



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES
"ZARAGOZA"

EL AGUA, SU USO Y TRATAMIENTO
EN LA INDUSTRIA DEL PROCESO

T E S I S
Que para obtener el Título de:
INGENIERO QUIMICO
P r e s e n t a :
JOAQUIN TORRES DELGADO

México, D. F.

1995

FALLA DE ORIGEN



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



UNIVERSIDAD NACIONAL
AVENIDA DE
MEXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS
SUPERIORES *ZARAGOZA*

JEFATURA DE LA CARRERA
DE INGENIERIA QUIMICA

OF/JU/07/94

C. JOAQUIN TORRES DELGADO
P R E S E N T E.

En respuesta a su solicitud de asignación de jurado para el -
Examen Profesional, le comunico que la Jefatura a mi cargo ha
propuesto la siguiente designación:

PRESIDENTE: ING. RENE DE LA MORA MEDINA
VOCAL: ING. SALVADOR GALLEGOS RAMALES
SECRETARIO: ING. GONZALO R. COELLO GARCIA
SUPLENTE: ING. ISMAEL BAUTISTA LOPEZ
SUPLENTE: ING. ARTURO E. MENDEZ GUTIERREZ

A T E N T A M E N T E
"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"

México, D.F., 25 de octubre de 1994



ING. JOSE BENJAMIN RANGEL GRANADOS
JEFE DE LA CARRERA DE
INGENIERIA QUIMICA

Irm

A mi esposa Mary

Por haberme brindado su
amor, apoyo, confianza y ser
la compañera de mi vida.

A mi hija Marianita

Por haberme enseñado a descubrir
lo bello de la vida y tener alguien
más por quien vivir con mayor fortaleza.

A mi Madre

Por haberme dado el ser, el ejemplo
la confianza, y enseñado a amar.

A la memoria de mi Padre.

A mis hermanas

Mago

Lina

Angélica

Marcela

Por su apoyo, cariño, comprensión
y respeto.

A mis sobrinas

Adriana

Lorena

I N D I C E .

	Pág.
INTRODUCCION.	1
GENERALIDADES.	3
1.- El agua desde el punto de vista físico.	3
2.- El agua y la química.	6
3.- Factores generales de calidad.	10
CAPITULO I: FUENTES DE ABASTECIMIENTO.	15
1.- Clasificación de las fuentes de abastecimiento.	15
1.1.- Aguas superficiales.	16
1.1.1.- Agua de río.	16
1.1.2.- Agua de lago.	17
1.2.- Agua subterránea.	19
1.2.1.- Agua de pozo.	20
CAPITULO II: PROBLEMATICA EN LA INDUSTRIA.	23
2.1.- Mecanismo electroquímico de la corrosión del hierro.	23
2.1.1.- Procesos electroquímicos.	23
2.1.2.- Corrosión en medio desaireado o corrosión por hidrógeno.	26
2.2.- Acción del dióxido de carbono.	29
2.3.- Factores secundarios de la corrosión.	30
2.3.1.- Influencia de la mineralización.	30
2.3.2.- Influencia de la temperatura en las aguas aireadas.	31
2.3.3.- Influencia de los microorganismos.	32
2.3.4.- Degradación del hormigón.	34
2.3.5.- Corrosión de aceros inoxidables.	38
CAPITULO III: TIPOS DE AGUA Y SU APLICACION.	40
3.1.- Clasificación.	40
3.1.1.- Agua de enfriamiento.	40

3.1.2.- Agua para caldera.	49
3.1.3.- Agua de proceso.	53
3.1.4.- Agua para usos generales.	53
CAPÍTULO IV: PROCESOS DE TRATAMIENTO DE AGUA.	55
4.1.- PRETRATAMIENTOS	55
4.1.1.- Desbaste.	56
4.1.2.- Dilaceración.	57
4.1.3.- Desarenado y desengrase.	57
4.1.4.- Predecantación.	58
4.1.4.- Tamizado.	59
4.2.- COAGULACION Y FLOCULACION.	60
4.2.1.- Coagulación.	61
4.2.2.- Floculación.	66
4.3.- PRECIPITACION QUIMICA.	71
4.3.1.- Suavizamiento interno del agua de caldera.	73
4.3.2.- Eliminación de hierro, manganeso y cromo.	74
4.3.3.- Ruptura de emulsiones y desemulsificación.	75
4.4.- DECANTACION.	76
4.4.1.- Decantación estática.	76
4.4.2.- Decantación por contacto de fangos.	77
4.4.3.- Aplicación de la decantación laminar a los decantadores por contacto de fangos.	78
4.4.4.- Decantación super-acelerada.	78
4.4.5.- Decantadores.	78
4.4.6.- Decantadores estáticos.	79
4.4.7.- Decantadores por contacto de fangos.	83
4.5.- FLOTACION.	92
4.5.1.- Ecuación de la velocidad ascensional.	93
4.5.2.- Flotación mecánica.	94
4.5.3.- Flotación por inyección de aire.	95

4.5.4.- Flotación por aire disuelto.	95
4.5.5.- Electroflotación.	96
4.5.6.- Flotadores.	96
4.6.- FILTRACION.	99
4.6.1.- Procedimientos de filtración.	100
4.6.2.- Filtros a presión.	101
4.6.3.- Filtros abiertos .	106
4.6.4.- Filtros de carbón activado.	110
4.6.5.- Filtros con precapa.	110
4.7.- INTERCAMBIO IONICO.	113
4.7.1.- Principales tipos de intercambiadores de iones.	114
4.7.1.1.- Intercambiadores de cationes.	115
4.7.1.2.- Intercambiadores de aniones.	115
4.7.2.- Empleo de intercambiadores de iones.	117
4.7.2.1.- Lecho fijo regenerado en equi-corriente.	117
4.7.2.2.- Regeneración en contra-corriente, empleo de los lechos superpuestos.	128
4.8.- OSMOSIS INVERSA.	139
4.8.1.- Membranas de ósmosis inversa.	141
4.8.1.1.- Modulos de enrollamiento en espiral.	143
4.8.1.2.- Modulos de fibras huecas.	143
4.8.1.3.- Aplicación de la ósmosis inversa.	145
4.9.- ELECTRODIALISIS.	147
4.10.- TRATAMIENTO BIOLOGICO.	149
4.10.1.- Determinación del contenido orgánico (DBO).	150
4.10.2.- Demanda química de oxígeno (DQO).	153
4.10.3.- Carbón orgánico total (COT).	153
4.10.4.- Relación entre DBO, DQO y COT.	154
4.10.5.- Lechos bacterianos.	154
4.10.6.- Lechos bacterianos con relleno tradicional.	156
4.10.7.- Lechos bacterianos con relleno de material plástico.	157

4.11.- OXIDACION DESINFECCION.	160
4.11.1.- Acción del cloro.	160
4.11.2.- Oxidación y desinfección por ozono.	162
4.12.- ADSORCION.	167
4.12.1.- Carbones activos.	169
4.12.2.- Regeneración.	170
CONCLUSIONES.	175
BIBLIOGRAFIA.	176

I N T R O D U C C I O N .

