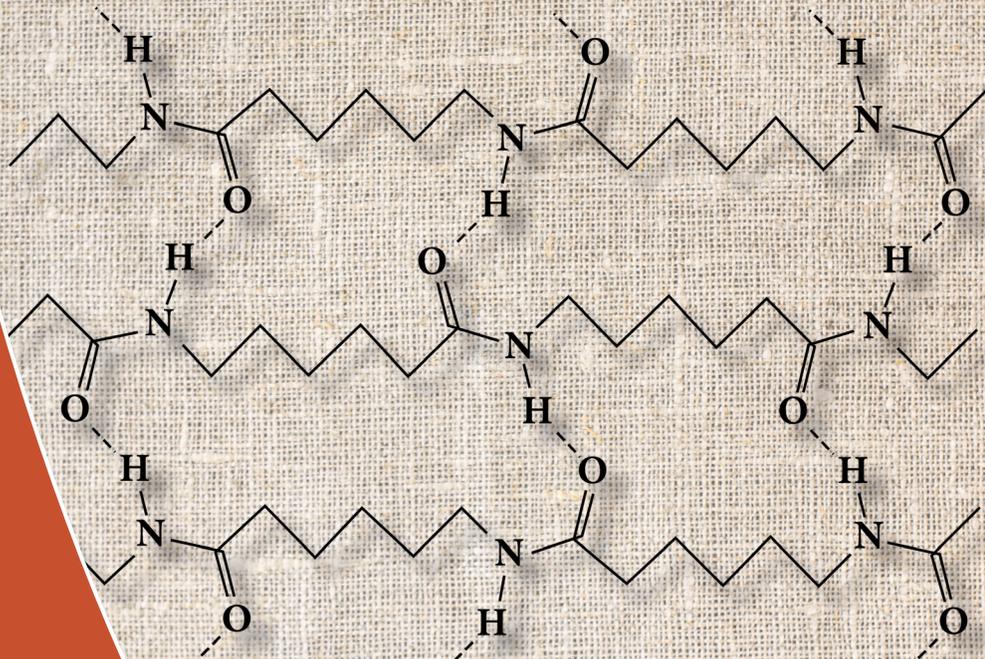


Química Textil.

Tomo I: materias textiles

Eduardo J. Gilabert



Eduardo J. Gilabert

Química Textil

Tomo I. Materias textiles

Colección *Académica*

Para referenciar esta publicación utilice la siguiente cita: Gilabert Pérez, E. J. (2020)
Química Textil Tomo I. Materias textiles. Valencia: Editorial Universitat Politècnica de València

© Eduardo J. Gilabert Pérez

© 2020, Editorial Universitat Politècnica de València

Venta: www.lalibreria.upv.es / Ref.: 0204_04_01_01

Imprime: Byprint Percom, S. L.

ISBN: 978-84-9048-897-3 (Tomo I)

ISBN: 978-84-9048-901-7 (Obra completa)

Impreso bajo demanda

Si el lector detecta algún error en el libro o bien quiere contactar con los autores, puede enviar un correo a edicion@editorial.upv.es

La Editorial UPV autoriza la reproducción, traducción y difusión parcial de la presente publicación con fines científicos, educativos y de investigación que no sean comerciales ni de lucro, siempre que se identifique y se reconozca debidamente a la Editorial UPV, la publicación y los autores. La autorización para reproducir, difundir o traducir el presente estudio, o compilar o crear obras derivadas del mismo en cualquier forma, con fines comerciales/lucrativos o sin ánimo de lucro, deberá solicitarse por escrito al correo edicion@editorial.upv.es

Impreso en España

PRÓLOGO A LA PRIMERA EDICIÓN

Las materias primas utilizadas en la industria textil tienen una extraordinaria importancia comercial e industrial, y su obtención y fabricación incluye muchos procedimientos químicos; además, la aparición de las fibras artificiales impulsó el estudio de la ciencia de los polímeros y desarrolló la química de los colorantes. A principios del siglo XX solo se conocían las fibras procedentes de los productos naturales (seda, lana, algodón, lino) y algunas fibras artificiales obtenidas a partir de materias naturales (viscosa y acetato); posteriormente, se desarrollaron las fibras de polímeros sintéticos derivados de diferentes clases químicas. Los tratamientos y acabados de los productos textiles también han ido cambiando a lo largo del siglo pasado; hay acabados del algodón tratado con resinas, los colorantes pertenecen a muchas familias químicas y algunos se combinan químicamente con las fibras. De modo general, las velocidades de producción han ido aumentando debido a la expansión y desarrollo de los procesos continuos.

Aquello que podría describirse como un arte a principio del siglo XX, ahora ha cambiado tanto que se necesita un mayor conocimiento de la química y de la física para poder entender la naturaleza de los diferentes polímeros y de los productos auxiliares y colorantes que se aplican conjuntamente. Es a través de la química textil como se puede adquirir el conocimiento científico necesario para poder comprender los procesos industriales textiles; así pues, esta asignatura introduce al alumno de ingeniería en el estudio de una de las ramas más importantes de la química orgánica y que más desarrollo ha tenido y sigue teniendo, la química de las fibras textiles. El programa incluye tanto las fibras naturales como las fibras químicas y, aunque en todas ellas se imparte la estructura y propiedades químicas, la obtención se limita únicamente a las fibras químicas, ya que las fibras naturales sufren procedimientos fundamentalmente físicos y su estudio es objeto de otra asignatura de la especialidad textil, la *Física de las Materias Textiles*.

Hay que considerar a las fibras textiles como un producto en cuyo estudio químico deben considerarse, en primer lugar, los polímeros, así que se comienza por la química macromolecular, ya que muchas propiedades de las fibras son una manifestación de su carácter polimérico. Y nada mejor para explicar y comprender los polímeros que empezar con el estudio de los monómeros. Por otra parte, además de las fibras y los colorantes se utilizan otros productos auxiliares textiles de naturaleza muy diversa; de todos ellos se incluyen aquellos cuya estructura sea macromolecular o polimérica, por ejemplo, el almidón. Al fin y al cabo, estos

productos junto con las fibras reciben el nombre de materias textiles. También se incluyen dos temas dedicados al agua en la industria textil, en el primero se introducen los principales conceptos relativos al agua de suministro industrial, tanto para proceso como de alimentación a calderas, con sus tratamientos, y el segundo estudia los vertidos y aguas residuales textiles, su composición, métodos de evaluación de la contaminación y los tratamientos de la depuración.

