediciones Omega, SA. Barcelona España. pp. 29 -153
- 21.- Bavor H, J.,D.J. Fisher y J.C. Small, *Joint Study on sewage Treatment Using Shallow lagoon-Aquatic Plant systems*, Water Research Laboratory Agricultural College, Richmond, NSW, Australia, 1986.
- 22.- Befesa Agua, S.A.U. *Análisis de Configuraciones del Proceso O.I. en Desalación*
- 23.- Benito de Santos y Puig García, (1999). BMWPC un índice biológico para la calidad de las aguas adaptado a las características de los ríos catalanes. En: *Tecnología del agua*, ISSN 0211-8173, Nº 191, pags. 43-56.
- 24.- Bouwer H. (2002). *Artificial recharge of groundwater: hydrogeology and engineering*. *Hydrology Journal*. 10:121-142.
- 25.- Boyacioglu, H., *Development of a water quality index based on a European classification scheme.*, *Water SA*, Vol. 33, No. 1, January, 2007.
- 26.- Braun, r., et-al. *Anaerobic digestion of agroindustrial byproducts and wastes*, *Workshop on anaerobic conversion for environmental protection, sanitation and re-use of residues*, Gent, Belgium, 1997.
- 27.- Brun, J.P ; (1989). *Procédés de séparation par membranes*. Ed. Masson.
- 28.- Bueno, J.L.; Sastre, H. y Lavin, A.G. (1997). *Contaminación e Ingeniería Ambiental: Vol III, Contaminación de las Aguas*, FICYT. Oviedo.
- 29.- C. López, C. Germán, Asunción Francisco, Cristina Herce. *Filtros verdes en pequeños municipios*. Congreso del Agua. Zaragoza 1998.
- 30.- C.V. Vedavyasan, *Pretreatment trends — an overview*. *Desalination*, 203 (2007) 296–299.
- 31.- Cano A.A., J, Collado L.R, *La Lenteja de agua como sistema blando de depuración de aguas residuales de bajo costo*, *Tecnología del Agua* No. 174, marzo de 1998, pg 18-25.
- 32.- *Características y Propiedades Fundación Ecología y Desarrollo (coord.). El agua recurso limitado: sequía, desertificación y otros problemas*. Madrid: Estudios de Política Exterior: Biblioteca Nueva, 2003. 196 p. ISBN 84-9742-136-1.
- 33.- Casañas González, Antonio. (2001). «Curso de Desalación AEDyR: Membranas de O.I. Evolución de la tecnología, composición y gama de membranas». *Dow Liquid Separations*.
- 34.- Casey, T.J. (1997). *Unit Treatment Processes in Water and Wastewater engineering*. Wiley & Sons. Chichester, New York.
- 35.- Castillo G, Mena M.P., Dibarrart F. y Honeyman G. (2001). *Water quality improvement of treated wastewater by intermittent soil percolation*. *Water Science and Technology*. 43(12):187-190.
- 36.- Catalán Lafuente, J. (1997). *Depuradoras, bases científicas*. Editorial Bellisco.
- 37.- Chang, R. (1994). *Química*. México. McGraw-Hill Interamericana.