El presente trabajo trata sobre el tema de "EL AGUA, SU USO Y TRATAMIENTO EN LA INDUSTRIA DEL PROCESO". El tratamiento de agua dentro del ramo industrial consiste en obtener un agua de calidad especificada, para los servicios necesarios o transformaciones de proceso dentro de una planta industrial, ahora bién, en el mundo de hoy la sociedad en general vive en un constante cambio de adelantos científicos y tecnológicos que a su vez estos adelantos son aprovechados para acrecentar y mejorar unidades industriales de producción que paralelamente incrementan la necesidad de tener una buena calidad de los materiales y servicios requeridos en una planta industrial. Uno de los materiales más utilizados en la industria tanto para servicios como para proceso es el agua, la cual si no tiene un adecuado suministro y calidad de ella simplemente no podría existir.

El agua tal como la encontramos en la naturaleza no es utilizable directamente para el consumo humano ni para la industria, porque salvo en raros casos, no es suficientemente pura. A su paso por el subsuelo, por la superficie de la tierra o incluso a través del aire, el agua se contamina y se carga de materia en suspensión o en solución: partículas de arcilla, residuos de vegetación, organismos vivos (plancton, bacterias, virus) sales diversas, (cloruros, sulfatos, carbonatos, calcio, hierro, manganeso, nitritos, nitratos), materias orgánicas (ácidos orgánicos, residuos de fabricación), aceites, gases (oxígeno, CO_2 , amoníaco), etc.

La presencia de esta gran variedad de impurezas exige el tratamiento de las aguas antes de su utilización para hacerlas aptas en las aplicaciones consideradas dentro de la industria del proceso. Ya que el agua constituye una de las principales herramientas para el buen funcionamiento de cualquier planta industrial y por ende dependiendo del uso que se le vaya a asignar sera el tipo de tratamiento al que será sometido dando como resultado una mejor durabilidad y rendimiento, evitándose también problemáticas de corrosión, incrustaciones, contaminación y altos costos de mantenimiento.

Pero de entre todos los problemas que sufre nuestro mundo industrializado quizás el mas visible y molesto sea el de la contaminación del agua despues de haber sido utilizada dentro de la industria y sea desechada al medio ambiente sin ser tratada. Cuántas veces hemos oído hablar de arroyos transformados en vertederos, de ríos sin

peces, de orillas contaminadas a causa de los residuos desechados por la industria.

El objetivo de este trabajo consiste en describir al agua de acuerdo a sus propiedades, mencionar las principales fuentes de abastecimiento y las aplicaciones mas comunes del agua dentro de la industria, asi como de presentar de una manera práctica las operaciones necesarias para los diferentes tipos de tratamiento al que se somete el agua de acuerdo a su uso dentro de la industria.

El desarrollo del trabajo consta de cuatro capitulos, en el primer capitulo se mencionan las principales fuentes de abastecimiento naturales y las diferencias entre una fuente y otra. En el capítulo dos se considera la problemática dentro de la industria que causa el agua cuando se utiliza sin ser tratada. El capitulo tres menciona las aplicaciones mas comunes del agua dentro de la industria tales como: agua de enfriamiento, agua para caldera y agua para proceso. El capitulo cuatro describe las principales operaciones de tratamiento de agua dentro de una planta industrial.

GENERALIDADES

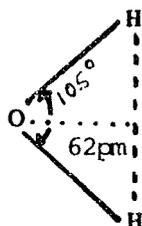
Hasta hace unas dos decadas el hombre se conformaba con caracterizaciones de tipo general sobre la calidad del agua, si se apreciaba limpia y transparente al sentido de la vista se consideraba buena, pero el conocimiento de la naturaleza de las características físicas, químicas y biológicas de las aguas es esencial en el diseño y operación de los sistemas de captación, tratamiento y disposición, así como para la administración de la calidad del ambiente, por lo tanto, el agua es uno de los materiales más importantes que se utiliza en la industria y si esta no tiene un adecuado suministro de agua de calidad aceptable es casi imposible que exista.

1.- EL AGUA DESDE EL PUNTO DE VISTA FISICO.

El agua es el resultado de la combinación del hidrógeno y del oxígeno naturales es decir, de las combinaciones recíprocas de dos series de isótopos: por una parte al hidrógeno ^1H , deuterio ^2H (D), tritio ^3H (T), y por otra al ^{16}O , ^{17}O , ^{18}O . Puede estar constituida teóricamente por 18 tipos de moléculas, pero dada la proporción excesivamente pequeña de ^3H , ^{17}O y ^{18}O , el número de moléculas se reduce a tres: H_2O , D_2O , HDO . La fracción molar de deuterio en el hidrógeno natural es casi constante y aproximadamente igual a $1/6000$, mientras que la del tritio es solamente $4 \cdot 10^{-5}$. El agua pesada, cuyas propiedades físicas difieren ligeramente de las del agua ligera, tienen por fórmula química D_2O , por lo tanto como primera aproximación la fórmula del agua es H_2O .

La molécula del agua tiene un momento eléctrico que se manifiesta por sus propiedades físicas y eléctricas dándole una característica de líquido polar o dipolar que puede disolver a casi todas las sustancias. Para su presentación se opta por un modelo triangular, como se indica en la figura 1.

Figura 1.



Si los enlaces O-H fueran exclusivamente covalentes el ángulo HOH debería ser de 90° , en realidad debido al carácter electronegativo del oxígeno, el ángulo de enlaces

O-H es de 105° aproximadamente y la distancia del átomo de oxígeno al eje de los átomos H^+ es de 62 pm.

Ahora bien la estructura del agua depende de su estado físico:

El estado gaseoso (vapor) corresponde exactamente a la fórmula H_2O y en especial-- al modelo triangular indicado.

En el estado líquido hay una asociación de varias moléculas por enlaces especiales llamados enlaces de hidrógeno, en el que cada átomo de hidrógeno de una molécula de agua se encuentra unido al átomo de oxígeno de la molécula vecina. En el espacio la estructura es tetraédrica.

En estado sólido, la disposición elemental consiste en una molécula de agua central y cuatro periféricas, tomando el conjunto la forma de un tetraédro.

1.1.- Propiedades físicas más interesantes para el tratamiento de agua.

a) Densidad.

La densidad es una propiedad que varía con la presión y la temperatura, la densidad del agua pura a $15^{\circ}C$ a presión atmosférica es de 0.9990 Kg/dm^3 . Las de las aguas naturales varía con el contenido en sustancias disueltas, el agua de mar con una salinidad de 35 g/dm^3 , tiene una densidad media de 1.0281 Kg/dm^3 a $0^{\circ}C$; una variación de la salinidad de 1 g/l hace variar la densidad en 0.0008 Kg/dm^3 .

b) Propiedades térmicas.

El calor másico es de $4180 \text{ J/kg }^{\circ}C$ a $0^{\circ}C$; varía con la temperatura presentando un mínimo a $+35^{\circ}C$.

Las temperaturas de fusión y de ebullición son $0^{\circ}C$ y $100^{\circ}C$ respectivamente a una atmósfera.

Los calores latentes de fusión y vaporización son de 330 KJ/Kg y 2250 KJ/Kg respectivamente a la presión normal y a $100^{\circ}C$.

