

EL TRATAMIENTO DEL AGUA PARA ABASTECIMIENTOS(*)

Por LUIS DE TORRES RIVADEMAR
Dr. Ingeniero Industrial.

Esta es la continuación del artículo publicado en el número anterior. En aquella primera parte se expusieron las cuestiones referentes al consumo de agua, fuentes de abastecimiento, impurezas y corrección del agua natural, calidad precisa del agua bruta y varios de los procesos de tratamiento y aparatos en que se realizan.

En las páginas siguientes se continúa la descripción de estos procesos: precipitación química, decantadores simples y compactos, filtración sobre arena, sobre carbón activo, esterilización y procesos de desalinización, refiriéndose finalmente a las posibilidades de reutilización del agua, que en algunos casos se hace necesaria.

5.4.2. Precipitación química.

En el tratamiento del agua para el consumo se aplica este proceso de forma prácticamente exclusiva, para reducir los iones Ca^{++} y Mg^{++} causantes de la dureza del agua. La eliminación de estos iones se realiza reduciendo a la vez la alcalinidad del agua, que es su contenido en iones CO_3H^- , $\text{CO}_3=$ y OH^- . (De éstos, el OH^- y el $\text{CO}_3=$ aparecen raramente; en cambio, los bicarbonatos se encuentran prácticamente en todas las aguas no tratadas.)

Ya sea en el agua natural o en el agua tratada, los iones que constituyen la alcalinidad del agua no se encuentran solos, sino acompañados de iones metálicos, con los cuales pueden agruparse para formar diferentes compuestos.

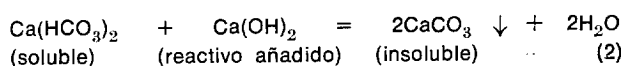
Estos compuestos, clasificados por solubilidades, son:

Solubles	Ligeramente solubles	Insolubles
(Solubilidad $\geq 1 \text{ mol/l}$)	(Solubilidad 0,01 a 0,03 mol/l)	(Solubilidad $< 0,002 \text{ mol/l}$)
$\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$	$\text{Ca}(\text{OH})_2$	CaCO_3
$\text{Mg}(\text{HCO}_3)_2$	MgCO_3	$\text{Mg}(\text{OH})_2$
Na_2CO_3		
NaHCO_3		

La eliminación de la dureza (Ca^{++} o Mg^{++}) se obtiene mediante reacciones químicas que, a partir de las sustancias de la primera columna (solubles), producen las sustancias de la última columna (insolubles). Vamos a exponer, a continuación, estas reacciones.

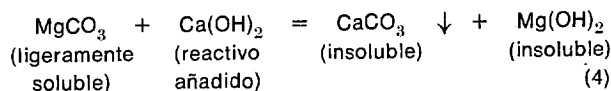
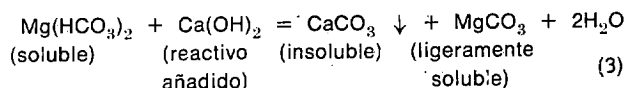
(*) Se admiten comentarios sobre el presente artículo, que pueden remitirse a la Redacción de esta Revista hasta el 31 de enero de 1973.

5.4.2.1. Eliminación de la dureza cálcica, existente en forma alcalina.



Se añade al agua *cal apagada*, que reacciona con el bicarbonato, para dar un precipitado insoluble, que se extrae como fango de la cuba de reacción.

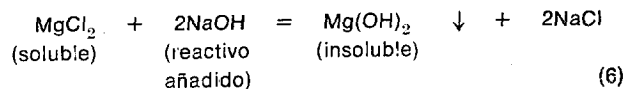
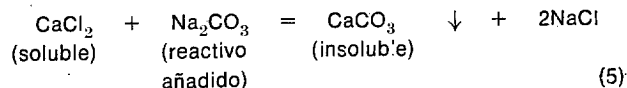
5.4.2.2. Eliminación de la dureza magnésica, existente en forma alcalina.



El carbonato cálcico e hidróxido magnésico resultantes, ambos insolubles, se extraen de la cuba de reacción en forma de fangos.

5.4.2.3. Eliminación de las durezas cálcicas o magnésicas, existentes en forma no alcalina.

Si tenemos el Ca^{++} o el Mg^{++} en forma de sales no bicarbonatadas, por ejemplo en forma de cloruros u otras sales solubles, las reacciones serían:



El proceso en el cual se reducen los contenidos en CaHCO_3 y MgHCO_3 mediante adición de cal, se llama descarbonatación, y en él se reduce efectivamente la salinidad del agua, por desaparición de los iones disueltos. En el caso de que la dureza sea no alcalina (reacciones 5 y 6), el proceso se llama desendurecimiento, y en él no se reduce la salinidad del agua, sino que se sustituyen los iones Ca o Mg por Na.

5.4.3. Decantadores simples para flóculos o precipitados químicos.

Hemos visto en los párrafos anteriores el fundamento físico-químico de la coagulación de coloides y de la precipitación química. Para que las partículas coaguladas o las moléculas insolubles se aglomeren en agrupaciones mayores y, por tanto, con velocidad de sedimentación mayor, es preciso que se encuentren (es decir, que se aproximen a distancia menor que la suma de los radios en que se manifiesta la acción de masas). Si hay n_1 partículas de diámetro d_1 y n_2 de diámetro d_2 , se demuestra que, en ausencia de agitación forzada, el número de encuentros por unidad de tiempo vale:

$$N = n_1 \cdot n_2 \cdot \frac{\pi}{72} \cdot g \frac{s^2 - 1}{v} (d_1 + d_2)^3 (d_1 + d_2).$$

Este número se incrementa si se induce una velocidad artificial por agitación suave.

Los flóculos o las agrupaciones de moléculas insolubles formadas, se separan del agua mediante decantación. En el caso de que esta operación se realice en aparatos distintos de aquellos en los que se efectúa el proceso de floculación o de precipitación, los aparatos en que se realiza se llaman decantadores simples. Los decantadores simples, que son semejantes a los pre-decantadores, han de ir precedidos de cámaras de coagulación o reacción química, seguidas de cámaras de floculación o crecimiento de partículas, que forman un elemento previo, imprescindible para conseguir la decantación. La capacidad de estas cámaras de floculación ha de dar unos veinte a treinta minutos de tiempo de retención, al caudal máximo de la planta. En ellas se produce una agitación suave, que incrementa los contactos de las partículas individuales, facilitando su crecimiento por acción de masas.

Los decantadores propiamente dichos, como hemos señalado, son análogos a los predecantadores, ya que, en ellos, la sedimentación de partículas se verifica según la ley de Stokes. Pero el crecimiento previo de las partículas permite adoptar velocidades de decantación mayores que las tomadas para los sedimentadores simples. Un flóculo formado por coagulación con sulfato de alúmina o sales férricas, tiene una densidad tan baja como 1,002, debido al agua absorbida y unida a él; si alcanza una dimensión de 1 mm $\varnothing$, su velocidad de sedimentación a 10° C sería de 3 m/h. Un precipitado de carbonato cálcico tiene una densidad del orden de 1,2, con el agua adsorbida; con una dimensión de 0,1 mm $\varnothing$, tendría también una velocidad de sedimentación de 3 m/h.