- 38.- Chapagain, A.K. and Hoekstra, A.Y. 2004. Water footprints of nations. Values of Water-Research Report Series No. 16, UNESCO- IHE.
- 39.- Chudoba, J., Menéndez, C. y Pérez, J. “Fundamentos teóricos de algunos procesos para el tratamiento de aguas residuales”. ISPJAE. La Habana (1986).
- 40.- Dapena J. L. y Ronzano, E. Tratamiento biológico de las aguas residuales. Madrid: Díaz y Santos, 1995.
- 41.- Degrémont, 1979. Manual Técnico del Agua. Degrémont. Bilbao. 4a Edición.
- 42.- Di Bernardo, L. Métodos y técnicas de tratamiento de agua. Volumen II. Rio de Janeiro, ABES, 1993.
- 43.- Directiva 98/83/CE relativa a la calidad de las aguas destinadas al consumo humano.
- 44.- Doré, M. (1989). Chimie des oxidants & traitement des eaux. Edit. Lavoisier Tec & Doc., Paris.
- 45.- Dr. Charles C. Patton. Applied Water Technology. Ed. Campbell Petroleum Series 1995.
- 46.- Drewes J.E. y Fox P. (2000). Effect of drinking water sources on reclaimed water quality in water reuse systems. Water Environment Research. 72(3):353-362.
- 47.- Droste, Ronald L, Theory and practice of water and wastewater treatment, John Wiley & Sons, 1997.
- 48.- E. Ronzano y J.L. Dapena ed. 1995. Tratamiento biológico de las aguas residuales.
- 49.- Eckenfelder, W.W. Industrial water pollution control. McGraw Hill 2ª edición. New York.
- 50.- Editores: Arbel R., Perfler R., Laber J., Cooper P., Wetland systems for water pollution control 1996, Water Science and Technology Vol 35, No. 5, 1997.
- 51.- El índice simplificado de la calidad del agua (ISCA) | Agència Catalana de l'Aigua.
- 52.- El-Nashar A.M. (2001) The economic feasibility of small solar MED seawater desalination plants for remote arid areas. Desalination 134.
- 53.- Estévez S.F, Diseño y explotación de sistemas de depuración de aguas residuales en pequeños núcleos y comunidades, Asociación Nacional de Químicos Españoles, Agrupación territorial de Castilla la Mancha, Sección Técnica de Medio Ambiente.
- 54.- Esther Jaraba Heras. Sistema de Control de una Planta Desalinizadora. Madrid, Septiembre 2007
- 55.- FAO. 2006. Fisheries Technical Papers T500.
- 56.- Fariñas, M. Ed. McGraw Hill, Ósmosis Inversa. Fundamentos, tecnología y aplicaciones. 1999.
- 57.- Fernández Jurado, M.A.; Moreno Merino, L.; Calaforra, J.M. (2001). Aspectos ambientales de la eliminación de aguas residuales urbanas de pequeños núcleos de población mediante infiltración directa sobre el terreno. V Simposio sobre el agua en Andalucía. Almería. ISBN: 84-8249-459-8. Depósito legal: AL-209-2001.



- 58.- Fernández, N., Ramírez, A., Solano, F., Índices físico-químicos de Calidad del agua, un estudio comparativo., Conferencia Internacional Usos Múltiples del Agua: Para la Vida y el Desarrollo Sostenible, Agua 2003, Universidad del Valle - Cinara, 2003.
- 59.- Folsome, E., Origen de la vida, Editorial Reverté, Barcelona, 1989.
- 60.- Fox P, Narayanaswamy K, Genz A y Drewes JA (2001). Water quality transformations during soil aquifer treatment at the Mesa Northwest water reclamation plant, USA. *Water Science and Technology*. 43(10):343-350.
- 61.- Francisco Fontúrbel R / Carlos Molina A. Origen del Agua y el Oxígeno Molecular en la Tierra: Elementos: ciencia y cultura, marzo-mayo, año/vol. 11, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla número 053 Puebla, México. 2004.
- 62.- Francisco Urrutia. Evolución global de la capacidad instalada de plantas desaladoras. I.T. No 72. 2005
- 63.- García J., Ruíz A. y Junqueras X. (1997). Depuración de aguas residuales mediante humedales construidos. *Tecnología del Agua*, 165, 58-65.
- 64.- García, J., Morató, J., y Bayona, J. (2004). Nuevos Criterios para el diseño y operación de humedales construidos. Ediciones CPET. Centro de Publicaciones de Campus Nord. Barcelona.
- 65.- García J, Ruiz, Junqueras X, Depuración de aguas residuales urbanas mediante humedales construidos, en *Tecnología del Agua* No. 165, junio de 1997, pg 58-65.
- 66.- García-Rodríguez L. and Gómez-Camacho C. (2001) Perspectives of solar-assisted seawater distillation. *Desalination* 126.
- 67.- Gerard Subirachs Sánchez, Ramón Oliver Pujol y Francesc Estrany Coda. Reverse osmosis seawater desalination plant with a daily capacity of 500 m<sup>3</sup>. *Técnica Industrial* 287 / Junio 2010.
- 68.- Ghetti, P. F. 1986. I Macroinvertebrati nell'Analisi di qualità dei corsi D'acqua. Ed. Universit' di Parma. Italia. 105 pp.
- 69.- Gómez Orea, D. (1998). "El agua" En *Tecnoambiente* n 1, 1998.
- 70.- Haldane, J.B.S., The causes of evolution, Princeton Science Library, New Jersey, 1990, pp. 86-87.
- 71.- Hellawell, J. M. 1986. Biological indicators of freshwater pollution and environmental management, Elsevier, England.
- 72.- Hernández Muñoz, A.; Hernández Lehmann, A.; y Galán, P. Manual Agua-Residual Uralita-Paraninfo. Depuración 2004
- 73.- Ing. Jaime Andrés Lara Borrego. "Depuración de aguas residuales municipales con humedales artificiales". Universidad Politécnica de Cataluña.
- 74.- J. A. Medina San Juan. Desalación de aguas salobres y de mar. Ósmosis Inversa. Ed. MP.
- 75.- J. C. Cerón, M. J. Moreno, M. Olías. Contaminación y Tratamiento de Aguas. 2ª d. Universidad de Huelva. 2005.
- 76.- J. C. I. Dooge. "Integrated Management of Water Resources", en E. Ehlers, T. Krafft. (eds.) *Understanding the Earth System: compartments, processes, and*