Debido a los valores elevados del calor latente de vaporización del agua, las grandes extensiones de agua en la superficie de la tierra constituyen verdaderos volantes térmicos. La utilización del agua en la industria como fluido portador de calor, se debe a la misma razón.

c) Viscosidad.

Es la propiedad que tiene un líquido de oponer resistencia a todo movimiento, ya sea interno o global como el flujo, esta propiedad desempeña un papel importante para el tratamiento de agua, la viscosidad disminuye cuando aumenta la temperatura.

Tabla 1.
Variación de la viscosidad dinámica en función de la temperatura .

°C	0	5	10	15	20	25	30	35
mPa s	1.797	1.523	1.301	1.138	1.007	0.895	0.800	0.723

Por el contrario aumenta con el contenido de sustancias disueltas, por lo que el agua de mar es mucho más viscosa que el agua de río.

Tabla 2.

salinidad en iones Cl ⁻ g/l	0	4	8	12	16	20
coeficiente de viscosidad mPa s a 20°C .	1.007	1.021	1.035	1.052	1.068	1.085

La presión actúa de forma especial sobre la viscosidad absoluta del agua, una presión moderada hace al agua menos viscosa a bajas temperaturas lo que no ocurre con otros líquidos, rompe de alguna forma su organización molecular y si continúa aumentando la presión vuelve a tomar la estructura de líquido desprovisto de una sujeción interna, aumentando la viscosidad si la presión se sigue incrementando.

d) Tensión superficial.

Caracteriza una propiedad de las superficies que limita dos fases y se define como la fuerza de atracción que se ejerce en la superficie del líquido y tiende siempre a reducir lo mas posible la extensión de dicha superficie.

La tensión superficial del agua es de $73 \cdot 10^{-3}$ N/m a 18°C y de $52.5 \cdot 10^{-3}$ N/m a 100°C la tensión superficial provoca una ascensión capilar de 15 cm a 18°C en un tubo de 0.1-

mm. de diametro.

La adición de sales disueltas aumenta la tensión superficial, por ejemplo en una solución acuosa uno molar de NaCl es de $76,6 \cdot 10^{-3}$ N/m. La presencia de algunos cuerpos tensoactivos disminuye la tensión superficial.

e) Propiedades eléctricas del agua .

- Constante dieléctrica : La constante dieléctrica del agua es del orden de 80, es una de las más elevadas que se conocen por lo que el agua posee un alto poder ionizante.

- Conductividad eléctrica del agua: El agua es ligeramente conductora y su comportamiento se rige por la ley OHM.

La conductividad del agua más pura que se ha obtenido es de $K = 4,2 \cdot 10^{-6}$ Siemens por metro a 20°C , correspondiente a una resistividad de 23.8 Megohm*cm. Aumenta cuando se disuelven sales y varía en función de la temperatura .

f) Propiedades ópticas.

La transparencia del agua depende de la longitud de onda de la luz que la atravieza la luz ultravioleta pasa bien, pero los infrarrojos tan útiles desde el punto de vista físico y biológico apenas penetran en ella.

La transparencia del agua se utiliza frecuentemente para medir ciertas formas de contaminación, turbidez y por consiguiente la eficacia de los tratamientos de agua.

2.- EL AGUA Y LA QUIMICA.

La energía de formación de la molécula del agua es de 242 KJ/mol, la cual es elevada por lo que explica la gran estabilidad del agua. Esta estabilidad unida a las propiedades eléctricas y a la constitución molecular la hacen apta para la disolución de numerosos cuerpos, tales como, la mayor parte de las sustancias minerales así como un gran número de gases y productos orgánicos.

2.1.- El agua como sustancia disolvente.

Disolver un cuerpo es romper su cohesión, la cual es debida a fuerzas electrostáticas o de Coulomb que pueden ser:

- **Interatómicas:** enlaces covalentes (entre átomos), enlaces electrovalentes o iónicos (átomo-electrones).

-**Intermoleculares:** enlaces de cohesión entre moléculas (enlaces de hidrogeno).

-**fuerzas de atracción débiles** (Van Der Waals); que aseguran la unión general del conjunto.

La atracción hidratante del agua (molécula bipolar) destruye, por completo o parcialmente (comenzando por las débiles), los diversos enlaces electrostáticos entre los átomos y las moléculas del cuerpo que va disolverse, remplazandolos por nuevos enlaces con sus propias moléculas, y crea nuevas estructuras; produciendo una verdadera reacción química (solvatación).

2.2.- Solubilidad de las diversas fases.

a) Disolución de gases.

La solubilidad de los gases sigue la ley de Henry, es decir, que la cantidad de gas que se disuelve es proporcional al coeficiente de solubilidad, propio de cada gas, a la concentración C del gas en cuestión en la fase gaseosa y a la presión total P en contacto con el agua.

Tabla 3.

(El volumen del gas disuelto es $V = \alpha CP$)

Gas	N ₂	O ₂	CO ₂	H ₂ S
Valor del coeficiente de solubilidad α a 10°C	0.018	0.038	0.194	3.39
Valor de la solubilidad de los gases en mg/l a 10°C estando el gas puro en contacto con el agua a una presión de 1 bar.	23.18	54.3	2318	5112

Los anhídridos (CO₂ y SO₂) y diversos ácidos gaseosos (HCl) se disuelven y después se combinan, los cuales tienen un coeficiente de solubilidad mucho mayor que el de otros gases.

b) Solubilidad de los líquidos.

Al ser polar la molécula del agua, la solubilidad de un líquido en ella depende de la polaridad de sus moléculas. Por ejemplo, las moléculas que contienen grupos OH^- (alcoholes y azúcares), SH^- , NH_2^- , son muy polares y por lo tanto, muy solubles en agua mientras que otros líquidos no polares (hidrocarburos, tetracloruro de carbono, aceites-grasas, etc.) son muy poco solubles o se puede dar una miscibilidad parcial por encima de una temperatura crítica.

c) Solubilidad de los sólidos.

La solubilidad se define como la masa máxima de soluto que puede existir en una masa dada de solvente. Para los cuerpos cristalizados existe un equilibrio definido entre un cristal y la solución saturada correspondiente en donde se pasa de la materia seca a la solución sin ninguna clase de discontinuidad. Cuando se tiene un soluto de macromoléculas que generalmente comprenden diferentes dimensiones moleculares, no existe un equilibrio definido como entre un cristal y la solución saturada correspondiente.

En el tratamiento de agua, habrá de tenerse en cuenta el tamaño y la carga eléctrica de la partículas disueltas. Por ello se distinguen diferentes clases de soluciones y de suspensiones.