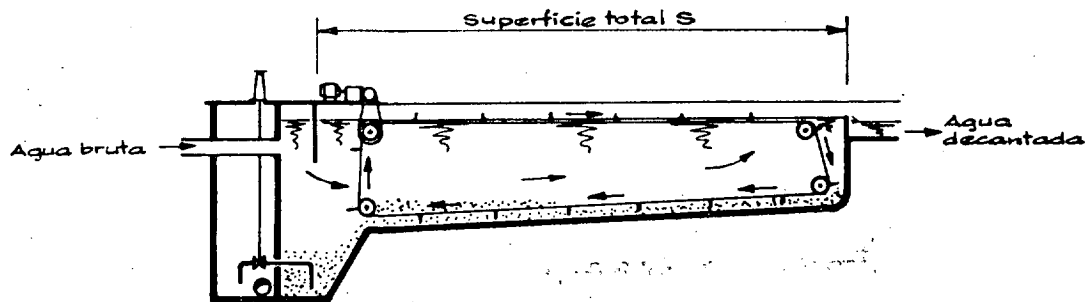
En la práctica no es conveniente sobrepasar, en este tipo de decantadores, la velocidad $Q/S \simeq 2 \text{ m}^3/\text{h} \cdot \text{m}^2$, para tener en cuenta las irregularidades de repartición hidráulica en ellos.

5.4.4. Decantadores floculadores compactos.

En estos decantadores, la operación de floculación o de crecimiento de los precipitados se realiza en el seno del mismo aparato, consiguiéndose partículas de mayor dimensión y velocidades de sedimentación más elevadas, utilizando dos principios básicos, que vamos a exponer brevemente.

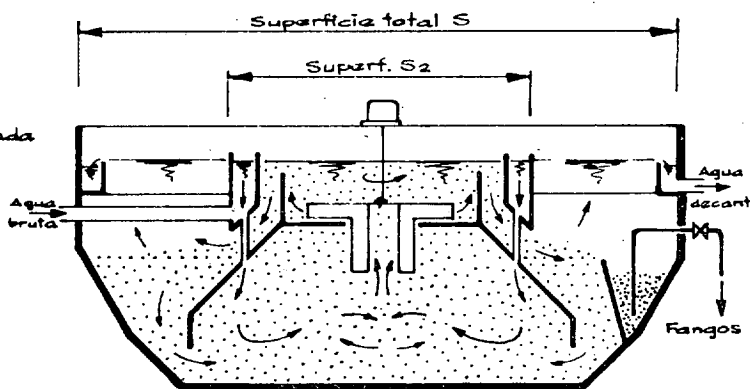
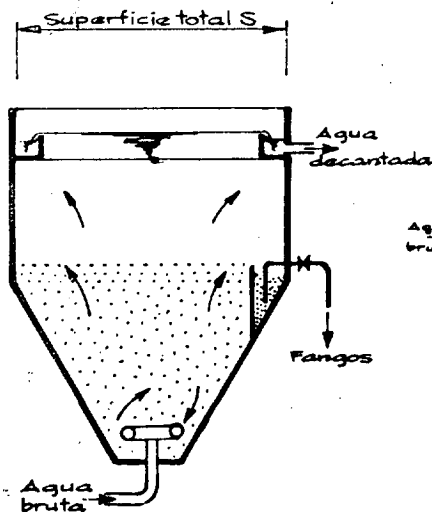
5.4.4.1. Coagulación en presencia de fangos o precipitados preformados.

Si la reacción de coagulación del coloide o de precipitación química se produce en presencia de partículas ya preformadas, evidentemente la probabilidad de encuentro de la partícula naciente con otra partícula aumenta mucho; si además esta segunda tiene ya un tamaño importante, la atracción que ejerce sobre la primera es muy grande, y el crecimiento de partículas es rápido. Dos sistemas se siguen para conseguir que el agua coagulada con los reactivos se encuentre en presencia de partículas preformadas: Uno consiste en tomar parte de las partículas ya formadas y recircularlas a la cámara de floculación (*recirculación de fangos*), para tener una riqueza del 5 al 12 por 100, en volumen, de fangos en dicha cámara; el segun-

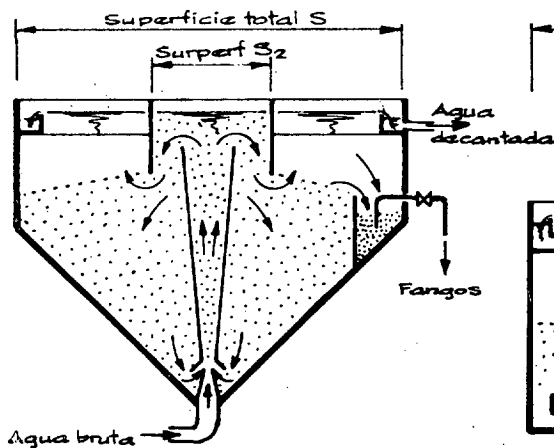


DECANTADOR SIMPLE RECTANGULAR

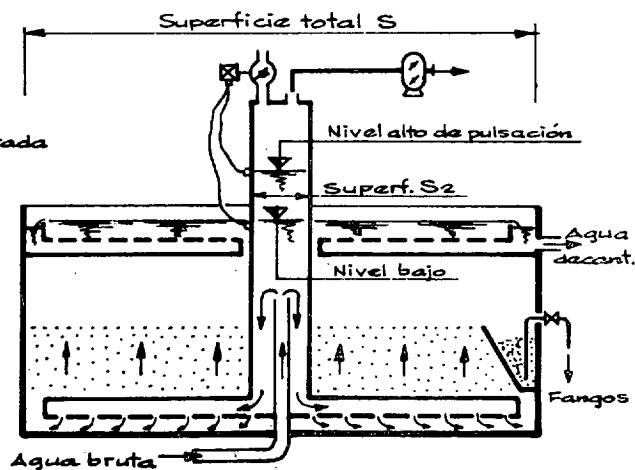
DECANTADOR DE LECHO DE FANGOS SIMPLE



DECANTADOR AQUAZUR B
(Recirculación de fangos)



DECANTADOR CIRCULATOR
(Recirculación fangos)



DECANTADOR PULSATOR
(Lecho de fangos pulsado)

Tipos de decantadores.
Superficie de decantación: $S_1 = S - S_2$

do consiste en hacer pasar el agua coagulada a través de una capa de fango espeso preformado (*lecho de fangos*), con una riqueza del 10 al 20 por 100, en volumen, de fangos.

5.4.4.2. Cohesión del fango.

Si se somete una masa de fango a una corriente ascendente de agua, se observa que, la capa fangosa, dentro de unos ciertos límites de velocidad, se comporta como un resorte elástico, de forma que el incremento de volumen ocupado por dicho fango es proporcional a la velocidad ascensional del agua que pasa a su través:

$$v_s = K \frac{v_{\text{expans.}} - v_0}{v_0} = K(E - 1). \quad (7)$$

El coeficiente K , de proporcionalidad del incremento relativo de volumen a la velocidad ascensional, se denomina coeficiente de cohesión del fango, y puede variar, según la naturaleza del agua y los reactivos, entre 0,3 y 1,2.