interactions. Springer, 2001, p. 116. Más referencias al final del artículo "Habitable Zone" en The Encyclopedia of Astrobiology, Astronomy and Spaceflight.

77.- J.A. Catalán Lafuente "Química del agua"-Ed. Bellisco 1990.

78.- Joan García, Jordi Morató y Josep M. Bayona. Depuración con Sistemas Naturales: Humedales Construidos.

79.- John Wiley and Sons (1971). Biotechnology and Bioengineering Symposium N° 2. Biological Waste Treatment. Ed. Raymond Canale.

80.- Jorge Lechuga A., Maricela Rodríguez y Joaquim Lloveras M. (2007). Análisis de los procesos para desalinización de agua de mar aplicando la inteligencia competitiva y tecnológica. Ingeniería, Revista Académica de la FI-UADY, 11-3, pp. 5-14, ISSN: 1665-529X.

81.- Joshua Schwartz – Beach Well Intakes for Small Seawater Reverse Osmosis Plants – MEDRC Project 97-BS-015 (1997)

82.- Kadlec, R.H. y Knight, R.L. (1996). Treatment Wetlands. CRC Press, Florida.

83.- Kuhn, A.T. "Industrial electrochemical processes". Ed. Elsevier (1971).

84.- La desalación de agua de mar por Osmosis Inversa. Sanz, M. Caso práctico: I.D.A.M. de Bahía de Palma. I Congreso AEDyR, Murcia. (2000)

85.- Lamontagne, M.P., Provencher, M. 1977. Méthode de la détermination d'un indice d'appréciation de la qualité des eaux selon différentes utilisations. Service de la qualité des eaux. Ministère des Richesses naturelles. Québec. W.E. 34

86.- Lazcano-Araujo, A., El origen de la vida. Evolución química y evolución biológica. 3ra. edición, Editorial Trillas, México DF, 1989, pp. 29–31, 39–41, 69–73.

87.- M. Fariñas, La desaladora de Javea — dos años vertiendo la salmuera de rechazo, Preprints, Desalación '04, Madrid, 2004.

88.- M. Neijssel, R. van der Meer y K. Luyben Elsevier (1987). Proceedings 4th European Congress on Biotechnology. Vol. 4. Ed. 0.

89.- M. Turek, Dual-purpose desalination-salt production electrodialysis, Desalination, 153 (2002) 377–381.

90.- Magurran, A. E. 1988. Diversidad ecológica y su medición. Ediciones Vedral. Traducido por: Dra. Antonia M. Cirer. 200 p.

91.- Manuel de Lucas Blanco. Estaciones de Tratamiento de Agua Potable. Aquagest 2008.

92.- Martín, F. Y Sánchez, J.M. (2005). Mejora de la eficiencia energética de las plantas desaladoras. Nuevos sistemas de recuperación de energía. Ingeniería y Territorio, n° 72. Barcelona.

93.- Martínez Domínguez, F. "Tecnología Eléctrica". Ed. Paraninfo (1996).

94.- Meares, Patrick: Membrane separation processes. Elsevier. 1976.

95.- Medina S. J. (2000). Calidad del Agua, 3ª. Edición. Mundi-Prensa, España.

96.- Medina San Juan JA. Desalación de aguas salobres y de mar: osmosis inversa. Ed. Mundi-Prensa (2000).

97.- Metcalf-Eddy (1994). "Ingeniería sanitaria: tratamiento, evacuación y reutilización de aguas residuales" 3 ed. Ed. Labor S.A.