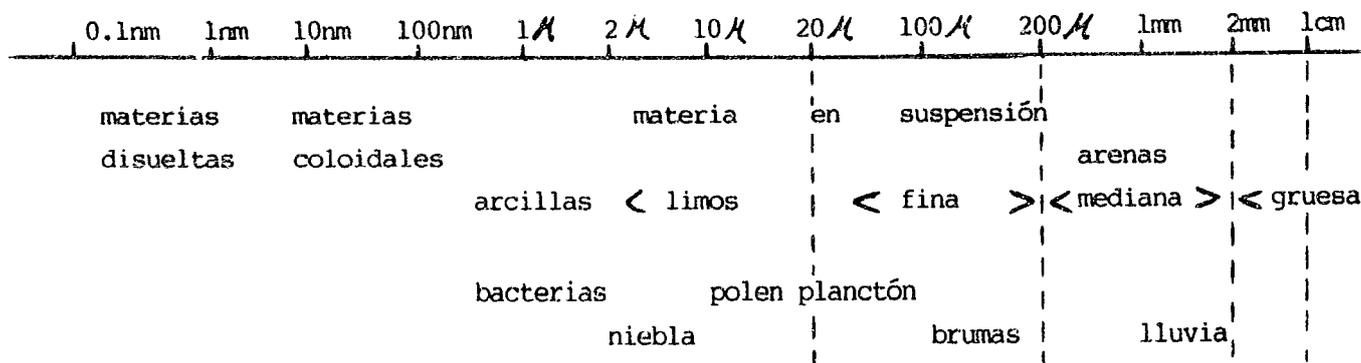
- **Soluciones cristaloides:** Son cuando se tienen partículas pequeñas de menos de un nanómetro ionizadas en la solución, como ácidos, bases, sales y no ionizadas como azúcares

- **Soluciones macromoleculares:** Se forman por partículas de dimensiones superiores al nanómetro, que pueden presentar grupos ionizados.

- **Suspensiones coloidales:** Se denominan también soluciones micelares que son sistemas de dos fases netamente heterogéneas, en que las partículas dispersas son conjuntos atómicos o moleculares de diferentes dimensiones.

- **Suspensiones:** Son cuando existen partículas sólidas suspendidas y son visibles al microscopio llamándose suspensiones o emulsiones para partículas líquidas suspendidas.

Figura 2.- Tamaño de diversas partículas.



d) Hidrofilización.

Un mismo cuerpo puede presentar frente a diversos solventes solubilidades distintas por ejemplo, el NaCl es mucho mas soluble en el agua que en el alcohol mientras que la parafina es soluble en benceno y en agua no, por lo que la solubilidad en agua depende de la naturaleza del cuerpo clasificandose por ello los grupos solubles o hidrófilos (OH^- , $-\text{CO}^-$, NH_2) e insolubles o hidrófobos (CH_3 , $-\text{CH}_2-$, C_6H_5).

En algunos casos, la solvatación o el simple mojado se produce mediante la intervención de un tercer constituyente denominado **solubilizante** para el caso de soluciones; **peptizante**, para las soluciones coloidales; **emulsionante**, para las emulsiones; **estabilizante** para las suspensiones coloidales y agente **humectante** en las acciones superficiales.

Estos intermediarios crean verdaderos lazos entre el solvente y la sustancia que se disuelve, se mantiene en dispersión o se humedece (disminuyendo la tensión superficial).

Este lazo es debido por parte del solvente a un grupo hidrófilo mientras que del lado de la materia a transformar puede ser un enlace químico (acción de las bases y ácidos fuertes), o un enlace de cohesión. Estos últimos se forman a partir de moléculas disiméricas en donde uno de los extremos es semejante al agua y el otro tiende a asociarse (acción de los detergentes, fosfato trisódico y de los agentes humectantes), a las moléculas del cuerpo que se requiere estabilizar o adsorberse en su superficie formandose complejos de agregación o de adsorción más hidrófilos.

e) Pérdida de la hidrófila.

El constituyente intermediario puede romper el lazo entre el solvente y el cuerpo disuelto dispersando o humedecido según sea el caso, éste agente se denominará precipitante, coagulante, floculante, espesador, etc. Esta ruptura puede ser el resultado de una acción química o pérdida de iones OH^- o de grupos ionizados. El intermediario puede destruir el lazo de cohesión semi-hidrófilo neutralizando la parte hidrófila o captando la parte hidrófoba en la superficie, bien sea de burbujas de aire (flotación) o de un adsorbente insoluble más o menos hidrófilo.

La ruptura puede ser el resultado de una neutralización de fuerzas electrostáticas o acción de los cationes polivalentes y de los polielectrólitos iónicos.

3.- Factores generales de calidad y tratamientos comunes dentro de la industria.

La calidad de agua requerida depende de su uso o usos finales. Ya que la tolerancia para algunas impurezas varía con estos usos, la calidad del agua requerida en cada caso puede diferir grandemente. Por ejemplo, el agua de mar, con clorinación intermitente, puede ser bastante satisfactoria para algunos propósitos de enfriamiento y completamente inadecuada para calderas, para otros usos en equipo de enfriamiento, para muchos procesos húmedos, y obviamente, como agua de beber.

Si un agua dura es adecuada para ciertos usos, no hay ninguna necesidad para tratar la porción requerida para ellos. Para aquellas porciones requeridas para otros usos, en algunos casos puede ser necesario, únicamente una forma de tratamiento, tal como ablandamiento, mientras que en otros casos pueden requerirse tratamientos separados.

Para ciertas aplicaciones, la calidad del agua requerida es tan alta que demanda prácticamente la remoción completa de todas las impurezas. Para la gran mayoría de los usos, sin embargo, la calidad del agua requerida no es tan alta y sería innecesario y antieconómico proceder a remover todas las impurezas en tales casos. En lugar de esto, lo que se requiere es, ya sea una remoción prácticamente completa de solo las impurezas dañinas, o su reducción a márgenes no perjudiciales (tolerancias).

Las aportaciones significativas de contaminación que se enumeran seguidamente, se han clasificado en función de los métodos de tratamiento que le son aplicables.

- **Elementos insolubles separados físicamente con o sin floculación:** materias flotantes- (grasas, hidrocarburos alifáticos, alquitranes, aceites orgánicos, etc.), materia sólida

en suspensión (arenas, óxidos, hidróxidos, pigmentos, azufre coloidal, latex fibras, etc)

- **Elementos orgánicos separables por adsorción:** colorantes, detergentes, compuestos macromoleculares diversos, compuestos fenolados.

- **Elementos separables por precipitación :** metales tóxicos o no , Fe, Cu, Zn, Ni, Be, Ti, Al, Pb, Hg, Cr, precipitables en una cierta zona de pH. Sulfitos, fosfatos, sulfatos fluoruros por adición de Ca^{2+} .

- **Elementos que pueden precipitar en forma de sales insolubles de hierro o de complejos:** Sulfuros, fosfatos, cianuros, sulfocianuros.

- **Elementos separables por desgasificación:** H_2S , NH_4 , alcoholes, fenoles, sulfuros.

- **Elementos que necesitan una reacción de oxidación-reducción:** cianuros, cromo hexavalente, sulfuros, cloro, nitrito.

- **Ácidos y bases:** ácidos clorhídrico, nítrico, sulfúrico y fluorhídrico. Bases diversas.

- **Elementos que pueden concentrarse por intercambio iónico o por ósmosis inversa:** sales de ácidos y de bases fuertes, compuestos orgánicos ionizados (intercambio ionico) o no (ósmosis inversa). Radionucleidos tales como Mo, Cs.