Otra observación interesante puede hacerse en este experimento. Si la introducción del agua de abajo-arriba a través del fango se realiza de forma continua, existe una clara tendencia a la formación de corrientes preferenciales y el lecho se rompe para valores de v_s relativamente bajos (para valores de E del orden de 4 ó 4,5). Por el contrario, si la introducción del agua se hace de forma intermitente, con caudales muy grandes durante tiempos cortos, seguidos de intervalos de reposo dos o tres veces mayores, el lecho de fango se expansiona bastante más, sin romperse, y se alcanzan valores de E de 5,5 a 6,5.

El valor de K es una característica propia del fango, que tiene, como vemos, una influencia fundamental en la velocidad admisible para el agua que se separa del fango, y constituye, por tanto, un dato básico para la fijación de la superficie del decantador.

5.4.4.3. Dimensionamiento práctico de decantadores floculadores compactos.

En los aparatos de recirculación de fangos se procura que la separación del agua clara y del fango se verifique en una zona superficial

de la masa de dicho fango. Con ello se busca evitar que el agua tenga que atravesar, de forma continua, la masa de fangos, tendiendo a formar corrientes hidráulicas preferenciales y a arrastrar el fango a la superficie.

En estos aparatos, cuando la operación predominante es la floculación de los coloides, si se considera la superficie S_1 de decantación (obtenida deduciendo de la superficie interior total aquella en la que, por la concepción del aparato, no existe decantación ni recogida de agua decantada), ha de verificarse de acuerdo con lo indicado.

$$\frac{Q \text{ m}^3/\text{h}}{S_1 \text{ m}^2} \leq 5,5 K. \quad (8)$$

Si la función fundamental es la precipitación química, la velocidad de decantación depende del peso específico y dimensión del precipitado formado. En el caso de carbonato cálcico, con precipitados del orden de 0,15 mm de talla y densidad 1,2, velocidades Q/S_1 , tan grandes como 6 m/h, son posibles. Evidentemente, a estas velocidades se escaparán todas las partículas de talla inferior, aumentando la carga de los filtros y disminuyendo la calidad del agua decantada. En todo caso, la precipitación química, el tiempo de retención del agua ha de ser no inferior a $70 \div 90$ min., para asegurar el buen crecimiento de las partículas.

En los aparatos de lechos de fangos, si se ha realizado una perfecta distribución del agua en toda la sección del lecho de fangos (de forma que no exista riesgo de corrientes preferenciales), o si se aplica el principio de pulsación del caudal antes expuesto, se ha de verificar:

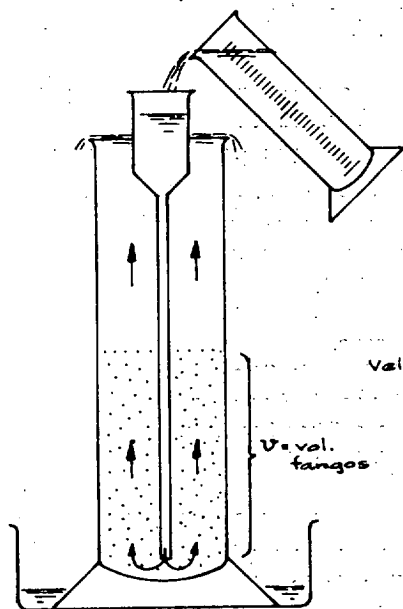
$$\frac{Q \text{ m}^3/\text{h}}{S_1 \text{ m}^2} \leq 5,5 K. \quad (9)$$

Si el aparato utilizado no garantiza esta perfecta distribución del agua a través del lecho de fangos, es aconsejable adoptar valores $Q/S_1 \leq 3 K$.

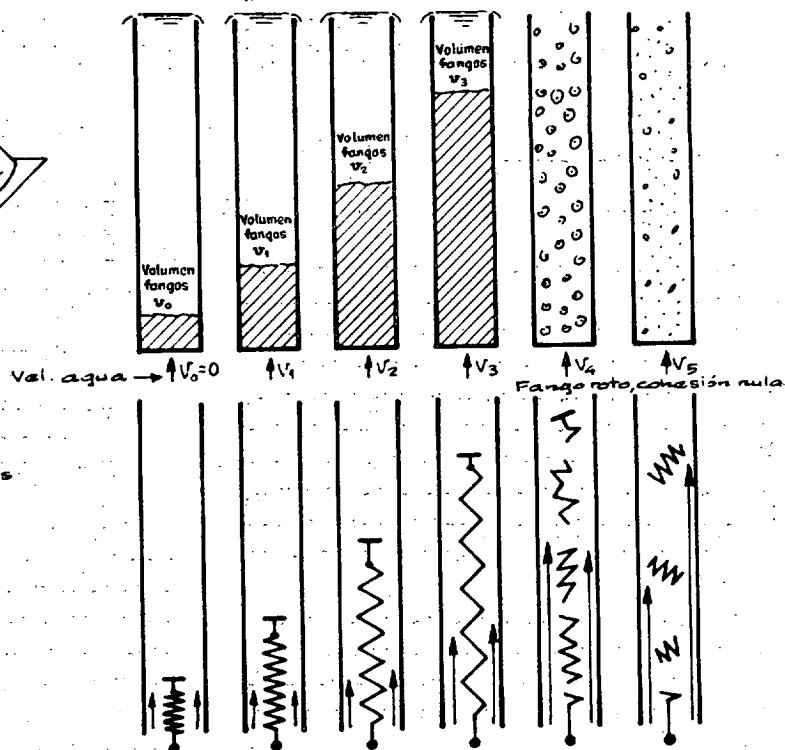
5.4.4.4. Valores del coeficiente de cohesión de fangos K .

El valor de K es muy variable, según la calidad del agua, su temperatura y los reactivos utilizados. Los valores más frecuentes en aguas

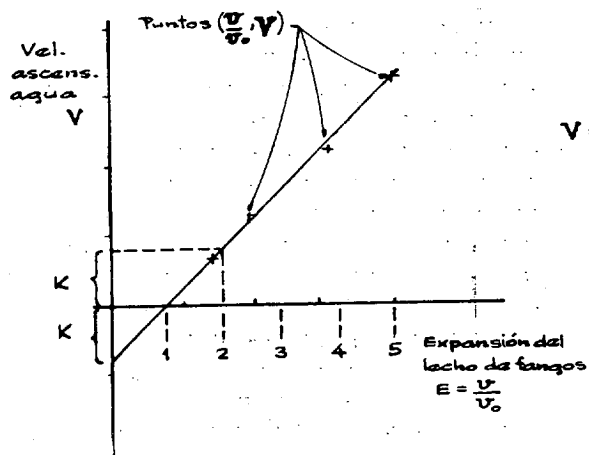
Medida experimental



Estado del lecho de fangos a distintas velocidades ascensionales del agua



El lecho de fangos se comporta como un resorte



$$V = K \left(\frac{V}{V_0} - 1 \right) = K (E - 1)$$

V = Vel. ascens. del agua a través del lecho de fango (m/h)

K = Coef. cohesión del fango (valor de V para $\frac{V}{V_0} = 2$)

E = Expansión del lecho $\frac{V}{V_0}$

Coeficiente de cohesión de fangos.

normales y con reactivos habituales están en la zona 0,60 a 0,8; por lo tanto, las velocidades de sedimentación correspondientes serían de 3 a 4 m/h en la superficie neta de decantación, para los aparatos más perfeccionados, y de 1,8 a 2,4 m/h en los otros.