- 98.- Mingo, J. 1981. La vigilancia de la contaminación fluvial 1. Tratamiento de los datos de control analítico. Dirección General de Obras Hidráulicas. MOPU.
- 99.- Mintz m.s. Electrodialysis: principles of process design, Industrial and engineering chemistry, 55(1963) 18-28.
- 100.- Mojzsis, S., “El origen de la vida en la Tierra”, National Geographic, en español, vol. 2 (3) 1998, pp 54–81.
- 101.- Morel. A.: Osmose Inverse and Ultrafiltration. Academic Press. 1987.
- 102.- Moya, N. 2006 Índice multimétrico de integridad biótica para la cuenca del río Chipiriri. UMSA La Paz-Bolivia
- 103.- Muñoz, V.; Martín, D. Bases de la Ingeniería Ambiental. UNED.
- 104.- NASA Goddard Space Flight Center. First evidence that comets filled the oceans: A dying comet’s kin may have nourished life of Earth, 2001.
- 105.- Neil M. Wade. Distillation plant development and cost update. September 11–13, 2000, Jerba, Tunisia.
- 106.- Nemerow, N.L.; Dasgupta, A. (1998). Tratamiento de vertidos industriales y peligrosos. Editorial Díaz Santos. Madrid.
- 107.- O.M.S. “Guías para la calidad del agua potable”-2ª Edición.
- 108.- Oparin, A.I., Origen de la vida sobre la Tierra, Editorial Tecnos, Madrid, 1970, pp. 299–312.
- 109.- Orozco, C., Pérez, A., Gonzales, M. N., Rodríguez, F., Alfayate, J., Contaminación Ambiental. Una visión desde la Química..., Tercera edición, Thomson Editoriales Spain Paraninfo, S.A., 2005.
- 110.- Petrucci, R. H., W. S. Harwood, F. G. Herring. (2002). General Chemistry Principles and Modern Applications (Eighth Edition). Table 14.3. Ed. CHIPS. Weimar, USA.
- 111.- Piélou, E. C. 1977. Mathematical ecology. J. Wiley & Sons, N.Y. 385 pp.
- 112.- Piqué, G.G.: Manual Práctico de Ósmosis Inversa. UOP Fluid Systems. 1989.
- 113.- Prygiel, J. y Coste, M. Coordinadores. Guide Méthodologique pour la mise en oeuvre de l’Indice Biologique Diatoées. NF T 90-354.
- 114.- Ramalho, R. S. Tratamiento de aguas residuales. Barcelona: Ed. Reverté S.A., 1991.
- 115.- Ramírez Quirós, F. (2005). Tratamiento de Desinfección del Agua Potable, Canaleduca.
- 116.- Raphael Semita. Desalination: Present and Future. Revista “International Water
- 117.- Reed S.C., Crites R.W. y Middlebrooks E.J. (1995). Natural Systems for Waste Management and Treatment. 2nd Edition. McGraw-Hill, New York, 431 pp.
- 118.- Ricardo Figueroa, Elizabeth Araya, Oscar Parra, Claudio Valdovinos. Macroinvertebrados Bentónicos como Indicadores de Calidad de Agua. Universidad de Concepción, Chile.
- 119.- Rigola, M. (1989). Tratamiento de aguas industriales, Marcombo.
- 120.- Robusté, J. (2004). Humedales en explotación, experiencia en Catalunya. In : Nuevos Criterios para el Diseño y Operación de Humedales Construidos. Una



Alternativa de Bajo Coste para el Tratamiento de Aguas Residuales. García J., Morató J. y Bayona J.M. (eds.). Universidad Politécnica de Catalunya, Barcelona, pp. X-x.

121.- Rodier, J., 1998. Análisis de las aguas. Aguas naturales, aguas residuales, agua de mar. Ediciones Omega S.A.

122.- Roldán Pérez, G.: Los macroinvertebrados y su valor como indicadores de la calidad del agua. Rev. Acad. Colomb. Cienc. 23(88): 375-387. 1999. ISSN 0370-3908.

123.- Ronzano, E. y Dapena, J. L. Tratamiento Biológico de las Aguas Residuales. Madrid, Díaz y Santos S.A. p. 89 – 171, 1995.

124.- Rosenberg, D. M. & V. H. Resh. 1993. Freshwater biomonitoring and benthic macroinvertebrates. Chapman & Hall, N.Y. 488 pp.