Alcoy, marzo 2001

ÍNDICE

PRÓLOGO	I
ÍNDICE	III
BIBLIOGRAFÍA	IX

TEMA 1. AGUAS DE SUMINISTRO

1. Introducción	3
2. Tipos de aguas	3
3. Impurezas del agua	5
3.1. Dureza	5
3.2. Alcalinidad	7
3.3. Acidez	8
3.4. Materias disueltas	8
4. Tratamientos del agua de proceso	9
4.1. Eliminación de la materia en suspensión	9
4.2. Eliminación de la dureza	13
5. Tratamientos del agua de calderas	14
5.1. Ablandamiento	17
5.2. Desionización	18
6. Agentes secuestrantes	18
6.1. Polifosfatos	19
6.2. Ácido EDTA	21

TEMA 2. AGUAS RESIDUALES

1. Introducción	27
1.1. Consumos de agua	28
1.2. Fuentes de contaminación	29
2. Medida de la contaminación	31
2.1. Materia orgánica	31
2.2. Materias en suspensión	33

2.3. Color	35
2.4. Toxicidad	36
3. Tratamientos internos	38
4. Tratamientos externos	40
4.1. Tratamiento fisicoquímico	40
4.2. Tratamiento biológico	41
4.3. Tratamiento terciario	43
5. Legislación sobre aguas	44

TEMA 3. CERAS, GRASAS Y ACEITES

1. Introducción	53
2. Ácidos	54
3. Alcoholes	58
4. Glicéridos	60
5. Ceras	62
6. Caracterización de los lípidos	64
7. Jabones y detergentes	65

TEMA 4. GLÚCIDOS

1. Introducción	71
2. Osas o monosacáridos	72
3. Glucosa	77
4. Glucósidos	82
5. Disacáridos	83
6. Estereoisomería.....	85
6.1. Isomería geométrica	86
6.2. Isomería óptica	87

TEMA 5. AMINOÁCIDOS Y PÉPTIDOS

1. Aminoácidos	93
2. Péptidos	102
2.1. Determinación de la secuencia	103

TEMA 6. INTRODUCCIÓN A LOS POLÍMEROS

1. Introducción histórica	107
2. Concepto de polímero	110
3. Clasificación de los polímeros	112
3.1. Polímeros de adición	112
3.2. Polímeros de condensación	114
4. Copolimerización	118
5. Aplicación de los polímeros	120
6. Determinación del peso molecular	122
6.1. Análisis de grupos finales	122
6.2. Medida de la viscosidad	123

TEMA 7. FIBRAS QUÍMICAS

1. Introducción histórica	129
2. Clasificación de las fibras químicas	131
3. Obtención de las fibras químicas	135
4. Hilatura en húmedo	137
5. Hilatura en seco	140
6. Hilatura por fusión	144
7. Aditivos	146
8. Tratamientos posteriores	147
9. Perspectiva de las fibras químicas	148

TEMA 8: POLÍMEROS DE ADICIÓN

1. Introducción	153
2. Mecanismos de obtención	154
3. Polimerización radical	157
4. Polimerización iónica	159
4.1. Polimerización catiónica	161
4.2. Polimerización aniónica	162
5. Técnicas de polimerización	163
6. Fibra polietileno	165
7. Fibra polipropileno	168
8. Fluorofibra	169
9. Clorofibra	170
10. Fibra vinilo	174
11. Fibra acrílica	176
11.1. Fibra modacrílica	182
11.2. Fibra carbono	183

TEMA 9. POLÍMEROS DE CONDENSACIÓN

1. Introducción	189
2. Polímeros formadores de fibra	190
3. Fibra poliamida o nailon	192
3.1. Poliamida 6.6	194
3.2. Poliamida 6	197
3.3. Otras poliamidas	201
4. Fibra aramida	203
5. Fibra poliimida	206
6. Fibra poliéster	208
6.1. Politereftalato de etileno	209
6.2. Otros poliésteres	212
6.3. Fibra polilactida	213

7. Fibra policarbamida	216
8. Fibra poliuretano	216
8.1. Poliuretanos segmentados: fibra elastano	218
9. Fibra de vidrio	228

TEMA 10. CELULOSA Y DERIVADOS

1. Introducción	235
2. Obtención.....	235
3. Constitución química	236
4. Acción de los ácidos	239
5. Acción de las bases	241
6. Acción de los oxidantes	242
6.1. Oxixelulosas tipo peryodato	244
6.2. Oxixelulosas tipo dióxido de nitrógeno	246
7. Ésteres de celulosa	247
7.1. Nitrato de celulosa	247
7.2. Xantato de celulosa.....	250
7.3. Acetatos de celulosa	250
8. Éteres de celulosa	251
9. Fibras vegetales	253
9.1. Fibra algodón	254
9.2. Fibras del tallo	256

TEMA 11. ALMIDÓN Y DERIVADOS

1. Almidón	261
2. Almidones modificados	266
3. Derivados del almidón	268
4. Gomas y mucílagos vegetales	268

TEMA 12. PROTEÍNAS

1. Introducción	275
2. Clasificación y propiedades	276
3. Estructura	278
4. Queratina	282
5. Fibroína.....	290
6. Fibras animales	292
6.1. Fibra lana	293

TEMA 13. CAUCHOS

1. Caucho natural	297
2. Cauchos sintéticos	299
2.1. Caucho metílico	300
2.2. Polibutadieno y copolímeros	300
2.3. Policloropreno	301
2.4. Poliisopreno	302
2.5. Poliisobutileno	302
2.6. Cauchos butílicos	303
3. Fibra elastodieno	303

TEMA 14. FIBRAS QUÍMICAS DE POLÍMERO NATURAL

1. Introducción	307
2. Fibra cupro	307
3. Fibra viscosa	308
4. Fibra modal	312
5. Fibra lyocell	313
6. Fibra triacetato	316
7. Fibra acetato	317
8. Fibra alginato	318
9. Fibra proteínica	319

BIBLIOGRAFÍA

- Blanxart, D.; *Materias Textiles*. 2a edición. Ortega. Barcelona (1942)
- Fourné, F.; *Synthetic fibers*. Hanser Pub. Munich (1999)
- Gacén, J.; *Fibras químicas*. UPC (1990)
- Gacén, J.; *Fibras textiles. Propiedades y descripción*. UPC (1991)
- Gacén, J.; *Nuevos desarrollos en fibras químicas*. UPC (2000)
- Gordon Cook, J.; *Handbook of textile fibres*. Merrow (1984)
- Hill, R. (Ed.); *Tecnología de las fibras artificiales derivadas de polímeros sintéticos*. Aguilar. Madrid (1958)
- Hongu, T. and G.O. Phillips; *New fibers*. Woodhead. Cambridge (1997)
- Lewin, M. y E.M. Pearce; *Fiber chemistry*. Handbook of fiber science and technology. Volume IV. Marcel Dekker Inc. New York (1985)
- Lewin, M. y J. Preston; *High technology fiber*. Handbook of fiber science and technology. Volume III. Marcel Dekker Inc. New York (1985)
- Peters, R. H.; *The chemistry of fibres*. Textile chemistry. Volumen I. Elsevier Publishing Co. Amsterdam (1963)
- Peters, R. H.; *Impurities in fibres; purification of fibres*. Textile chemistry. Volumen II. Elsevier Publishing Co. Amsterdam (1967)

TEMA 1

AGUAS DE SUMINISTRO

1. INTRODUCCIÓN

El agua es un recurso natural escaso, indispensable para la vida y para el ejercicio de la inmensa mayoría de las actividades económicas; es irremplazable, no ampliable por la mera voluntad del hombre, irregular en su forma de presentarse en el tiempo y en el espacio, fácilmente vulnerable y susceptible de usos sucesivos. Asimismo, constituye un recurso unitario, que se renueva a través del ciclo hidrológico y que conserva, a efectos prácticos, una magnitud casi constante dentro de cada una de las cuencas hidrográficas.