5.5. Filtración sobre arena.

5.5.1. Filtros rápidos.

Los flocúlos o precipitados químicos formados en el tratamiento son de dimensiones muy diversas. Tanto en el caso de decantadores simples como en el de decantadores-floculadores compactos, existe para cada velocidad de funcionamiento una cierta cantidad de partículas pequeñas que son arrastradas por el agua. Para evitar que estas partículas pasen a la distribución de agua, se utilizan normalmente filtros de arena, diseñados para caudales de 3 a 10 o más m³/m²/h.

Si se hace pasar agua a través de un lecho de arena, las partículas en suspensión son retenidas por el mismo, en estratos, tanto más profundos cuanto mayor es la velocidad de filtración y cuanto menores y menos adherentes son las partículas.

Conviene notar aquí que la parte activa del filtro es el lecho de arena (u otro material análogo, como antracita, por ejemplo); por lo tanto, dos filtros que tengan lechos de la misma arena y características de alimentación hidráulica semejantes, funcionarán de la misma manera en el aspecto de filtración, *cualquiera que sea el sistema de soporte y drenaje bajo la arena*. También es conveniente hacer notar que la acción filtrante activa se realiza normalmente en los tres o cuatro decímetros en la parte superior del lecho, constituyendo el resto una seguridad contra un incidente de marcha. Por eso, en un filtro de lecho estratificado de diversas granulometrías, es la capa superior la que determina su acción filtrante fundamental.

La velocidad de filtración influye poco sobre la calidad del agua, pero sí tiene una influencia grande sobre el tiempo que un filtro puede funcionar antes de atascarse totalmente, es decir, antes de alcanzar la pérdida de carga máxima para la cual ha sido diseñado. Las diferentes características de funcionamiento de un filtro están ligadas entre sí. Diferentes fórmulas se han propuesto para representar esa

relación: una de las más universalmente aceptadas es la fórmula de Bayliss, modificada por nosotros en función de nuestra experiencia, para tener en cuenta el volumen de fango del agua y la calidad de este fango:

$$T = A \cdot \frac{D^{3/2} \times \Delta P^{0,6} \div 0,8}{V^{1,1} \div 1,5} \cdot \frac{1}{v^{0,75} \cdot K^{0,7}} \quad (10)$$

T = tiempo en horas entre dos lavados.

A = constante (valor del orden de 2,3).

D = talla efectiva de la arena en mm.

ΔP = pérdida de carga producida por el atascamiento de la arena en el ciclo, en metros de columna de agua.

V = velocidad de filtración.

v = volumen de fangos, en tanto por ciento, en el agua a filtrar floculada.

K = coeficiente de cohesión de los fangos.

Los exponentes 0,6 y 1,5 de P y V corresponden al caso de un agua perfectamente coagulada y floculada, después de una buena decantación; los valores 0,8 y 1,1 corresponden al caso de un agua bruta con coagulación inmediatamente anterior a la filtración.

Con esta fórmula puede verse la influencia que en la marcha de un filtro tiene la velocidad de filtración V , la talla de la arena D y la cantidad y calidad de los fangos del agua. Para el caso normal de un agua bien decantada ($v = 0,001$ por 100, $K \simeq 0,7$), con talla $D = 1$ milímetro, con $V = 5$ m/h y para $\Delta P \simeq 1,2$ m, se obtiene $T \simeq 53$ horas.

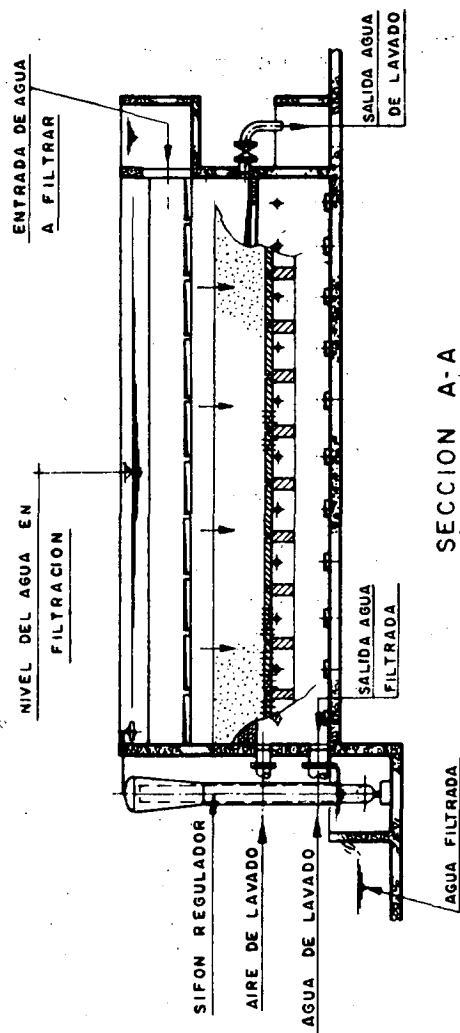
De esta misma fórmula puede verse la posibilidad de filtrar directamente el agua bruta a base, naturalmente, de aceptar ciclos de filtración más cortos. Para un agua bruta con un volumen de fangos tan bajo como 100 p.p.m. (0,01 por 100), el tiempo de filtración en las hipótesis del caso anterior bajaría a valores del orden de diez horas, y para un 1 por 100 de fangos, el tiempo entre dos lavados bajaría ya a una o dos horas, y el agua filtrada sería insuficiente para lavar el filtro.

Las velocidades de filtración recomendadas en la práctica van de 5 a 12 m³/m²/h en filtros abiertos, y llegan a 15 ó 18 m³/m²/h para filtros a presión.