125.- Rosenzweig, M. L. 1995. Species Diversity in Space and Time. University of Cambridge Press. Great Britain at University Press, Cambridge. 50-72 pp.

126.- Rossum, JR y Merrill, DT (1983) "Evaluación de la saturación de calcio carbonato de índices", Journal AWWA, febrero, 95-100.

127.- Salas, J., Pidre, J., Solís, G. y Ternero, M. (2005). Mejoras en el proceso de depuración de aguas residuales urbanas mediante filtros de turba. VI Simposio del Agua en Andalucía, tomo II, pp. 1163-1172.

128.- Santiago Fernández, J.F. (1997). Manual de potabilización de aguas. Centro de información de agua y saneamiento. Ed. Academia.

129.- Schäfer, A.I; Fane, A.G; Waite, T.D. (2005). «Nanofiltration. Principles and Applications». Elsevier.

130.- Seoanez Calvo, M. Ed. 1995. Aguas residuales urbanas: Tratamientos naturales de bajo costo y aprovechamiento.

131.- Simon, G.: Desalination and water purification. Elsevier 1986.

132.- Snoeying, V.L.; Jenkins, D. 1987. Química del Agua. Limusa, Noriega Editores.

133.- Soriano, E. et al: Nuevas tendencias en las tecnologías de desalación. Universidad politécnica de Valencia. 1984.

134.- Speece, R.E. (1996). Anaerobic Biotechnology for Industrial Wastewaters, Archae Press.

135.- Speece, R.E. 1996. Anaerobic biotechnology for industrial wastewaters.

136.- Tebbutt, T.H.: Fundamentos de control de la calidad del agua. Noriega Ed. Limusa. 1990.

137.- Th. Peters, D. Pintó and E. Pintó, Improved seawater intake and pre-treatment system based on Neodren technology, Desalination, 203 (2007) 134–140.

138.- Th. Peters, Improving seawater desalination with reverse osmosis, in: Proceedings, International Conference FILTECH 2007, Wiesbaden, 27.002/01.03. 2007.

139.-Tobias, C., What do we know about the origin of the earth's oceans? Is it more likely that they derive from icy comets that struck the young Earth or from material released from the Earth's interior during volcanic activity? Scientific American: Ask the Experts: Environment, sf.



- 140.- Torres, M. y Medina, J. A.: La calidad del agua y las membranas semipermeables. Ingeniería Civil 1986.
- 141.- UNESCO. (2006). Water, a shared responsibility. The United Nations World Water Development Report 2.
- 142.- US/EPA Handbook of Advanced Photochemical Oxidation Processes, EPA/625/R-98/004 (1998).
- 143.- Valero et al. (2001) La Desalación como Alternativa al Plan Hidrológico Nacional. CIRCE-Universidad de Zaragoza Report. January 2001.
- 144.- Veza JM. Introducción a la desalación de aguas. Publicaciones Universidad de las Palmas (2002).
- 145.- Vollhardt, K.P.C. (1992). Química Orgánica. Ediciones Omega, S.A. Barcelona.
- 146.- Vymazal J., Brix H., Cooper P.F., Green M.B. y Haberl, R. (1998). Constructed Wetlands for Wastewater Treatment in Europe. Backhuys Publishers, Leiden, 366 pp.
- 147.- Walter J. Weber, Jr. (1979). Control de la calidad del agua. Procesos fisicoquímicos. Ed. Reverte, S.A. Barcelona.
- 148.- Walter J., Weber JR. "Control de calidad del agua. Procesos Físico – químicos". Ed. Reverté, 1979.
- 149.- Waste Water Engineering Treatment, Disposal & Reuse. Third edition Metcal & Eddy
- 150.- Zarza E. and Blanco M. (1996) Advanced M.E.D. solar desalination plant: Seven years of experience at the Plataforma Solar de Almería. In: Proceedings of the Mediterranean Conference on Renewable Energy Sources for Water Production, Santorini (Greece), 10-12 June 1996.