Consideradas, pues, como recurso, no cabe distinguir entre aguas superficiales y subterráneas. Unas y otras se encuentran íntimamente relacionadas, presentan una identidad de naturaleza y función y, en su conjunto, deben estar subordinadas al interés general, que forma parte del dominio público estatal como dominio público hidráulico. Se trata de un recurso que debe estar disponible no sólo en la cantidad necesaria sino también con la calidad precisa; esta disponibilidad debe lograrse sin degradar el medio ambiente en general y el recurso en particular, minimizando los costes socioeconómicos y con una equitativa asignación de las cargas generadas por el proceso, lo que exige una previa planificación hidrológica y la existencia de unas instituciones adecuadas para la eficaz administración de este recurso.

El agua es de vital importancia en la industria del ennoblecimiento textil, siendo el vehículo principal para la aplicación de los procesos químico textiles; es un agente universal de limpieza y por ella misma es suficiente para muchas operaciones textiles de lavado; además, es elemento indispensable para la generación de vapor, fuente de energía fundamental para la transmisión de calor (calentamiento, secado). La ubicación de esta industria en el pasado, estuvo condicionada por la existencia de agua en cantidad y calidad suficiente para poder efectuar adecuadamente los procesos textiles. Hoy, sin desechar por completo esa condición, se ubican las industrias más por la existencia de agua en cantidad suficiente que por su calidad, ya que los sistemas de tratamiento permiten alcanzar la calidad necesaria.

2. TIPOS DE AGUAS

Atendiendo a su origen el agua utilizada por la industria procede de la red municipal de abastecimiento, es subterránea (pozo) o superficial (pantano, río) y su composición es muy variada tanto en compuestos inorgánicos como orgánicos. Las aguas de pozo son claras y de composición bastante constante, contienen sales

cálcicas y magnésicas así como sales de hierro, poco oxígeno disuelto y a veces materia orgánica disuelta, dependiendo todo ello del terreno que atraviesan. Las aguas superficiales son menos transparentes, con algo de color, baja concentración de sales, y su carácter mineral depende de las zonas por donde transcurren; en algunos casos también contienen contaminantes producidos por el vertido incontrolado de aguas industriales.

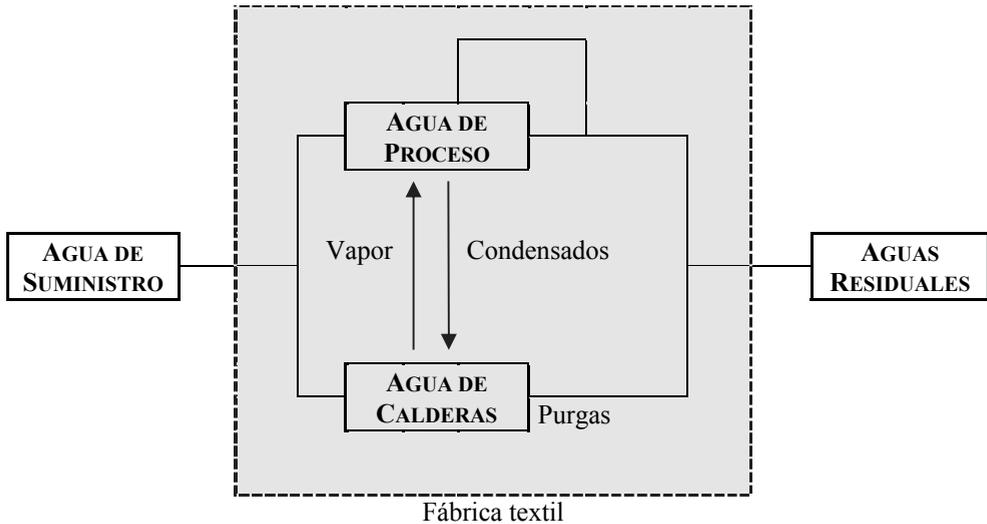


Figura 1.1. Clases de aguas

La figura 1.1 muestra los tipos diferentes de aguas que hay que distinguir en toda industria. Cualquiera que sea el tipo considerado, el funcionamiento de la caldera es muy simple: recibe agua de alimentación constituida por una parte variable de *condensado*, recuperado, y de agua de suministro nueva, normalmente tratada. El agua por efecto del calor aportado se transforma en vapor, que además contiene gotitas de agua (vapor húmedo), gases, y a presiones altas transporta sales como cloruros y sílice mediante un verdadero *arrastre* del vapor. El agua del interior de la caldera se va concentrando con todas las sustancias que contenía el agua que se ha vaporizado, excepción hecha de las que han sido arrastradas con el vapor. Por tanto, las impurezas van aumentando cada vez más en el interior de la caldera y obliga a las denominadas *purgas* periódicas como única solución para desconcentrar la salinidad del agua interior.

3. IMPUREZAS DEL AGUA

El agua tal como se encuentra en la naturaleza no es utilizable directamente para el consumo ni para la industria, debido a las sustancias que contiene. A su paso por el suelo, por los terrenos de filtración o incluso a través de la atmósfera, el agua se contamina y se carga de diversos compuestos.

De los dos tipos de aguas de suministro, el agua para calderas es la que presenta unas exigencias más altas en cuanto a la calidad del agua. Ya se ha visto que hay una relación directa entre la calidad del agua de alimentación y la calidad en el interior de la caldera. Las sustancias contenidas en el agua de la caldera influyen sobre las propiedades corrosivas del agua y sobre la formación de depósitos en la pared interna de la caldera. Esta concentración debe limitarse siempre, en tanto que la solubilidad de ciertas sales (sulfatos, fosfatos) disminuye cuando la temperatura aumenta, facilitándose así los depósitos en disoluciones sobresaturadas (1). Las principales impurezas del agua de suministro así como sus efectos, se han recogido en la tabla 1.1.