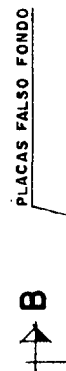
El punto fundamental para obtener un funcionamiento satisfactorio de un filtro es la realización de un buen lavado, que restituye al lecho filtrante su estado y cualidades primitivas. Y en este aspecto sí es fundamental el sistema

OCTUBRE 1972

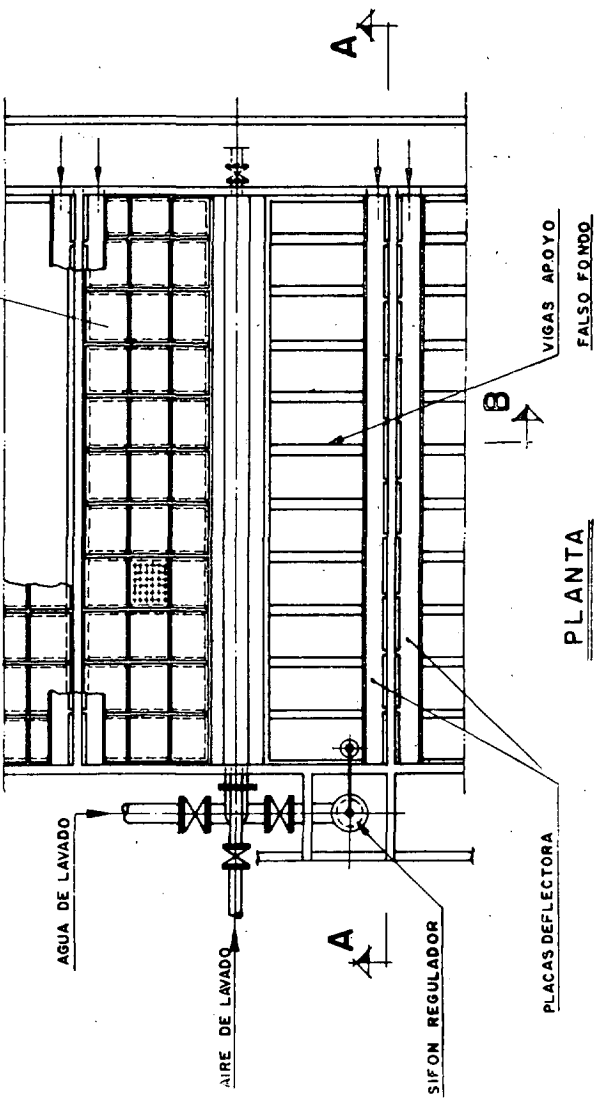
(CON SIFON REGULADOR)



SECCION A-A



SECCION B - B (EN LAVADO)



PLANTA

Dibujo esquemático. Detalles de dimensiones, formas o tipos de aparatos utilizados a fijar en especificación o ejecución.

de soporte y drenaje de la arena, que debe permitir una perfecta repartición de los fluidos de lavado a contracorriente, en toda la masa de arena, sin producir mezcla de estratos cuando el filtro no sea homogéneo. El lavado por retorno de agua sola es apto para el caso de que se filtre agua simplemente floculada y decantada: el caudal de lavado, para arena de talla no superior a 0,55 mm, ha de ser mayor que $35 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{h}$. En el caso de que se filtre agua descarbonatada o desendurecida, es absolutamente recomendable el uso de lavado por retorno de agua y aire, con un caudal de $55 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{h}$ de aire y de 14 a $20 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{h}$ para el agua (en este caso pueden usarse tallas de arena de 0,9 a 1,5 ó 2 mm sin riesgo).

5.5.2. Filtros lentos.

Cuando las aguas de superficie están poco cargadas en materia de suspensión o turbiedad (menos de 50 a 100 mg/litro), se puede obtener su depuración por filtración lenta, a través de arena, sin coagulación ni decantación previa.

En los filtros lentos la eficiencia filtrante se localiza en los milímetros superiores del filtro, y se debe a una acción biológica. En efecto, a las bajas velocidades de filtración utilizadas se crea en la superficie de la arena una membrana viva, constituida por algas y microorganismos, que segregan diastasas que coagulan las materias coloidales del agua.

La filtración lenta se realiza, generalmente, en tres etapas:

- Desbaste, a una velocidad de 20 a $30 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{día}$.
- Prefiltración, a velocidad de 10 a $20 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{día}$.
- Filtración propiamente dicha, a velocidad de 5 a $10 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{día}$.

Las dos primeras etapas pueden suprimirse en el caso de que el agua bruta tenga turbiedades y contenidos en materia en suspensión bajos (inferiores a unos 25 mg/l).

El lavado de estos filtros exige remover la arena a aparatos lavadores separados; además, después de un lavado, el filtro lento no recupera su eficacia filtrante hasta que se constituye de nuevo la membrana biológica, lo que puede requerir varios días. Esta dificultad del

lavado, combinada con el hecho evidente de que estos filtros requieren superficies veinticuatro veces superiores a las de los filtros rápidos, ha hecho que su uso sea muy poco frecuente en la actualidad.

5.6. Filtración sobre carbón activo.

El carbón activo en grano de calidad adecuada retiene, como indicamos en el cuadro 5.1, fenoles, materia orgánica, aceites, detergentes, etcétera, con mayor o menor eficacia, según el tipo de carbón elegido y la naturaleza y concentración de las sustancias a retener.

Desde el punto de vista funcional, estos filtros son análogos a los de arena en su funcionamiento. Deben recibir agua previamente filtrada, para que la eficiencia del carbón activo se aproveche al máximo; por ello, es mínimo el número de lavados que se hacen por simple retorno de agua a contracorriente, con velocidades del orden de 10 a $15 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{h}$.

5.7. Esterilización.

La esterilización es el proceso fundamental del tratamiento del agua para el consumo, y casi podríamos decir que el único esencial desde el punto de vista sanitario. Un agua sucia, turbia, coloreada, puede beberse sin daño si bacteriológicamente es inocua; un agua limpia, clara, sin impurezas físicas o químicas, es inadmisable para el consumo si transporta gérmenes patógenos.

Todo proceso que mejora la calidad del agua tiene una acción esterilizante, puesto que produce una eliminación o retención, en mayor o menor grado, de los gérmenes existentes en el agua. El Servicio Estadounidense de Salud Pública (U.S. Public Health Service) ha establecido una relación empírica entre la concentración de bacterias coliformes en el agua tratada, E , y la concentración en el agua bruta, R , de dichos microorganismos.

$$E = c R^n \quad (11)$$

E = concentración en coliformes en el agua tratada.

R = concentración en coliformes en el agua bruta.

c = constante de proporcionalidad (su inverso sería una medida de la eficiencia del tratamiento).

n = exponente que indica la forma en que las variaciones de la concentración en agua bruta afectan al agua tratada (un bajo valor de n significa una alta constancia de resultados).

Si hacemos $E = 1$ organismo en 100 cm^3 (norma de calidad tolerable en España), y llamamos R_0 al valor de R del agua bruta, que

permite obtener dicho valor de $E = 1$, el Servicio Estadounidense mencionado da los siguientes valores:

TABLA 5.7. — Carga R_0 admisible de coliformes en agua bruta, para obtener una calidad satisfactoria de agua tratada.

Proceso de tratamiento	Agua bruta turbia, de río			Agua bruta, clara, de lago		
	$C \times 10^3$	n	R_0	$C \times 10^3$	n	R_0
1. Cloración	15	0,96	80	50	0,76	50
2. Floculación, decantación y filtración rápida sobre arena.	70	0,60	80	87	0,60	60
3. Procesos (2) + cloración final	11	0,52	6000	40	0,38	4500
4. Procesos (2) + precloración + cloración final	—	—	20000	—	—	—
5. Filtros lentos de arena (carga $\simeq 5$ a $10 \text{ m}^3/\text{día m}^2$	—	—	—	—	—	50

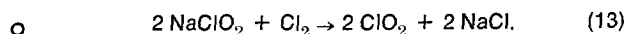
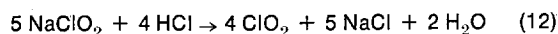
Es interesante observar que la limpidez del agua bruta no aumenta, sino más bien disminuye la eficacia esterilizante de los diversos procesos.