- **Elementos que se adaptan a un tratamiento biológico:** todos los elementos biodegradables por definición, por ejemplo, azúcares, proteínas, fenoles, etc.

En muchas industrias la dureza constituye la base principal para clasificar las aguas que reciben, también es una característica que expresa la concentración total de calcio y magnesio, aunque otros constituyentes tales como el hierro, manganeso y otros cationes polivalentes también constituyen a la dureza, que casi siempre tienen concentraciones tan pequeñas que no afectan la dureza del agua industrial. La dureza puede dividirse en dos grupos: la de carbonatos y la de no carbonatos, la de carbonatos es aquella parte de la dureza que se debe a los carbonatos y los bicarbonatos. El resto de la dureza se denomina la de no carbonatos. La de carbonatos rara vez impide utilizar el agua para la industria ya que en caso de ser excesiva se puede reducir o eliminar de un modo sencillo, por otro lado, la dureza de no carbonatos sobre todo cuando el anión predo-

minante es el sulfato puede dar como resultado la formación de escamas duras en las calderas y otras partes del equipo de intercambio de calor.

Tabla 4. Clasificación de dureza .

Rango de dureza mg/l (ppm)	Clasificación descriptiva.
1 a 60	suave
61 a 120	moderadamente dura
121 a 180	dura
superior a 180	muy dura .

Las concentraciones de sílice en el agua varían de menos de 1 hasta más de 75 mg/l y alcanzan promedios de 5 a 15 mg/l, en ciertas condiciones el sílice forma escamas duras en las calderas y en las hojas de las turbinas.

La materia orgánica junto con el hierro manganeso y aluminio puede formar compuestos complejos dando coloraciones indeseables a los productos manufacturados.

El contenido de sodio en el agua varía en un amplio margen desde menos de 5 mg/l en el agua dulce hasta muchos miles de miligramos por litro en aguas salobres y en agua de mar alrededor de 10700 mg/l. El potasio por lo general se encuentra en toda el agua dulce en concentraciones bajas que rara vez sobrepasa el nivel de 10 mg/l; si el sodio y el potasio se encuentran en concentraciones bajas afectan poco en el uso industrial.

La alcalinidad de los abastecimientos de agua casi siempre indica que ésta contiene el ión bicarbonato aunque también puede tener carbonatos. La alcalinidad también se relaciona con la capacidad amortiguadora o de tampón del agua, es decir, la capacidad que tiene el agua para recibir ácidos sin reducir sustancialmente su PH no obstante, esto puede ocasionar problemas en ciertos procesos industriales.

Los gases disueltos como el dióxido de carbono, oxígeno, sulfuro de hidrógeno o amoníaco a menudo tienen importancia dependiendo del uso final que se le da al agua, la separación de los gases disueltos puede lograrse por calentamiento o agitación. Los gases deben eliminarse del agua que se destina para ciertos usos industriales sobre todo cuando se genera vapor en calderas.

El agua tiene otras características importantes para la industria como son el sabor

olor, turbidez, PH, corrosividad y la radioactividad, todos estos parámetros de calidad y sus efectos en las aplicaciones industriales pueden determinar de forma decisiva si esta puede usarse o no.

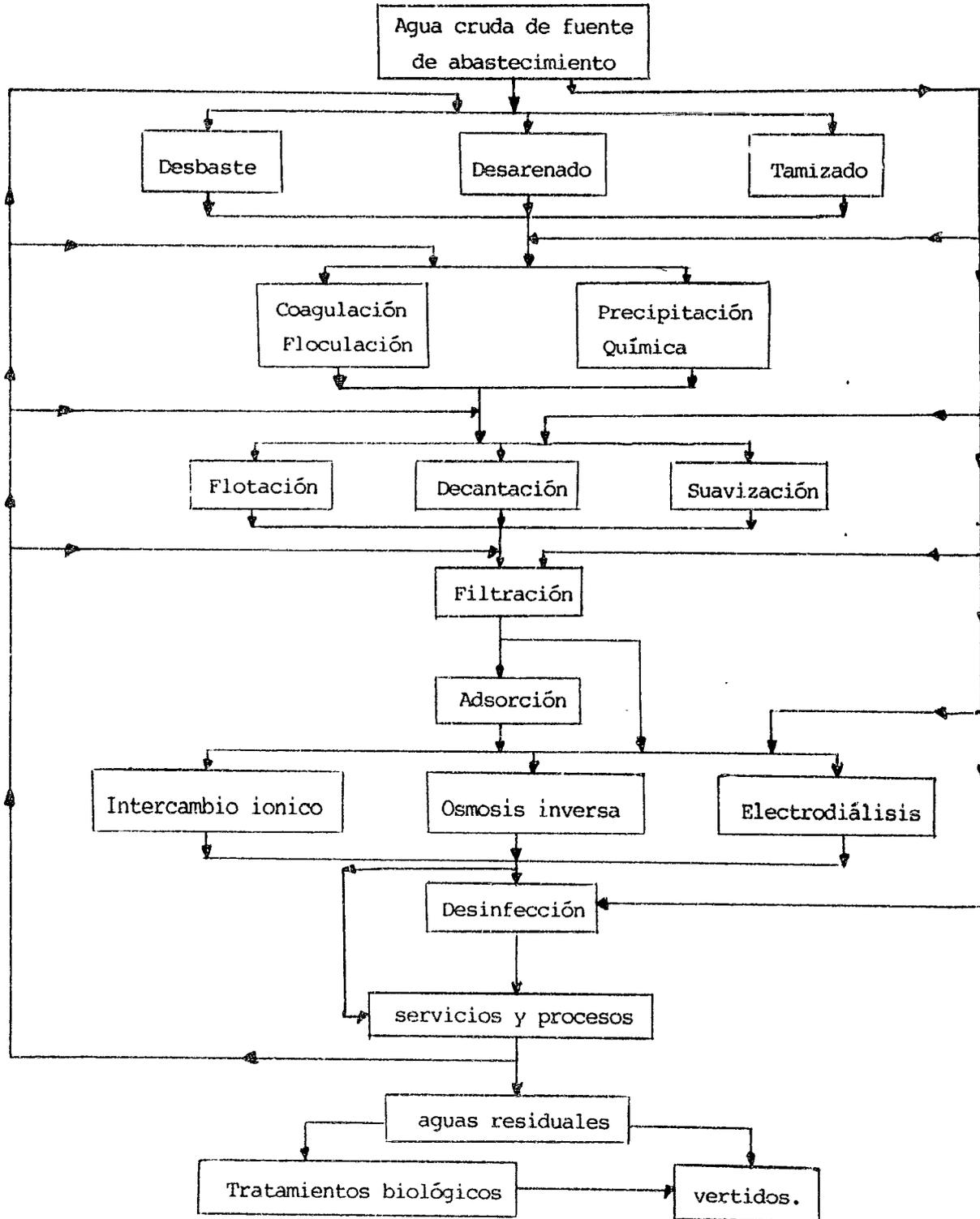
Los requisitos del agua industrial deben establecerse con sumo cuidado, considerando la cantidad y calidad del agua que pueda obtenerse del lugar donde este situada la planta. Si el agua disponible no tiene la calidad apropiada debe ser acondicionada de acuerdo al uso que se le va a dar.