Tabla 1.1. Características del agua de suministro

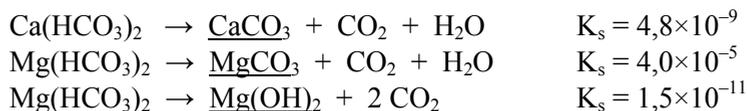
<i>Impureza</i>	<i>Efectos</i>
Anhidrido carbónico	Corrosión
Oxígeno	Corrosión
Materias en suspensión	Depósitos, espumas y arrastres en el vapor
Materia orgánica	Depósitos, espumas y arrastres en el vapor
Aceite	Depósitos, espumas y arrastres en el vapor
Acidez	Corrosión
Dureza	Incrustaciones
Alcalinidad	Espumas, arrastres en el vapor, fragilidad alcalina, desprendimiento de CO ₂
Salinidad	Depósitos, espumas y arrastres en el vapor
Sílice	Incrustaciones y depósitos sobre aparatos

3.1. Dureza

El término *dureza* es histórico y representa una cualidad negativa del agua, ya que un agua dura impide la formación de espuma con los jabones o cuece mal las legumbres. Industrialmente es muy indeseable, ya que da lugar a precipitados en el interior de las calderas, formando una capa aislante entre la pared y el agua. Las aguas muy duras no son adecuadas como aguas de proceso, ya que pueden producir compuestos insolubles que precipitan sobre las fibras de forma irregular, modificando adversamente su tacto y produciendo irregularidades durante la tintura

o estampación; por ello, deben ser eliminadas del agua, antes del uso de ésta en dichas operaciones.

La *dureza total* indica la concentración de sales cálcicas y magnésicas en el agua y se expresa en miligramos por litro de carbonato cálcico (mg/l de CaCO₃). En la definición no se dice nada de los aniones que forman parte de las sales cálcicas y magnésicas, aunque se deduce que han de ser todos solubles. Por tanto, dentro de los aniones que dan lugar a dureza en el agua no cabe el carbonato, utilizado sin embargo como unidad de dureza, ya que el carbonato cálcico es un compuesto insoluble, y da una solubilidad residual de 7 mg/l. Otro anión especial es el bicarbonato, cuyas sales cálcicas y magnésicas son solubles en el agua, pero que por acción del calor se transforma en carbonato insoluble, fenómeno éste muy conocido como la formación de estalactitas y estalagmitas y que en las tuberías, recipientes y calderas se deposita en las paredes. Si el medio contiene hidróxido entonces precipita el hidróxido magnésico, más insoluble que el carbonato de magnesio, y da una solubilidad residual de 16 mg/l.



Bien, pues la dureza debida a los bicarbonatos se conoce como *dureza temporal*, ya que se elimina por ebullición. La diferencia entre la dureza total y la temporal se conoce como *dureza permanente*. Además, la dureza total debida a la concentración de sales cálcicas se denomina *dureza cálcica*, y la debida a la de sales magnésicas se llama *dureza magnésica*. En las normas UNE se describen los procedimientos analíticos para determinar la dureza total y la dureza total cálcica de un agua, mediante volumetrías complexométricas (2,3).

La dureza se ha medido tradicionalmente en *grados hidrotimétricos*, concepto que procede de la capacidad del agua dura para precipitar jabón. El más conocido es el *grado francés* °hf, definido como la dureza equivalente a 1 mg de carbonato cálcico en 100 ml de disolución; la relación es bastante sencilla: 1 °hf = 10 mg/l. Otras medidas menos conocidas son el *grado alemán* que equivale a 1 mg de óxido cálcico CaO, en 100 ml, y el *grado inglés* equivalente a 1 grain (64,80 mg) de carbonato cálcico en 1 galón (4,546 litros).

3.2. Alcalinidad

Se define la *alcalinidad* como la capacidad cuantitativa de una agua para reaccionar con los iones hidrógeno, y se expresa en miligramos por litro de carbonato cálcico. Por tanto es una medida del contenido de bases; por ejemplo, el valor de la alcalinidad en el agua de la caldera representa la concentración de carbonatos, bicarbonatos, hidróxidos, silicatos y fosfatos, aunque en otros casos pueda incluir también las de amoníaco, boratos y otros aniones orgánicos. Los métodos analíticos determinan la alcalinidad suponiendo que los aniones responsables son los hidróxidos, los carbonatos y los bicarbonatos, de los que sólo es posible la mezcla de dos de ellos, dando lugar a cinco casos diferentes. El procedimiento normalizado valora una muestra de agua con una disolución patrón de ácido clorhídrico 0,02 N hasta un pH determinado, en función del indicador ácido/base utilizado (4). Así, pues, hay dos resultados:

- *Alcalinidad total*. Obtenida por medio de la valoración hasta el punto final del naranja metilo (pH=3,9), y determina la concentración suma de hidróxidos, carbonatos y bicarbonatos. Se representa por T.
- *Alcalinidad parcial*. Obtenida por valoración hasta el punto final de la fenolftaleína (pH=8,3) y mide la alcalinidad correspondiente a la totalidad de los hidróxidos y a la mitad del contenido de carbonato cálcico. Se representa por P.

Tabla 1.2. Alcalinidades de un agua

Resultado de las valoraciones	La muestra de agua contiene:		
	$[\text{HCO}_3^{\ominus}]$	$[\text{CO}_3^{2\ominus}]$	$[\text{OH}^{\ominus}]$
P = 0	T	-	-
2·P < T	T – 2·P	2·P	-
2·P = T	-	T	-
2·P > T	-	2·(T – P)	2·P – T
P = T	-	-	T

La tabla 1.2 muestra que la comparación entre los resultados de P y T permite averiguar el tipo de bases responsables de la alcalinidad del agua y, además, calcular las concentraciones de las especies químicas presentes. De acuerdo con estas definiciones, un agua dura puede ser alcalina sólo si no hay alcalinidad parcial (P = 0), es decir, la única base presente es el bicarbonato, y su concentración es igual a la alcalinidad total: $[\text{HCO}_3^{\ominus}] = T$. Como este anión es el único responsable de la dureza temporal del agua, esta sencilla determinación ácido/base permite calcular fácilmente la dureza temporal del agua.

3.3. Acidez

La *acidez* del agua representa su capacidad cuantitativa para reaccionar con una base fuerte a un pH determinado. Al igual que la alcalinidad, el valor medido puede variar significativamente con el pH del punto final, y también se expresa en miligramos por litro de carbonato cálcico. El *anhídrido carbónico* disuelto es generalmente el mayor componente ácido de las aguas de superficie, y la valoración hasta un pH de 8,3 corresponde a la neutralización estequiométrica de ácido carbónico a bicarbonato. Para mezclas complejas la selección del punto final puede ser subjetiva y se eligen los puntos finales correspondientes a la fenoltaleína y al rojo metilo para las determinaciones de acidez normalizada en aguas residuales y de suministro. El procedimiento normalizado valora una muestra de agua con una disolución patrón de hidróxido sódico 0,02 M hasta un pH determinado (5).