Los principales métodos de esterilización para abastecimientos de aguas son: adición de cloro y sus derivados y adición de ozono.

5.7.1. Esterilización con cloro y sus derivados.

La dosis de cloro ha de ser tal que, después de dos horas de contacto, aparezcan todavía trazas de cloro libre en el agua. Normalmente, se usan dosis tales que, en los puntos de utilización del agua, se obtengan 0,05 a 0,1 p.p.m. de cloro residual.

En lugar de cloro se utiliza a veces dióxido de cloro (ClO_2), preparado según las reacciones:



El dióxido de cloro tiene la ventaja de no comunicar sabor al agua.

En pequeños abastecimientos se usa como esterilizante hipoclorito sódico (que también cede cloro al agua) por la facilidad de su manipulación.

Cuando se desea que la acción del cloro sea más duradera, se utiliza amoníaco con el cloro, a fin de formar cloraminas, más estables en el agua, aunque menos activas como esterilizantes. Por ello, en este caso, han de utilizarse cantidades mayores de cloro, de 1,8 a 2 p.p.m., en la dosificación aplicada al agua bruta (en el caso de usar cloro sólo, bastaría con dosis de 0,5 a 0,8 p.p.m.). El uso de amoníaco más cloro previene también la formación de clorofenoles, que dan mal sabor al agua.

Es interesante citar que no existe un acuerdo general en cuanto a la acción del cloro sobre los virus, que parecen más resistentes que los colibacilos. El virus de la hepatitis infecciosa se destruye, según parece, por acción de 0,4 mg/l de Cl_2 durante treinta minutos. El virus de la poliomielitis necesitaría quizá dosis menores (pero no se ha establecido aún la transmisión de esta enfermedad por vía hídrica).

5.7.2. Esterilización con ozono.

El ozono es una condensación, O_3 , del oxígeno, que se obtiene por descargas eléctricas ionizantes en el seno del aire, mediante aparatos especiales llamados ozonizadores.

Para esterilizar el agua se precisan 0,5 a

1 g de ozono por metro cúbico de agua. El agua debe estar en contacto con un exceso de ozono, durante cinco minutos a 20° C o durante diez minutos a temperaturas inferiores, en cámaras de contacto.

La preparación del ozono es compleja; pero su uso se extiende, ya que se cree más intensa su acción bactericida y su acción destructora sobre los virus, sobre pesticidas, etc.

El exceso de ozono ha de destruirse antes de enviar el agua al consumo, para evitar un ligero sabor a ajo que produce dicha sustancia. Por ello, para garantizar la esterilidad del agua en la red, se hace preciso añadir al agua, a la salida de la depuración, una dosis de cloro que mantenga trazas de este bactericida en los puntos de consumo.

5.8. Procesos de desalinización.

5.8.1. Intercambio iónico.

Todas las sustancias que se hallan en el agua en forma iónica pueden ser eliminadas de la misma por filtración a través de resina intercambiadora de iones.

Estas resinas, al contacto con el agua, retienen los iones indeseados y ceden al agua, en cambio, otros no perjudiciales.

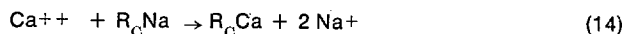
Las resinas tienen una capacidad de retención limitada, y cuando se agota esta capacidad pueden ser regeneradas por tratamiento con una solución concentrada del ion que dichas resinas ceden al agua durante el ciclo de tratamiento.

Se retienen por este procedimiento los iones Ca^{++} y Mg^{++} , que pueden ser intercambiados por Na; todos los iones positivos (Ca^{++} , Mg^{++} , Na^+ , K^+ , Fe^{++} , etc.), que pueden ser intercambiados por H^+ , y los iones negativos de ácidos fuertes (Cl^- , NO_3^- , SO_4^{--} , etc.), que son intercambiados por ion OH^- .

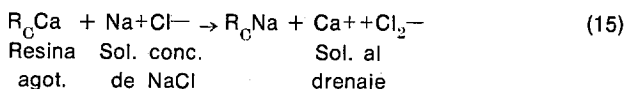
En el tratamiento del agua para el consumo este proceso se utiliza solamente para reducir la dureza del agua o para reducir su salinidad total. Las reacciones correspondientes, denominando R_C y R_A a las matrices de las resinas intercambiadoras de cationes y aniones, respectivamente, serían:

Desendurecimiento:

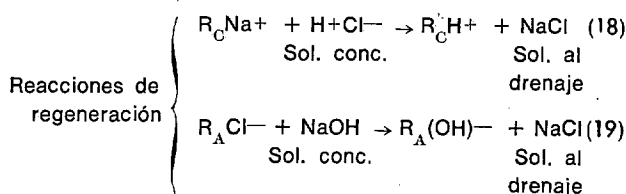
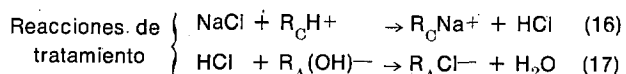
Reacción del tratamiento:



Regeneración de resina agotada:



Desmineralización total:



La eliminación de 1 grado francés de dureza ($\frac{1}{5000}$ equiv./litro) requiere, aproximadamente, unos 28 gramos de sal regenerante por metro cúbico de agua tratada. La eliminación de 1 grado francés de salinidad

$$\left(\frac{1}{5.000} \frac{\text{equiv. catión}}{\text{litro}} + \frac{1}{5.000} \frac{\text{equiv. anión}}{\text{litro}} \right)$$

requiere cantidades de reactivos muy diferentes, según la naturaleza y concentración de las sales; como orden de magnitud podemos decir que, por metro cúbico de agua tratada, se requieren unos 35 gramos de clorhídrico comercial (30 por 100), o unos 43 gramos de sulfúrico concentrado (98 por 100) y unos 11 gramos de sosa cáustica sólida (100 por 100 NaOH).

A los precios de 1,50 ptas./Kg de sal, 2 pesetas/Kg de clorhídrico, 1,75 ptas./Kg de sulfúrico y 4,50 ptas./Kg de sosa cáustica, resultan unos costos de unos 4,2 céntimos por metro cúbico de agua y por cada grado de dureza a eliminar, y de unos 12 céntimos por metro cúbico de agua y por cada grado de salinidad total a eliminar. (El costo normal de reactivos de coagulación-esterilización en un tratamiento convencional es del orden de 10 céntimos por metro cúbico.)

5.8.2. Destilación.

A partir de valores de la salinidad del agua del orden de unos 3 gramos de sales por litro (240 grados franceses de salinidad), es claramente más económico separar el agua de las sales (destilación, electrodiálisis, ósmosis inversa) que separar las sales del agua (intercambio iónico). En el caso de agua de mar (30 g de sal por litro), la destilación es el único procedimiento actualmente práctico para caudales que sobrepasen algunos cientos de metros cúbicos por día.