### **Recursos Electrónicos:**

[www.who.int/water\\_sanitation\\_health/dwq/en/es.wikipedia.org](http://www.who.int/water_sanitation_health/dwq/en/es.wikipedia.org)  
[www.unesco.org/water/wwap/index\\_es.shtml](http://www.unesco.org/water/wwap/index_es.shtml)  
[www.cetesb.sp.gov.br/Agua/rios/indice\\_iap\\_iqa.asp](http://www.cetesb.sp.gov.br/Agua/rios/indice_iap_iqa.asp)  
[www.chduero.es/webcorp/Calidad/caligc.html](http://www.chduero.es/webcorp/Calidad/caligc.html)  
[www.deswater.com](http://www.deswater.com)  
[www.ecoaigua.com/3.html](http://www.ecoaigua.com/3.html)  
[www.env.gov.bc.ca/wat/wq/BCguidelines/indexreport.html](http://www.env.gov.bc.ca/wat/wq/BCguidelines/indexreport.html)  
[www.epa.gov](http://www.epa.gov)  
[www.fao.org](http://www.fao.org)  
[www.fao.org/nr/water/promotional.html](http://www.fao.org/nr/water/promotional.html)  
[www.gsfc.nasa.gov/gsfsc/spacesci/origins/linearwater/linearwater.htm](http://www.gsfc.nasa.gov/gsfsc/spacesci/origins/linearwater/linearwater.htm)  
[www.ideam.gov.co](http://www.ideam.gov.co)  
[www.macrofitas.com](http://www.macrofitas.com)



[www.miliarium.com](http://www.miliarium.com)  
[www.mozilla.org](http://www.mozilla.org)  
[www.naseba.com](http://www.naseba.com), 2006.  
[www.sciam.com/askexpert/environment/environment13.html](http://www.sciam.com/askexpert/environment/environment13.html)  
[www.sener.es](http://www.sener.es)  
[www.smallwat.org](http://www.smallwat.org)  
[www.spainbusiness.com](http://www.spainbusiness.com)  
[www.uc.cl](http://www.uc.cl)  
[www.uic.edu/~mansoori/Thermodynamics.Educational.Sites\\_html](http://www.uic.edu/~mansoori/Thermodynamics.Educational.Sites_html)  
[www.waterfootprint.org/?page=files/home](http://www.waterfootprint.org/?page=files/home)  
[www.wem.ctw.utwente.nl/organisatie/medewerkers/medewerkers/hoekstra/Arjen%20Hoekstra/](http://www.wem.ctw.utwente.nl/organisatie/medewerkers/medewerkers/hoekstra/Arjen%20Hoekstra/)  
[www.who.int/es/](http://www.who.int/es/)  
[www.worldwatercouncil.org/index.php?id=1&L=0](http://www.worldwatercouncil.org/index.php?id=1&L=0)

## CURRICULUM VITAE

**Nombre:** Antonio Ros Moreno  
**Fecha de nacimiento:** 05 de mayo de 1961  
**Dirección:** C/  
Cartagena (Murcia)  
Telf.:  
E-mail: [rosegea61@gmail.com](mailto:rosegea61@gmail.com)



Desde 1984 que se inicia mi carrera profesional hasta la fecha, me he dedicado a la gestión de procesos mineros-metalúrgicos y mantenimiento de los mismos, así como a la consecución de determinados logros en el campo de la I+D+i.

### **TITULACIÓN:**

- **Ingeniero Técnico de Minas;** Especialidad en Mineralurgia y Metalurgia.
- **Técnico Superior en Prevención de Riesgos Laborales** (Seguridad).
- **Estudios de Administración y Dirección de Empresas.**

### **EXPERIENCIA PROFESIONAL:**

- Actual: Búsqueda de trabajo, desarrollo de Patente de Invención Núm. **201231557** otorgada por la Oficina Española de Patentes y Marcas, redacción y publicación de manuales técnicos, asesoramiento y promoción de proyectos.
- 2003–2010 (Cierre Empresa): **Jefe de Producción Hidrometalúrgica y Control de Procesos** en Española del Zinc, S.A.  
Dirección, planificación, gestión y control de la producción, mantenimiento, subcontratación, aprovisionamiento, calidad, seguridad y eficiencia de las instalaciones a mi cargo, así como el control, coordinación y logística de todas las áreas productivas y de distribución de la empresa.
- 1987–2003: **Jefe de Producción y Mantenimiento Hidrometalúrgico** en Española del Zinc, S.A.  
Dirección, planificación, gestión y control de la producción, mantenimiento, subcontratación, aprovisionamiento, calidad, seguridad y eficiencia de las instalaciones a mi cargo, así como el asesoramiento en nuevas inversiones y cooperación activa con el departamento de I+D+i.
- 1984–1987: **Jefe de Turno de Lixiviación** en Española del Zinc, S.A.  
Responsable de la consecución de resultados de producción definidos por la dirección del departamento de producción, gestión del equipo de operarios de producción bajo mi responsabilidad, asegurando el correcto funcionamiento del proceso productivo y los niveles de producción establecidos.