La industria debe aprovechar de la manera mas eficientemente posible los recursos acuíferos disponibles y cuidar que no se reduzca la calidad de las aguas que se descargan para devolverlas al sistema hidrológico y no afecte la ecología del medio ambiente.

Para lograr que la industria obtenga un agua de calidad de acuerdo a sus necesidades debe de acondicionarla aplicando las tecnicas de tratamiento que sean necesarias para este fin. Pero cuando hablamos de aplicaciones o procesos, industriales para obtener un agua de calidad, estamos pensando en una infinidad de combinaciones de aplicación de los diferentes procesos de depuración de agua.

El cuadro 2 da una idea de las técnicas o procesos de tratamiento que existen en común en todas las industrias para obtener agua de calidad.

Cuadro 2.



CAPITULO I.

FUENTES DE ABASTECIMIENTO.

CAPITULO I .

FUENTES DE ABASTECIMIENTO .

El agua es una sustancia que la industria usa en tan bastas cantidades, que tanto en sus cantidades netas como en los tonelajes totales, sobrepasa por mucho a todos los materiales. Se requieren más de 250 Toneladas de agua para fabricar una tonelada de acero, sobre 700 toneladas para fabricar una tonelada de papal, más de 1200 toneladas para hacer una tonelada de aluminio. Esta lista se puede proseguir y se verá que prácticamente en cualquier industria el mayor tonelaje de material manejado es el agua. Por tal razón, el abastecimiento seguro del agua constituye un factor básico en la selección del sitio de una fuente de abastecimiento. Ahora bién cualquiera que sea la fuente de abastecimiento, el agua contendrá impurezas, ya que no hay agua natural que sea químicamente pura. Las impurezas de las fuentes de abastecimiento pueden variar tanto en tipo y cantidad que contegan, así como en las diferentes estaciones del año.

Para dar una mejor explicación sobre las diferencias entre las distintas fuentes de abastecimiento, a continuación se menciona la clasificación de estas.

1.- Clasificación de las fuentes de abastecimiento.

Cuando la lluvia o el agua formada por la fusión de la nieve o el hielo se pone en contacto con el suelo, una parte de ella se evapora, parte se colecta y fluye por la superficie y otra se sumerge en el suelo. Las aguas que se colectan y fluyen por la superficie se llaman aguas superficiales y las aguas que se sumergen en la tierra se llaman aguas subterráneas. Por tal razón, el agua puede clasificarse de acuerdo a su origen:

- a) aguas superficiales: Ríos
- Lagos
- Lagunas

b) Aguas subterráneas: Pozo

Manantiales

Filtraciones subterráneas.

1.1.- Aguas superficiales.

Como se menciono anteriormente las aguas superficiales son las que se colectan y fluyen por la superficie de la tierra, esta agua cuando forma en las nubes es re-ativamente pura, pero cuando se precipita en forma de lluvia o nieve absorbe gases del aire sobre todo oxígeno y CO_2 . Al llegar a la tierra disuelve materiales con los que entra en contacto, por lo que, la cantidad de la materia disuelta depende de la solubilidad del suelo o las rocas de la zona y del tiempo en que el agua está en contacto con estos medios. Como algunas industrias utilizan como fuente de abastecimiento las aguas superficiales, deben tomar en cuenta las impurezas que esta contenga para determinar si el agua es apropiada para aplicaciones industriales específicas, por tal razón se mencionan a continuación las principales características de las aguas superficiales mas comunes.

1.1.1.- Agua de río.

El agua de río es una clasificación de las aguas superficiales, este tipo de agua suele ser turbia y algunas veces los son en forma excesiva, la materia disuelta y en suspensión mas común es: Na y K, HCO_3 , Cl, CO_2 , SO_4 , NO_3 , Fe, SiO, CO_2 , Fe, Mn, Al, dureza (Ca y Mg), arcilla, materia orgánica y microorganismos. Si se analizan varios ríos de diferentes lugares a través de un determinado periodo de tiempo, se encontrarán estas sustancias presentando amplias diferencias de su contenido de un río a otro y también se observaria una gran variación en las proporciones relativas de sus constituyentes, por ejemplo, se ha dicho a menudo que un tercio de la dureza total se debe al magnesio y esta proporción puede variar de un río a otro en los cuales el magnesio puede estar en mayor proporción que el calcio o viceversa.

De la misma manera, las proporciones relativas de los otros constituyentes varían en un amplio rango. La tabla 1.1 nos da un ejemplo de las variaciones de los constituyentes de 7 ríos diferentes, localizados al sur de EEUU.

Tabla 1.1.- Análisis de 7 pares de muestras de agua de río alternadas en un periodo de tiempo de 4 meses.

Río	tiempo meses	Expresado en ppm de CaCO ₃ .									
		dureza	Ca	Mg	Na+K	HCO ₃	Cl	SO ₄	NO ₃	Fe	SiO ₂
1	0	217	168	49	61	182	14	37	2.8	2.20	24
1	4	47	33	14	12	43	1	9	0.3	0.20	9
2	0	23	18	5	19	27	5	7	0.6	0.37	18
2	4	21	17	4	19	27	4	4	0.5	0.30	26
3	0	232	158	74	104	153	20	158	1.1	0.20	32
3	4	14	115	49	69	135	10	79	1.0	0.26	40
4	0	79	60	19	20	30	9	60	0.7	0.14	8
4	4	46	30	16	20	42	7	12	1.5	0.15	16
5	0	85	58	27	64	112	9	25	0.5	0.08	26
5	4	255	185	70	196	111	170	146	0.3	1.10	30
6	0	230	173	57	124	242	42	55	2.4	2.20	48
6	4	215	113	102	22	207	7	23	3.3	0.44	15
7	0	25	18	7	15	32	2	4	0.2	0.07	24
7	4	61	33	28	29	60	8	17	0.5	0.43	28

Esta tabla nos da una idea de las fluctuaciones de los valores de análisis de los mismos constituyentes del agua de río en un periodo de tiempo mas o menos corto. Si se continuarán analizando estos mismos ríos y se compararan sus valores seguirian presentando muchas diferencias entre si, ya sea en un periodo de tiempo largo o corto, por lo tanto, esta es una de las principales características del agua de río que debe tomarse en cuenta para su tratamiento y pueda ser utilizada en la industria.

1.1.2.- Agua de lago.

Un lago es una porción de agua que se encuentra almacenada en depositos naturales, los cuales pueden ser pequeños y de proporciones considerablemente grandes. ahora bién, debido a su quietud, los lagos sirven eficientemente como depósitos de asenta-

miento y sus turbideces son generalmente bajas casi siempre. El agua de los lagos esta menos sujeta a variaciones rápidas en la composición que las aguas provenientes de ríos. Muchos grandes lagos tienen una composición de agua notablemente constante aun por periodos de tiempo muy largos; esto es verdadero para los lagos grandes de los cuales muchas industrias obtienen su agua para proceso. En el caso de pequeños lagos, algunos tienen agua de composición casi constante mientras que otros muestran considerables variaciones entre las diferentes estaciones del año.