Es este un proceso específico muy diferente de los normales del tratamiento de agua. Por ello, nos limitamos a mencionarlo; y con objeto de establecer una base de comparación con los tratamientos habituales, diremos que los diversos procedimientos (expansión o "flash", destilación a múltiples efectos, compresión de vapor, etc), utilizados a escala industrial, exigen un gasto energético del orden de 50 a 70 Kcal (58 a 81 kWh) por metro cúbico de agua dulce producida; este consumo cuenta aproximadamente por un 26 por 100 del precio del agua así producida, constituyendo otro 35 por 100 la amortización de la inversión, 25 por 100 la mano de obra y el 14 por 100 restante los gastos de mantenimiento.

Habitualmente, el precio actual del agua pro-

ducida por destilación se sitúa entre 20 y 40 pesetas/m³, con una tendencia clara a descender a medida que avanza la técnica y la dimensión de las instalaciones.

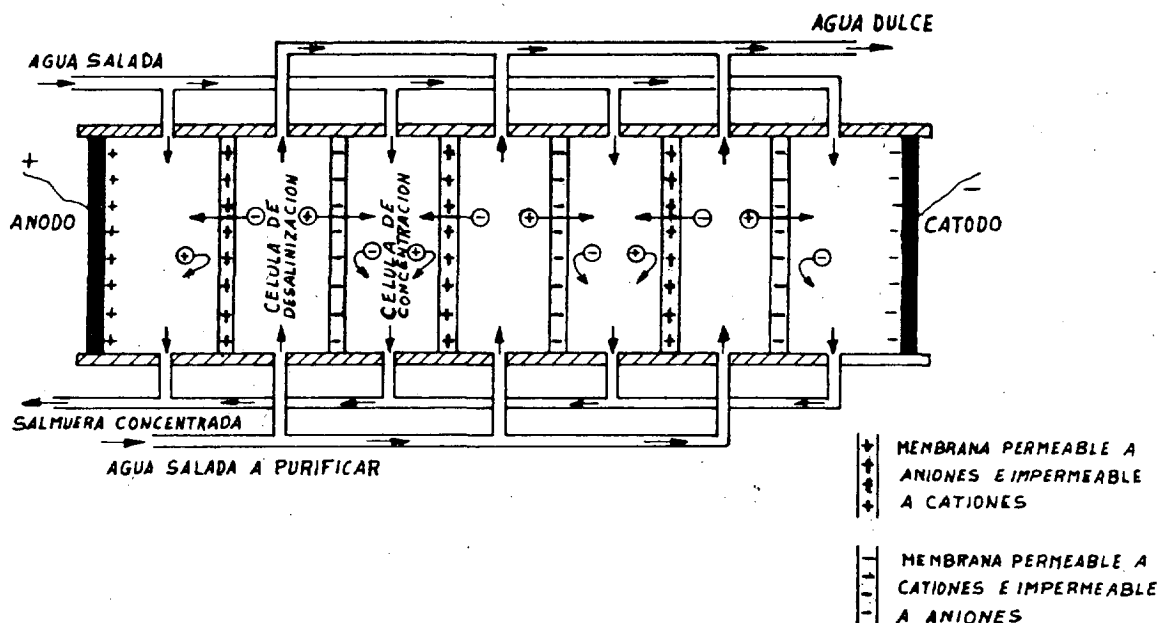
5.8.3. Electrodiálisis. Ósmosis inversa.

Estos dos procedimientos se basan en la existencia de membranas que presentan permeabilidad selectiva. Ambos exigen agua perfectamente clara y no incrustante.

El campo de aplicación de estos procedimientos corresponde a las aguas salobres, con salinidad de 2 a 5 g por litro, para la electrodiálisis; la ósmosis inversa se utiliza también en la desalinización de agua de mar.

5.8.3.1. Electrodiálisis.

Como es conocido, si en el seno de una disolución de sales se introducen dos electrodos y se hace circular una corriente eléctrica, los iones positivos de la sal se dirigen hacia el cátodo y los negativos al ánodo. Si entre los electrodos se coloca una serie de pares de membranas, unas negativas, permeables sólo a los cationes, y otras positivas, permeables sólo a los aniones, se puede purificar el agua, según se ve en el esquema de la figura.



Esquema de aparato de electrodiálisis.

Estos aparatos se han difundido poco porque exigen un mantenimiento cuidadoso. El consumo de energía puede estimarse en 1 a 1,5 kWh por kilogramo de sales eliminadas, y la reposición de membranas en 0,60 a 1,20 pesetas por kilogramo de sales eliminadas. Para una salinidad de 5 g/litro tendríamos 5 a 7,5 kWh de energía y 3 a 6 pesetas de membranas por metro cúbico de agua producido.

5.8.3.2. Ósmosis inversa.

Cuando en dos compartimientos contiguos de un recipiente, separados por una membrana de acetato de celulosa, ponemos agua destilada en uno y agua con sales disueltas en el otro, se observa que pasa agua destilada al compartimiento de agua salada, hasta que se establece entre ambos una diferencia de presión, que es la presión osmótica. Si al compartimiento que contiene el agua salina se le aplica una presión mayor que la osmótica, el agua pasa desde la solución al compartimiento con agua destilada, quedando las sales disueltas detenidas por la membrana semipermeable. Este fenómeno recibe el nombre de ósmosis inversa y permite obtener agua dulce a partir de un agua más o menos salada.

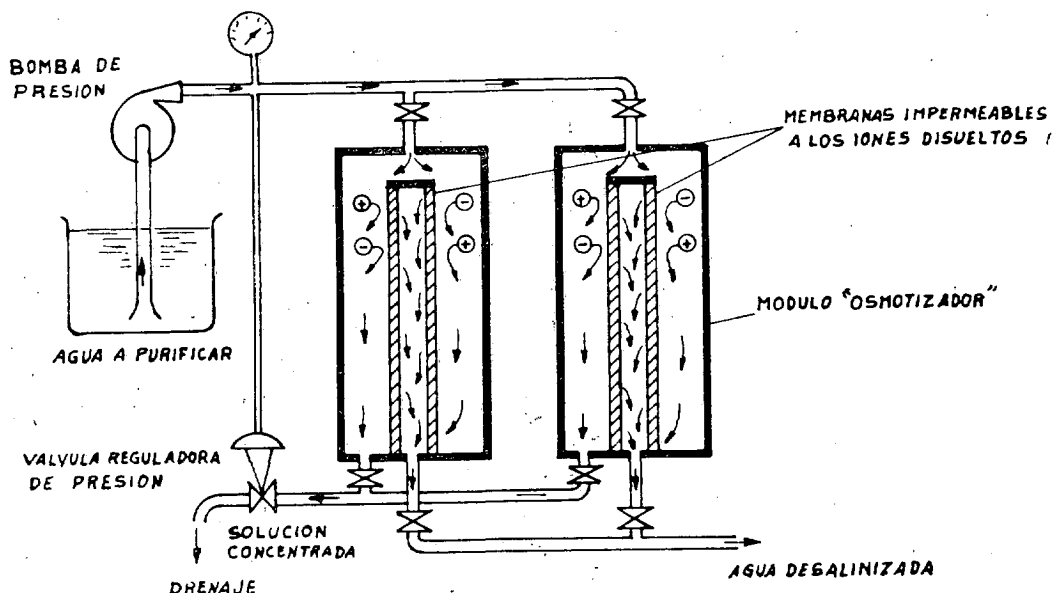
En este procedimiento, la única energía consumida es la del bombeo necesario para obte-