## ACTIVIDADES:

Entre las principales actividades desarrolladas en empresa metalúrgica-química con un equipo humano de unas 300 personas (180 bajo mi responsabilidad directa), he de destacar:

- **Planificación** integral de todas las operaciones productivas en coordinación con otros departamentos afectados, implementación, seguimiento y control de los procedimientos de fabricación y las productividades asociadas.
- **Gestión** de los recursos asignados a fabricación según las directrices marcadas, asegurando la optimización de las materias primas, de los recursos humanos, de los equipos y, así, de los niveles de calidad requeridos.
- **Gestión y control** de presupuestos.
- **Logística** de suministros, almacén y distribución.
- **Participación** en el diseño e implementación de la Mejora Continua.
- **Implementación** de la política de personal (selección, formación, etc.) de acuerdo a las directrices de la Dirección de Operaciones.

## EXPERIENCIA EN PROCESOS PRODUCTIVOS:

Los principales procesos industriales en los que he trabajado en su planificación, gestión y control son: (1).- Calcinación de mineral en Horno de Fluidificación (260 t/día). (2).- Producción de vapor en Caldera de 42 bar. (12 t/h). (3).- Producción de ácido sulfúrico (254,4 t/día). (4).- Tratamiento de aguas residuales (1.000 m<sup>3</sup>/día). (5).- Lixiviación y purificación de calcinas (1.500 m<sup>3</sup>/día). (6).- Extracción con solventes orgánicos de metales (20.000 t/año). (7).- Electrolisis de sulfatos (50.000 t/año). (8).- Fusión en Hornos de inducción y moldeo de aleaciones (50.000 t/año).

Destacando el conocimiento de la dinámica y cálculo de los principales parámetros de los distintos procesos: (a).- Operaciones físicas unitarias (sedimentación, flotación, filtración, centrifugación, evaporación, adsorción, aireación, etc.). (b).- Procesos químicos unitarios (neutralización, precipitación, coagulación y floculación, oxidación-reducción, procesos electroquímicos, extracción con disolventes, intercambio iónico, desinfección, etc.). (c).- Procesos biológicos unitarios (tratamientos aerobios, anaerobios y anóxicos). (d).- Incineración de residuos y su problemática medioambiental. (e).- Vertido y almacenamiento controlado de residuos (especialmente como jarofix). (f).- Auditorias de residuos (propósito y ventajas, alcance, elementos esenciales, metodología y gestión).

## **EXPERIENCIA EN MANTENIMIENTO Y PROGRAMACIÓN DE PARADAS:**

(1).- Planificación y coordinación de las labores de mantenimiento mecánico, eléctrico e instrumentación (tanto preventivo, predictivo, correctivo como legal), dirigiendo y coordinando el equipo de profesionales a mi cargo, responsabilizándome también de la gestión del almacén y de los servicios generales de la planta. (2).- Implementación del Plan de Mantenimiento basado en RCM y TPM. (3).- Implantación GMAO y conocimiento de SAP (integrado sistema ERP). (4).- Auditorías Técnicas y de Gestión de Mantenimiento. (5).- Organización, planificación y optimización de paradas mensuales, cuatrimestrales y anuales.

Matizando la utilización de las siguientes técnicas específicas de mantenimiento: (a).- Análisis de Fiabilidad de Equipos. (b).- Alineación de Ejes. (c).- Equilibrado de Rotores. (d).- Diagnóstico de Fallos en Equipos. (e).- Mecanismos de Desgaste y Técnicas de Protección. (f).- Análisis de Averías. (g).- Técnicas de Mantenimiento Predictivo. (h).- Análisis de la degradación y contaminación del aceite. (i).- Análisis de Vibraciones. (j).- Planificación de tareas.

## **PATENTE:**

- **Procedimiento integrado para la recuperación de zinc y otros metales a partir de polvo de acería o similares (ES-201231557):** Se trata de un proceso novedoso para la valoración y recuperación de productos a partir de óxidos secundarios, consiguiendo de esta manera una gran flexibilidad en cuanto a la calidad de la materia prima, un ahorro importante de costes económicos, mejoras medioambientales destacables y la unificación de procedimientos hasta ahora conocidos.