3.4. Materias disueltas

La *salinidad* del agua expresa la concentración total de sales disueltas en el agua, y su unidad es el miligramo por litro. Para su determinación se toma una muestra de agua y se pasa a través de un filtro normalizado de fibra de vidrio. El filtrado se pasa a una cápsula de evaporación previamente pesada y se evapora a sequedad en un baño de vapor. Posteriormente, se seca a 180 °C en una estufa, hasta conseguir un peso constante. El resultado, denominado *residuo filtrable*, se determina por diferencia y se expresa en mg/l (6).

Un método indirecto es la determinación de la *conductividad* eléctrica de la muestra de agua, que mide la propiedad del agua para conducir la corriente eléctrica entre dos electrodos sumergidos y representa la concentración en gases y sales ionizables. Su unidad es el microsiemens por centímetro $\mu\text{S}/\text{cm}$, que es la inversa de la resistencia, en megaohmios, medida entre caras de 1 cm^2 de sección, opuestas y distantes 1 cm entre sí, en una disolución de cloruro sódico de 0,4 mg/l a 25 °C de temperatura, exenta de anhídrido carbónico o amoníaco. En el caso de agua de la caldera, la conductividad eléctrica se determinará después de neutralizar la muestra con ácido gálico hasta pH 7. El valor $1\text{ mg/l} = 2,5\ \mu\text{S}/\text{cm}$ es orientativo acerca del contenido total de sales disueltas (7,8).

Las sales de *hierro* se presentan por corrosión de tuberías y maquinaria, siendo muy perjudiciales para los procesos textiles por varias razones: en el descrudado y blanqueo producen una coloración amarillenta de las materias, pueden actuar como agentes catalíticos en los procesos de blanqueo dando alteraciones severas en las propiedades de las fibras, y en la tintura producen precipitaciones de los colorantes y cambios de tono del color.

4. TRATAMIENTOS DEL AGUA DE PROCESO

La industria textil con procesos de blanqueo, tintorería y acabado necesita considerables cantidades de agua con un nivel de calidad requerida en sus diversas aplicaciones. Para depurar el agua es 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 coloidales, y después las disueltas. Por último deben corregirse ciertas características como el color. En cada etapa y dependiendo de los objetivos a alcanzar, pueden aplicarse diversos principios.

4.1. Eliminación de la materia en suspensión

La presencia en el agua de materias sólidas constituye, indudablemente, la parte más importante y aparente de la contaminación. Deben eliminarse para evitar un gran número de inconvenientes, de los cuales los más importantes son la obstrucción de tuberías y refrigerantes, y el desgaste de bombas y materiales de conducción. En el caso de aguas residuales deben cumplirse las exigencias mínimas de la reglamentación.

La separación de las materias sólidas del agua puede hacerse de acuerdo con dos principios diferentes:

- Por gravedad, por simple *decantación* en función del tamaño y densidad de las partículas, o por *flotación*, fijando en las partículas burbujas de aire introducidas en la suspensión. El primer proceso puede acelerarse artificialmente mediante la intervención de la fuerza centrífuga, por ejemplo con centrífugas o con hidrociclones.
- Por filtración o tamizado.

No obstante, la aplicación inmediata de estos principios tropieza con la dificultad debida a la gran variabilidad del tamaño de las partículas, incluso para un determinado tipo de vertido. A continuación se relacionan diversas materias de tamaños diferentes con el tiempo necesario para que estas partículas desciendan verticalmente la distancia de un metro de agua.

<i>Materia</i>	<i>Diámetro</i>	<i>Tiempo</i>
Grava	10 mm	1 segundos
Arena	1 mm	10 segundos
Arena fina	100 μm	2 minutos
Arcilla	10 μm	2 horas
Bacteria	1 μm	8 días
Coloidal	100 nm	2 años
Coloidal	10 nm	20 años

Así, un litro de agua de buena calidad puede contener varias decenas de millones de partículas del orden de un micrómetro, aunque en total pesen menos de 0,1 mg. Se deduce de estas cifras que la calidad del agua es una noción relativa y que, en función de las necesidades, debe precisarse cuál es el contenido residual que puede admitirse y, naturalmente, han de fijarse los métodos de medida relacionados con los dos criterios de calidad que normalmente se emplean: la concentración de materia en suspensión y la turbiedad del agua, que indica la presencia de partículas de tamaño pequeño e invisibles individualmente.

Las materias coloidales tienen tamaños intermedios entre las suspensiones y las disoluciones verdaderas, con diámetros comprendidos entre 1 y 100 nm. Suelen clasificarse en dos tipos:

- 1) Los *coloides hidrófobos* caracterizados por su poca afinidad por el agua, por su escasa viscosidad y porque, generalmente, son irreversibles; es decir, una vez que han pasado de coloide a sólido mediante la floculación y desecación, no pueden tomar fácilmente el estado coloidal (proceso que se conoce como *peptización*). A este grupo pertenecen las materias minerales.
- 2) Los *coloides hidrófilos* caracterizados por su gran viscosidad, su gran afinidad por el agua, lo que es causa de que formen masas gelatinosas (*geles*), y porque son reversibles y peptizan fácilmente. De este tipo son muchas sustancias orgánicas, como el almidón.

La tabla anterior manifiesta la escasa velocidad de decantación natural de las partículas coloidales, que constituyen una parte importante de la contaminación y son la causa principal de la turbidez. En cualquier tratamiento del agua turbia para separar una suspensión coloidal en condiciones satisfactorias de velocidad es necesario que las partículas se transformen en flóculos de mayor tamaño fáciles de eliminar. Tal coagulación no se produce de modo natural puesto que una característica importante de las disoluciones coloidales es la carga eléctrica que manifiestan, particularmente los coloides hidrófobos y a la cual deben su estabilidad. La gran superficie que presentan las partículas sólidas en virtud de su

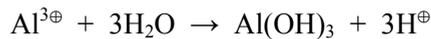
pequeño tamaño permite que se presenten fenómenos de adsorción de iones existentes en la superficie del coloide. Normalmente las partículas quedan cargadas con el mismo signo y la repulsión impide el agrupamiento en partículas de mayor tamaño y, en consecuencia, el coloide se estabiliza. Los coloides de tipo hidrófilo, como la materia orgánica, actúan como *protectores* de otros hidrófobos del mismo signo, proporcionándoles una gran resistencia a su floculación. En las aguas naturales los coloides se encuentran siempre con carga negativa; lo mismo sucede, con frecuencia, en las aguas residuales.