ner una presión superior a la osmótica; el procedimiento es muy simple y tiene, entre otras, la ventaja de que no produce ningún cambio térmico en el agua ni requiere otro control que el de la presión. Esta es función de la salinidad del agua a tratar. Para el agua de mar, la presión osmótica es de 26 Kg/cm² y la presión precisa para obtener la ósmosis inversa de forma continua es del orden de 40 Kg/cm². El consumo de energía es de unos 4 a 7 kWh/m³ de agua dulce (a partir de agua de mar). La reposición de membranas no se conoce aún con seguridad suficiente; de acuerdo con las experiencias conocidas, puede estimarse que la vida útil de los módulos filtrantes es superior a un año, en cuyo caso el costo de reposición de membranas (con una clara tendencia a la disminución en el momento actual) sería de unas 4 a 6 ptas./m³ de agua dulce producida.

Por el momento, las unidades construidas en Europa tratan caudales de 10 a 50 m³/día de agua útil; aunque no se espera que sea difícil aumentar la capacidad, que es mayor, para la misma unidad, cuando disminuye la salinidad.

6. Reutilización del agua.

Los cada día más difíciles problemas que plantea el suministro de agua a las poblaciones, y la gran diferencia entre la cantidad de agua necesariamente potable y la cantidad to-



Esquema de purificador de agua por ósmosis inversa.

REUTILIZACION DEL AGUA RESIDUAL DE POBLACION

DBO₅ = Demanda bioquímica de O₂.

S_T = Salinidad total.

MS = Sólidos en suspensión.

S_D = Salinidad del agua distribuida al consumo. Unidades: mg/litro.

	Características deseables en el agua					Depuración a aplicar al agua bruta residual para obtener las características deseables
	DBO ₅	MS	N organ. + NH ₃	P	ST	
1.1. Agua residual sin tratamiento	300	360	28	6	S _D + 180	(1) Sin tratamiento.
1.2. Agua residual después de un tratamiento biológico normal	20 ÷ 30	30	18	4	S _D + 180	(2) Desbaste decantación primaria, oxidación biológica por fangos activados, decantación secundaria.
1.3. Agua para lavado de calles y mercados	30	30	$\frac{Na}{\Sigma \text{ cat.}} \leq 0,3 \div 0,6$			(3) Tratamiento (2) + microtamizado y/o cloración.
1.4.1. Regadío jardines, césped, plantas ornamentales	30	30				
1.4.2. Regadío agrícola normal	160	160	—	—	—	(4.1) Desbaste + decantación primaria.
1.4.3. Regadío por aspersión	30	30				(4.2) Tratamiento (2) + cloración.
1.5. Usos industriales						(5.1) Tratamiento (2) + microtamizado y cloración, o tratamiento (2) + cloración + filt. arena.
1.5.1. Refrigeración, eliminación de polvos, apagado de escorias	20 ÷ 30	30	—	—	—	
1.5.2. Agua de proceso	2 a 20	20	Varios	Varios	Varios	(5.2) Tratamiento (2) + procesos a estudiar en cada caso.
1.6. Consumo humano						(6) Tratamiento (2) + oxid.-decantación en lagunas + cloración.
1.6.1. Calidad agua antes del tratamiento previo al consumo	10	30	20	2	1.500	Trat. (2) + floc. - decantación - filtración arena + esterilización + filtro carbón activo.
1.6.2. Tratamiento completo para distribución al consumo						

tal de agua distribuida, hace pensar en la posibilidad de reutilizar el agua para reducir la aportación de agua fresca al mínimo compatible con las necesidades.

Son múltiples los caminos y los medios por los cuales se puede recuperar el agua para reutilizarla. A título de muestra de las posibilidades de este concepto, vamos a exponer algunas formas de recuperación o reutilización a escala municipal.

El agua distribuida al consumo se reparte, como hemos dicho anteriormente, según las siguientes proporciones aproximadas:

Consumo doméstico	35 %
Consumo comercial e industrial	30 %
Consumo público	10 %
Consumos no registrados y pérdidas	25 %

Se puede suponer que el drenaje general de la población recoge, en forma de agua residual, aproximadamente un 60 a 70 por 100 del agua enviada a la distribución. Esta agua residual, después de un tratamiento clásico por fangos activados, por ejemplo, quedaría normalmente con las siguientes características:

Demanda bioquímica de oxígeno (DBO ₅)	20 mg/l
Materia en suspensión	30 mg/l
Nitrógeno total	30 mg/l
Fósforo	18 mg/l
Salinidad: la del agua distribuida más 120 a 370 mg/l (8 a 23° F.).	

Este agua tratada puede esterilizarse con una adición de cloro que, a la vez, reduce su DBO₅, y su materia en suspensión puede re-

ducirse fácilmente por filtración sobre arena o microtamizado.

Los usos que pueden darse a este agua son múltiples. Así, en la industria, para refrigeración, eliminación de polvos, apagado de escorias, etc; en sedimentación, en lavado de calles, regadío de parques y jardines, etc.; en usos agrícolas, para regadío, etc.

Como se ve, el agua recuperada podría satisfacer la demanda de una gran parte del consumo comercial e industrial y del consumo público (40 por 100 del total). Esto permitiría verter al drenaje un 35 a 40 por 100 del caudal distribuido, manteniendo así la concentración del agua residual, en sustancias disueltas, dentro de límites razonables.

La recuperación de este agua obliga al establecimiento de doble red de distribución, una para el agua potable y otra para el agua recuperada. El balance económico es a estudiar en cada caso particular, pero es indudable el interés de esta posibilidad.

A título anecdótico diremos que ya existe algún caso en que la recuperación del agua residual tratada se realiza por adición, previo tratamiento complementario, de dicha agua a la

distribución de agua potable, en la proporción de un 30 por 100.

7. Conclusión.

Hemos intentado recoger en este trabajo la mayor parte de los problemas básicos que la calidad del agua presenta para su distribución al consumo humano. Hemos señalado los medios de tratamiento usados normalmente para resolver dichos problemas y hemos esbozado algunos datos prácticos para estimar las dimensiones que deben tener los aparatos utilizados en la depuración del agua.

Por otra parte, hemos mencionado la posibilidad de reutilización del agua, solución a la que habrá de llegarse en un plazo no muy lejano, en una u otra versión. Este es otro aspecto muy importante para el futuro, en que el tratamiento del agua estará básicamente implicado.

El tema tratado es muy amplio, y tememos haber quedado muy lejos de una síntesis completa. Pero si estas ideas sirven para que los lectores puedan abordar los problemas del agua, con una visión un poco más clara de las posibilidades y medios de tratamiento y reutilización, de su alcance y limitaciones, el balance de este trabajo sería ya muy favorable.