Sin embargo el agua alcanza su mayor densidad a los 4°C y se generan movimientos verticales debido a la diferencia de temperatura entre el agua de la superficie y la del fondo, estos movimientos se conocen con el nombre de cambios de otoño y primavera, de manera que en ese periodo el agua de lago puede tener alguna turbidez; también las tormentas pueden agitar el agua de los lagos aumentando su turbidez.

Los grandes lagos constituyen muy a menudo un abasto de agua confiable porque tienen muy poca variación de su nivel durante cualquier estación del año, este no es el caso cuando se trata de lagos pequeños estanques o depósitos en el que se aconseja hacer un estudio cuidadoso del área de escurrimiento, la cantidad de lluvia y las variaciones entre las diversas estaciones del año; en estos estudios debe tomarse especial cuidado al promediar el escurrimiento del área y las perdidas por evaporación. En caso de nuevos proyectos un estudio de esta naturaleza revelará si la fuente de suministro es suficiente o no para satisfacer todas las demandas presentes y futuras de una planta industrial.

Las impurezas del agua de lago son semejantes a las del agua de río, tales como: Silice (SiO_2), Hierro (Fe), Manganeso (Mn), calcio (Ca), Magnecio (Mg), Sodio (Na), potasio (K), Bicarbonatos (HCO_3^-), Carbonatos (CO_3^-), Sulfatos (SO_4^{--}), Cloruros (Cl^-), Fluoruros (F^-), Nitratos (NO_3), sólidos disueltos, dureza como CaCO_3 y de no carbonatos, microorganismos y propiedades que la hacen distinguirse como el color.

La tabla 1.2 nos da una serie de datos para aclarar lo anteriormente dicho.

Tabla 1.2.- Análisis de 7 pares de muestras de agua de lago localizados en diferentes, lugares alternadas por un periodo de 6 meses.

Lago	tiempo meses	Expresado como ppm de CaCO ₃									
		Dureza	Ca	Mg	Na+K	HCO ₃	Cl	SO ₄	NO ₃	Fe	SiO ₃
1	0	103	70	33	6	108	1	1	-	-	5
1	6	97	66	31	5	119	3	2	tr.	0.10	3
2	0	44	22	12	22	60	3	10	1.1	0.08	6
2	6	48	33	15	29	74	1	tr.	tr.	0.06	2
3	0	110	69	23	42	87	29	5	0.14	0.14	4
3	6	107	78	29	39	93	39	7	0.10	0.10	8
4	0	123	89	34	17	94	23	23	1.1	0.05	8
4	6	112	80	34	18	92	25	24	1.0	0.02	6
5	0	189	112	55	30	126	31	50	tr.	tr.	4
5	6	186	119	57	35	120	35	56	tr.	tr.	
6	0	12	7	5	12	5	12	7	0.7	0.50	2
6	6	15	5	4	10	7	10	6	0.5	0.70	4
7	0	114	95	19	31	122	10	14	0.3	tr.	
7	6	119	102	17	29	112	8	17	0.5	0.05	11

tr. = trazas.

Como se puede apreciar en esta tabla, los valores del análisis de los diferentes lagos, presentan poca variación de sus constituyentes, en un periodo de tiempo mas o menos largo, que es una de las característica mas notables del agua de lago.

1.2 Agua subterránea.

Las aguas subterráneas, debido a su contacto mas íntimo y prolongado con estratos rocosos en un área dada, tienen un contenido mas alto de sustancia mineral disuelta que la hace ser mas dura que las aguas superficiales. Por supuesto hay sus excepciones ya que un agua superficial se puede originar en una región de rocas solubles y-- despues escurrir a un área de rocas insolubles, en tales casos, las aguas subterráneas en esa área pueden tener una cantidad de minerales menor que las aguas superficiales.

A medida que el agua se percola suavemente atravez de la tierra y los estratos por los que pasa, ejercen sobre ella una acción filtrante, absorbente y purificante,

así mientras que su contenido de minerales soluble aumenta, la materia suspendida, color, y su contenido de bacterias pueden ser remvidos o reducidos apreciablemente. Por lo tanto, el agua subterránea usualmente es incolora, clara, y baja en cuenta de bacterias y alto contenido de sólidos solubles.

Deben tomarse en cuenta las precauciones adecuadas para eliminar el peligro de contaminación de un agua subterránea por un agua de superficie que se pueda infiltrar a ella, ya que en las aguas superficiales es comun el crecimiento de organismos que le imparten colores y olores desagradables. Como excepción por lo que se refiere a aguas de pozo muy profundo que contenga hierro, manganeso y sulfuro, las primeras pueden desarrollar bacterias de hierro y manganeso dandole un sabor astringente y-- las aguas sulfurosas tienen tanto sabor como olor desagradable.

1.2.1.- Agua de pozo.

Los abastos por medio de agua de pozos profundos, son un recurso muy usado en la industria. Estos tienen algunas ventajas sobre la aguas superficiales, entre las que se pueden citar: claridad, estar libres de colores, sabores, olores, contaminaciones de drenajes, desperdicios industriales y tener una composición y temperatura constante.

Los pozos profundos usualmente se dividen en dos clases principales, pozos profundos y poco profundos. un pozo profundo es aquel que pasa a travez de un estrato impermeable hasta localizar el agua que pasa por debajo de el, mientras que el poco profundo es el que meramente se extiende hasta una capa permeable para extraer el agua que pasa por debajo de ella. Por lo que se refiere a profundidad no es completamente clara pero es practicamente común que pozos mayores de 30 m son considerados como pozos profundos y los de menor profundidad como poco profundos.

Los pozos profundos, en muchas localidades pueden variar de 30 a 1000 m, la mayoría de ellos estan entre los 30 y poco mas de 600 m. usualmente los pozos profundos se ademan para evitar derrumbes y aislar el agua de estratos indeseables; el ensanchamiento, empacado y desarrollo de los pozos ya sea por retrolavados o por purga son metodos que se usan para aumentar el flujo de agua y prevenir el tamponamiento de los veneros de arena fina.

En localidades en donde el manto acuífero es grande, y es intervenido por varios pozos, puede suceder que el agua proviniente de ellos tengan muy poca variación en su composición, aún considerando largos periodos de tiempo. Sin embargo, este no-

es siempre el caso, ya que en muchas áreas los pozos que penetran a la misma profundidad pueden encontrarse con diferentes mantos acuíferos y dar agua de distinta composición.

En general debe esperarse que en un área dada el pozo de mayor profundidad dara un agua mas mineralizada que la obtenida en pozos poco profundos y la composición de el agua de un pozo dado variará dentro de estrechos límites por periodos de tiempo muy largos.

Tabla 1.3 .- Análisis de agua de 5 pozos diferentes (ppm).