El tratamiento del agua para la eliminación de la materia en suspensión comporta dos acciones diferentes:

- Una *desestabilización* del coloide, mediante la adición de un electrolito con iones de signo adecuado que neutralice la carga del coloide.
- Una *aglomeración* de los coloides descargados, mediante agitación mecánica y la adición de productos químicos que conduce a un tamaño mayor.

En el tratamiento del agua se reserva el término *coagulación* para denominar el fenómeno de desestabilización, y el de *floculación* para la aglomeración de los coloides descargados. A los reactivos correspondientes se les llama, respectivamente, *coagulantes* y *floculantes*.

Los primeros coagulantes se emplearon a finales del siglo XIX. El poder de los electrólitos es mayor cuanto mayor es la carga del ion de signo contrario al del coloide. Así, con un coloide cargado negativamente será más eficaz el cloruro férrico o el aluminico que el cálcico o el sódico; y para descargar otro cargado positivamente será más efectivo un arseniato que un sulfato o un cloruro. Los coagulantes que se utilizan con más frecuencia son el sulfato de alumina y el cloruro férrico, y su acción es el resultado de la hidrólisis que sigue a su disolución.



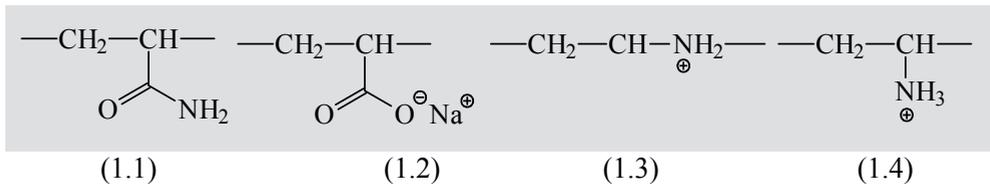
El pH desempeña un papel muy importante en el estudio de los fenómenos de coagulación y floculación; es así como una parte de la carga de las partículas coloidales que han adsorbido iones OH^{\ominus} queda destruida por un aumento de la concentración en iones H^{\oplus} , lo que disminuye la estabilidad de la suspensión coloidal. Paralelamente, es preferible que el pH quede dentro de la zona correspondiente al mínimo de solubilidad de los iones metálicos del coagulante utilizado. Para las sales de aluminio, el mínimo de su solubilidad en disolución permanece a un pH entre 6 y 7,4; fuera de este margen, y dependiendo de la mineralización del agua, aumenta la solubilidad de la sal de aluminio. Para las sales

de hierro, la zona de pH es mucho más amplia, y se alcanza el mínimo de solubilidad cuando el pH es superior a 5.

No obstante, debido a la hidrólisis que experimentan los coagulantes presentan el inconveniente de modificar las características fisicoquímicas del medio, como pH y conductividad. En dosis altas producen un exceso de fangos que, generalmente, constituyen un problema. Por otra parte, estos agentes no dan siempre un precipitado que posea las características deseadas para una buena separación; por estas razones se recomienda el empleo de floculantes. Los primeros agentes floculantes eran productos de origen natural, bien mineral como la sílice, o bien orgánico como el almidón y el alginato, y más tarde polímeros sintéticos denominados polielectrolitos.

La sílice activada está constituida por una disolución de ácido polisilícico $(H_2SiO_3)_4$ procedente de la polimerización controlada del ácido silícico. Es poco estable por lo que debe prepararse "in situ". Sin embargo, durante mucho tiempo se le ha considerado como el mejor floculante capaz de asociarse a las sales de aluminio, hasta el desarrollo de los polielectrolitos.

Los polielectrolitos son los únicos agentes floculantes utilizados hoy día en el tratamiento del agua. Comprenden polímeros sintéticos de alto peso molecular que pueden tener carga o no. Los polímeros no iónicos están formados por restos de acrilamida (1.1) que ejercen solo la función de adsorción. Los polímeros aniónicos incluyen restos de acrilamida y restos de grupos carboxílicos o sulfónicos, como (1.2). Finalmente, los polímeros catiónicos presentan carga positiva debida a la presencia de grupos amino o imino, y están formados por restos de etilenimina (1.3) y vinilamina (1.4).



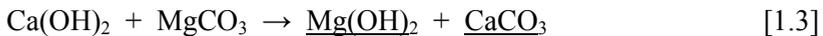
La coagulación y la floculación intervienen normalmente en el tratamiento de aguas destinadas al abastecimiento público y en las aguas de suministro industrial. Con estos procedimientos se consigue la eliminación de los coloides del agua.

4.2. Eliminación de la dureza

El tratamiento de precipitación es el más utilizado para reducir la dureza del agua de suministro, mientras que los procesos de intercambio se verán en el tratamiento del agua para calderas. El *tratamiento con cal* es muy barato y su misión es la de eliminar la dureza bicarbonatada o temporal de un agua. Esta descarbonatación con cal únicamente conduce, por tanto, a una eliminación parcial de los iones calcio y magnesio, puesto que no ejerce acción alguna sobre la dureza permanente. Las reacciones químicas de descarbonatación son las siguientes:



Teniendo en cuenta que el carbonato magnésico es relativamente soluble, un exceso de cal conduce a la reacción:



Si la cantidad de reactivo se ajusta exactamente al contenido de dureza temporal, la alcalinidad del agua se reduce a la solubilidad teórica del sistema $\text{CaCO}_3 + \text{Mg(OH)}_2$. Si el agua a tratar contiene bicarbonato sódico, además del valor indicado en el agua habrá una alcalinidad suplementaria en forma de hidróxido sódico.



La reacción de la cal sobre el agua a tratar puede ser extraordinariamente lenta en ausencia de núcleos de cristalización. Por el contrario, cuando el agua y la cal se ponen en contacto con una cantidad apreciable de carbonato cálcico precipitado, la reacción alcanza el punto de equilibrio en unos minutos; esto solo es válido si la superficie de los cristales de carbonato cálcico se encuentra limpia. La presencia de coloides orgánicos puede impedir la cristalización, y por ello se añaden normalmente agentes coagulantes con el fin de eliminar estos coloides. Por último, conviene resaltar el hecho que el carbonato cálcico tiene tendencia a formar agrupaciones de cristales muy duras y muy voluminosas que sedimentan a gran velocidad, mientras que el hidróxido magnésico, si se encuentra aislado, se presenta siempre en forma de flóculos muy ligeros. Si la proporción de hidróxido magnésico es pequeña, se ocluye dentro del precipitado cálcico, pero si su proporción es considerable, no pueden obtenerse precipitados densos y la velocidad de sedimentación es mucho menor.