## **PROYECTOS:**

- **Planta de Carbonato Sódico (Documento Inicial):** Presupuesto 283 MM €. El objetivo de este proyecto es el de diseñar una planta de producción de Carbonato Sódico a partir del Carbonato de Calcio y el Cloruro Sódico, mediante el proceso Solvay. El proceso además de ser viable técnicamente tiene que satisfacer todas las normativas y las legislaciones vigentes.
- **Ampliación Planta de Zinc:** Presupuesto: 40 MM €. Localización: Norte de África. Propuesta para la ampliación de la producción y recuperación de residuos metálicos en Planta de zinc electrolítico.
- **Ciudad del Zinc:** Presupuesto: 100 MM €. Localización: Cartagena (Murcia). Planta de fabricación de zinc electrolítico de alta pureza, mediante la valorización de residuos, basada en la extracción por solventes orgánicos.

- **Ulexita Boliviana:** Presupuesto: 5 MM €. Localización: Salar de Uyuni (Bolivia). Concentración y purificación de mineral de ulexita para aumentar su valor agregado.
- **Purificación en múltiples etapas:** Presupuesto: 300.000 €. Localización: Cartagena (Murcia). Desarrollo de la purificación en múltiples etapas del electrolito de zinc para obtención de un cemento rico en cobre y otros cementos de cadmio, cobalto y níquel.
- **Tratamiento de aguas residuales de una planta mineralúrgica de sulfuros complejos:** Presupuesto: 500.000 €. Localización: Sur de España. Definición y diseño de tratamiento de aguas residuales con el menor coste, de inversión y operación, y plenas garantías en su funcionamiento.
- **LAF:** Presupuesto: 500.000 €. Localización: Cartagena (Murcia). Modificación del proceso jarosita para la recuperación de cementos ricos en plomo-plata de los residuos de la lixiviación neutra de blenda.
- **EXCINRES:** Presupuesto: 10 MM €. Localización: Cartagena (Murcia). Puesta en marcha de la planta de lavado y extracción de zinc a partir de residuos de jarosita.

**ACTIVIDADES COMPLEMENTARIAS:** - Profesor en Cursos de Operador de Planta Química y Mantenimiento en Instalaciones Industriales. - Desarrollo de programas para el Control de Procesos. - Participación redacción **Estudio de Impacto Territorial** (Modificación nº 130 PGC).

**PUBLICACIONES:** Publicación de varios artículos con certificado ISSN en Emagister & Scribd: - **Aprovechamiento de los Sulfuros Complejos de la Faja Pirítica Ibérica:** Descripción del proceso de concentración de sulfuros polimetálicos. - **Reciclado de Polvos de Acerías (Óxidos de Zinc):** Principales procesos empleados en la recuperación de metales a partir de polvos de acería (EAFD). - **Ácido Sulfúrico (Tostación de Blenda/Esfalerita):** Principales características del ácido sulfúrico y su producción a partir de minerales de zinc (blenda). - **El Agua:** Estudio de las principales características del agua y los diferentes métodos empleados para su tratamiento. - **Extracción con Disolventes en la Separación y Recuperación de Metales:** Aplicación teórica y práctica de la extracción con disolventes en la metalurgia. - **Mantenimiento Industrial:** Gestión, técnicas y ejecución del mantenimiento. - **Boro. Menas bóricas e industria boratera:** Estudio sobre el boro, sus generalidades, los yacimientos de menas bóricas, procesos de refinado y el panorama de la industria boratera. - **Metalurgia del Antimonio:** Principales características de la metalurgia del antimonio.

**FORMACIÓN ADICIONAL:** - Inglés a nivel de traducción. - Mantenimiento Productivo Total (TPM). - Mantenimiento Centrado en Fiabilidad/Confiabilidad (RCM). - Trabajo en Equipo. - Técnicas de Reuniones. - Metrología y Calibración. - Sistemas de Gestión de la Calidad y Auditoría. - Ofimática. - Microsoft Project (o MSP). - Ingeniería Medio Ambiental e Hidrometalúrgica. - Tratamiento de Aguas Residuales. - Primeros Auxilios. - Lucha contra Incendios. - Plan de Emergencia Interior y Riesgos Laborales en Minería. - Operación de Calderas.

Antonio Ros Moreno