La eliminación de la dureza permanente se puede llevar a cabo *con carbonato sódico*, como una segunda etapa después de tratar el agua con cal. La reacción es:



Finalmente, el *tratamiento con hidróxido sódico* para eliminar la dureza total del agua es una variante del proceso conjunto con cal y carbonato sódico. La reacción básica es:



La precipitación de la dureza temporal va unida a la formación de carbonato sódico, el cual reaccionará con la dureza permanente según la reacción [1.5]. En el caso de la dureza magnésica, tanto la temporal como permanente se eliminan en forma de hidróxido:



5. TRATAMIENTOS DEL AGUA DE CALDERAS

En la mayoría de los casos, el agua destinada a la alimentación de la caldera requiere algún tratamiento de purificación del agua. La tabla 1.3 muestra las características de un agua de alimentación de caldera.

A continuación se describen brevemente los efectos producidos por las impurezas en la caldera.

- a) *Corrosión*. El material normalmente utilizado en la fabricación de las calderas es el acero, el cual es atacado tanto por el oxígeno como por el agua y el vapor de agua. En condiciones apropiadas, este ataque puede formar sobre el metal una capa protectora adherida de magnetita, que impide cualquier otro ataque posterior tanto del agua como del vapor, siendo un inhibidor de la corrosión. Las materias orgánicas pueden contener una multitud de sustancias incontrolables, tanto por su composición como por su comportamiento en las condiciones de funcionamiento de la caldera. Así, pueden descomponerse en sustancias ácidas que reducen la alcalinidad del agua y pueden, en consecuencia, comportar la corrosión de las partes metálicas de la caldera.

b) *Depósitos*. Los productos de corrosión disminuyen la calidad del agua de la caldera a causa de los depósitos que se producen como resultado de la cristalización de sustancias disueltas provenientes de disoluciones sobresaturadas o por precipitación de materias en suspensión. Se forman incrustaciones sobre la pared de la caldera que, al impedir la transmisión del calor, dan lugar a recalentamientos locales y a la formación de grietas. Los depósitos son debidos principalmente a la dureza y al contenido de sílice del agua. El aceite, solo o asociado a productos de corrosión en suspensión y a sales insolubles de calcio y magnesio, puede formar depósitos capaces de dañar seriamente a la caldera.

Tabla 1.3. Agua de alimentación a calderas pirotubulares

<i>Características del agua</i>	<i>Presión máxima de servicio, MPa</i>	
	$\leq 0,049$	$> 0,049$
Aspecto visual	Transparente, sin color ni sedimentos	
Dureza, mg/l	≤ 10	≤ 5
Oxígeno disuelto, mg/l	-	$\leq 0,2$
pH a 20 °C	8 a 9	8 a 9
CO ₂ como HCO ₃ ^o , mg/l	≤ 25	≤ 25
Aceites y grasas, mg/l	≤ 3	≤ 1
Materia orgánica, KMnO ₄ , mg/l	≤ 10	≤ 10

c) *Arrastres*. Las materias disueltas y en suspensión incrementan la formación de espumas en la caldera, que aumentan las impurezas en el vapor y producen depósitos en el sobrecalentador. El arrastre más o menos importante de gotas de agua con el vapor produce una disminución del rendimiento energético del vapor, y está relacionado con la viscosidad y la tendencia a la formación de espuma. Además se puede producir arrastre de sustancias minerales volátiles a la temperatura de ebullición, entre las cuales la sílice es la más nociva debido a la abrasión de los elementos móviles. Según sea el tratamiento al que se ha sometido el agua de suministro y dependiendo de la presión y temperatura, el vapor de agua puede contener anhídrido carbónico. Los condensados que contienen anhídrido carbónico ejercen una acción corrosiva sobre los aceros al carbono, el cobre y sus aleaciones. Este fenómeno puede minimizarse si se mantienen los valores para el CO₂ combinado (bicarbonatos y carbonatos) en el agua de alimentación.

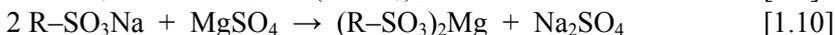
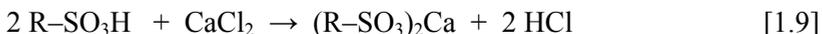
Por regla general, el *oxígeno disuelto* se elimina por desgasificación térmica, ya que el contenido de oxígeno disuelto es inversamente proporcional a la temperatura del agua (a 100 °C el contenido de oxígeno disuelto es prácticamente nulo 0,12 mg/l, y cien veces más pequeño que el contenido a 10 °C, 11,2 mg/l).

Para obtener el pH requerido se utilizan, entre otros, los siguientes productos químicos: hidróxido sódico, fosfato trisódico e hidróxido amónico. Es necesario respetar un valor mínimo de pH en el agua de alimentación o en el agua de la caldera. El valor superior del pH se determina en función de los elementos de la instalación (acero, hierro). Para los condensados se recomienda añadir una base volátil como el hidróxido amónico.

La etapa más costosa es la eliminación o reducción de la dureza del agua, tanto la de proceso como especialmente la de alimentación a la caldera; así pues, es necesario someter el agua a un tratamiento de *intercambio iónico*. Los intercambiadores iónicos son compuestos insolubles, de aspecto granular, que tienen en su estructura grupos ácidos o básicos capaces de permutar cationes o aniones, sin modificación física aparente, por otros iones del mismo signo que se encuentran en el medio líquido que los atraviesa. Mediante este intercambio o permutación se modifica la composición iónica del medio líquido (agua de suministro) sin alterar el número total de iones. Los primeros intercambiadores fueron sustancias naturales (zeolitas), después se obtuvieron compuestos sintéticos minerales (sílices, alginatos), y orgánicos (resinas) que son los más empleados en la actualidad. Todo intercambiador industrial posee una estructura química macromolecular que incluye uno o varios grupos ácidos o básicos; en un intercambiador de cationes, estos grupos son ácidos de la forma H-R, y en un intercambiador de aniones estos grupos son básicos y tienen la forma HO-R.

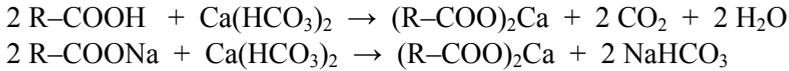
El intercambio iónico se divide en dos grandes grupos:

Intercambiadores de cationes, caracterizados por la presencia de funciones ácidas como el grupo sulfónico o el grupo carboxílico, capaces de fijar cationes minerales u orgánicos y de intercambiarlos entre sí o por el ión hidrógeno. Actualmente se utilizan dos tipos diferentes: los intercambiadores *de ácido fuerte*, con grupos de ácido sulfónico, y los *de ácido débil* con grupos carboxílicos. Los primeros están formados por poliestirenos sulfonados R-SO₃H, y son los más empleados, ya que son capaces de intercambiar cualquier catión presente en el agua.

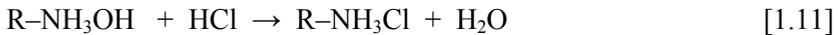


Los segundos son compuestos de fórmula general R-COOH que pueden equipararse a los ácidos orgánicos fórmico y acético. En el tratamiento de las aguas pueden liberar ácido carbónico por fijación de los cationes calcio, magnesio y

sodio procedentes de los bicarbonatos, pero no pueden intercambiar los cationes procedentes de sales de ácidos fuertes (cloruro, sulfato o nitrato).



Intercambiadores de aniones, compuestos que contienen grupos básicos como aminas o amonio, capaces de fijar aniones minerales u orgánicos y de intercambiarlos entre sí o por el ión hidroxilo. Se dividen en dos grupos diferentes: los intercambiadores *de base fuerte* y los de base débil. Los primeros están formados por resinas que contienen grupos amonio $-\text{NH}_3^{\oplus}$, o amonio alquilado $-\text{NR}_3^{\oplus}$, diferenciándose en su basicidad y capacidad de intercambio. Son los únicos capaces de liberar las bases de sus sales, según la reacción



Los intercambiadores *de base débil* están formados por mezclas de aminas desde primarias hasta terciarias pero son sensibles a la hidrólisis, por lo que el agua puede desplazar el anión fijado a la resina.

Los intercambiadores de iones sólo deben utilizarse después de un tratamiento previo de las aguas que consiste, principalmente, en la eliminación de las materias en suspensión. Los tratamientos de intercambio más importantes industrialmente son el ablandamiento y la desionización, siendo el primero más empleado en el agua de proceso y el segundo con el agua de calderas.

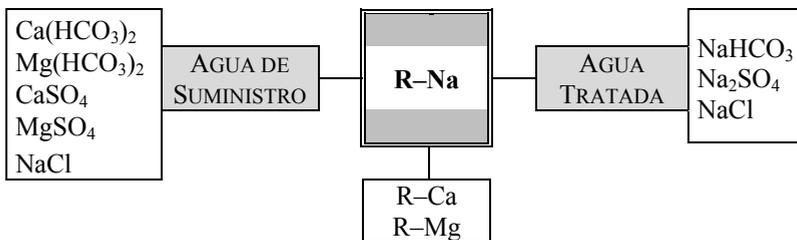


Figura 1.2. Ablandamiento del agua dura

5.1. Ablandamiento

El intercambiador de iones más utilizado en la industria textil es el de tipo catiónico para la eliminación de las sales de calcio y magnesio, o sea para desdurecer o ablandar el agua. En la figura 1.2 se muestra el esquema del

tratamiento efectuado. Todas las sales del agua de suministro se transforman en sales de sodio y la dureza del agua tratada es prácticamente nula, permaneciendo invariables el pH y la alcalinidad. El desendurecimiento puede efectuarse después de un tratamiento con cal (hidróxido cálcico), y así el agua blanda queda exenta de bicarbonatos.

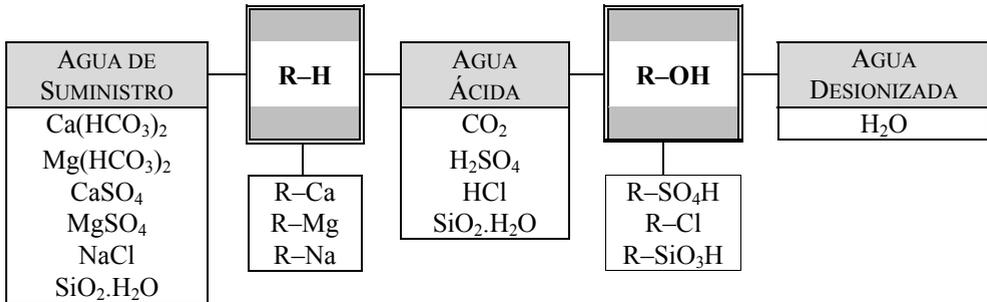


Figura 1.3. Tratamiento de desionización

5.2. Desionización

Si se aplican sucesivamente los procesos de intercambio catiónico y aniónico se obtiene un agua desmineralizada muy similar al agua destilada. La eliminación de los cationes se lleva a cabo con una resina sulfonada del tipo [1.9] de modo que el agua tratada sale conteniendo los ácidos procedentes de las sales; la regeneración se efectúa, en este caso, con ácido sulfúrico. El agua ácida pasa al intercambiador aniónico con una resina de base fuerte, tipo [1.11], y el agua tratada está libre de iones; la regeneración se efectúa con hidróxido sódico. En la figura 1.3 se muestra un esquema de una instalación de este tipo.

6. AGENTES SECUESTRANTES

En los procesos industriales de limpieza y lavado se utilizan jabones y detergentes conjuntamente con agentes secuestrantes para evitar precipitados que se depositarían sobre las telas lavadas y limpias cuando el agua es dura. También se utilizan para evitar incrustaciones de cierto número de elementos disueltos en el agua debido a modificaciones del medio (pH, temperatura, concentración), siendo el más conocido de estos fenómenos la precipitación de carbonato cálcico. Hay dos tipos de agentes secuestrantes de valor práctico, los polifosfatos y el ácido EDTA.

En algunas aplicaciones industriales, como el lavado o la eliminación de incrustaciones metálicas, se pueden eliminar los iones metálicos indeseables de modo fácil adicionando un agente secuestrante. La tabla 1.4 muestra la eficacia de los diferentes secuestrantes expresada como la dureza eliminada (en mg de carbonato cálcico por litro) de un agua dura cuando se añaden 3 gramos de producto por litro de agua dura. De todos los polifosfatos los de cadena larga son los más eficientes, posiblemente debido al número mayor de grupos formadores de quelatos a medida que aumenta el número de unidades estructurales conteniendo fósforo.

Tabla 1.4. Eficacia de los secuestrantes

EDTA	602,90
Polifosfato	361,74
Tripolifosfato	241,16
Pirofosfato	90,43

6.1. Polifosfatos

Para la sistematización de estos secuestrantes hay que recordar las fórmulas de los fosfatos sódicos: NaPO_3 metafosfato y Na_3PO_4 ortofosfato. La constitución de los polifosfatos se puede considerar como derivada de unidades de fosfato, de fórmula PO_4 , donde el átomo de fósforo presenta hibridación sp^3 y está en el centro de un tetraedro con los átomos de oxígeno situados en los cuatro vértices. La unión de dos unidades se lleva a cabo a través de un átomo de oxígeno que une los dos átomos de fósforo. Si esta unión se repite varias veces se obtiene una cadena de polifosfato. Este tipo de unión puede llevar a una estructura cíclica como la indicada para el trimetafosfato, para la que se pueden formular diferentes estructuras como las indicadas en la tabla 1.5.

Para seguir leyendo, inicie el proceso de compra, [click aquí](#)