Pozo	Fecha	alc.	CO ₃	HCO ₃	Cl	SO ₄	Ca	Mg	Fe	Na	SiO ₂	Dza.	S.Tot.	NO ₃ .
Mex.1	25-I-90	172	0	210	20	35	24	21	0	43	77	144	300	6.0
Mex.1	9-I-91	172	0	210	14	37	22	22	0	41	73	148	300	7.0
Mex.1	13-I-92	167	0	200	11	27	20	20	0	37	98	131	280	7.0
Mex.2	25-I-90	144	0	176	22	10	17	13	0	41	77	94	250	2.0
Mex.2	18-I-91	160	0	195	18	13	18	14	0	45	76	102	258	3.2
Mex.2	13-I-92	142	0	173	20	9	15	13	0	42	84	91	244	3.5
Mex.3	25-I-90	196	0	220	28	48	31	23	0	49	75	184	360	10.0
Mex.3	13-I-92	171	0	209	20	38	25	22	0	43	80	154	290	8.4
Son.1	28-I-92	179	0	218	225	46	44	8	0	189	47	145	660	14.0
Son.2	28-I-92	189	0	220	296	44	53	15	0	210	49	194	742	12.0
Guad.1	4-VI-90	79	0	96	19	42	11	3	0	60	106	41	296	26.0
Guad.2	4-VI-90	79	0	96	24	46	16	6	0	54	114	64	300	29.7

La tabla 1.3 nos muestra el análisis de siete pozos, tres localizados en la ciudad de México, dos en Sonora, y dos en Guadalajara. Los análisis se realizaron en periodos de un año mas o menos para la ciudad de México y los de Sonora y Guadalajara son análisis de la misma fecha. El objeto de esta tabla es mostrar que los constituyentes del agua de pozo mantienen una composición casi constante aún en periodos de tiempo largos y también que las cantidades de sus constituyentes dependen de la zona donde se encuentren.

CAPITULO II.

PROBLEMATICA EN LA INDUSTRIA.

CAPITULO II .

PROBLEMATICA EN LA INDUSTRIA .

El agua en su transporte o durante el uso que se le da puede causar a los diferentes materiales con los que se pone en contacto, alteraciones de diversa naturaleza, entre las cuales la mas frecuente es la corrosión de los metales, especialmente del acero también puede producir otras alteraciones, como las incrustaciones en el equipo de proceso.

Es necesario conocer los procesos elementales de alteración y sus parámetros comunes con el fin de tener una orientación sobre las medidas que deben tomarse, tales como la modificación de las características químicas de las aguas, aplicación de un revestimiento al material utilizado, o empleo de un material mas resistente, etc.

2.1.- MECANISMO ELECTROQUIMICO DE LA CORROSION DEL HIERRO .

El agua ataca siempre al hierro ya que termodinámicamente, los dos cuerpos no presentan ningún aspecto en común de estabilidad; sin embargo la cinética del proceso que siempre es electroquímica, es muy diferente según haya o no presencia de oxígeno; a este segundo caso corresponde la corrosión por hidrógeno.

2.1.1.- Procesos electroquímicos .

Todo metal sumergido en una solución de electrolito tiende a poner en solución sus iones que son electropositivos, quedando el mismo cargado negativamente. Se obtiene así un electrodo cuyo potencial se expresa en terminos absolutos por la relación de NERST:

$$E = (RT/nF)(\ln P/p) = (RT/nF)(\ln C/c)$$

en la que

n= valencia de los iones metálicos considerados.

T= temperatura absoluta.

- R= constante de los gases perfectos.
 P= presión de disolución del metal.
 p= presión osmótica de la solución.
 c= actividad de los iones metálicos en la solución.
 C= cte. que define la concentración de iones en el metal.
 F= número de Faraday.

A este potencial se le llama normal cuando se refiere a una solución normal del ion-considerado; expresándose como E_0 se tiene la relación general que define el potencial de electrodo de un metal a 25°C como:

$$E = E_0 + (0.58/n)(\log C)$$

por analogía, si se considera una fase de hidrógeno, el potencial del electrodo normal gaseoso correspondiente puede escribirse como:

$$E_H = 0.058 \log H^+ = - 0.058 PH$$

En la práctica, los potenciales normales solo pueden medirse con relación a un electrodo gaseoso de referencia, denominado electrodo normal de hidrógeno, cuyo valor E_{H_0} se toma como referencia igual a cero.

Tabla 2.1

Escala de NERNST.

de los potenciales normales de equilibrio con relación al electrodo normal de hidrógeno, a 25°C (metal sumergido en una solución normal de una de sus sales).

Metal	Reacciones en el electrodo	potencial de equilibrio (Voltios)
Magnesio	$Mg = Mg^{2+} + 2e^-$	-2.340
Berilio	$Be = Be^{2+} + 2e^-$	-1.700
Aluminio	$Al = Al^{3+} + 3e^-$	-1.670
Manganeso	$Mn = Mn^{2+} + 2e^-$	-1.050
Cinc	$Zn = Zn^{2+} + 2e^-$	-0.760
Cromo	$Cr = Cr^{3+} + 3e^-$	-0.710
Hierro	$Fe = Fe^{2+} + 2e^-$	-0.440

continuación tabla 2.1.

Metals	Reacciones en el electrodo	Potencial de equilibrio (Voltios)
Níquel	$\text{Ni} = \text{Ni}^{2+} + 2\text{e}^{-}$	-0.250
Plomo	$\text{Pb} = \text{Pb}^{2+} + 2\text{e}^{-}$	-0.126
Hidrógeno	$\text{H}_2 = 2\text{H}^{+} + 2\text{e}^{-}$	0.000 por convenc
Cobre	$\text{Cu} = \text{Cu}^{2+} + 2\text{e}^{-}$	+0.344
Cobre	$\text{Cu} = \text{Cu}^{+} + \text{e}^{-}$	+0.522
Plata	$\text{Ag} = \text{Ag}^{+} + \text{e}^{-}$	+0.800
Platino	$\text{Pt} = \text{Pt}^{2+} + 2\text{e}^{-}$	+1.200 aprox.
Oro	$\text{Au} = \text{Au}^{3+} + 3\text{e}^{-}$	+1.420
Oro	$\text{Au} = \text{Au}^{+} + \text{e}^{-}$	+1.680

Por lo tanto para el hierro:

$$E = -0.44 + 0.29 \log \text{Fe}^{2+}$$

En este cuadro se define la clasificación teórica de los metales según su potencial teniendo los metales nobles un potencial positivo y los metales no nobles un potencial negativo. Se dan en el mismo, potenciales determinados en condiciones teóricas pudiendo ser diferentes a los potenciales reales medidos, según la calidad de los metales y sobre todo los procesos de electrodo. En efecto, al proceso anterior de disolución del metal puede oponerse otro proceso que tiene lugar en zonas más nobles del mismo metal sumergido en el mismo electrolito.

Este electrodo más noble, determina la creación de una diferencia de potencial en el medio y el establecimiento de una corriente eléctrica que mantiene la reacción de disolución del electrodo metálico o corrosión.

Según haya ausencia o presencia de oxígeno los procesos evolucionan de forma muy diferente.

2.1.2.- Corrosión en medio desaireado o corrosión por hidrógeno

El proceso opONENTE es un proceso de electrodo gaseoso de hidrógeno, en el que el hidrógeno gaseoso se forma a partir de los iones H^+ presentes en el agua:

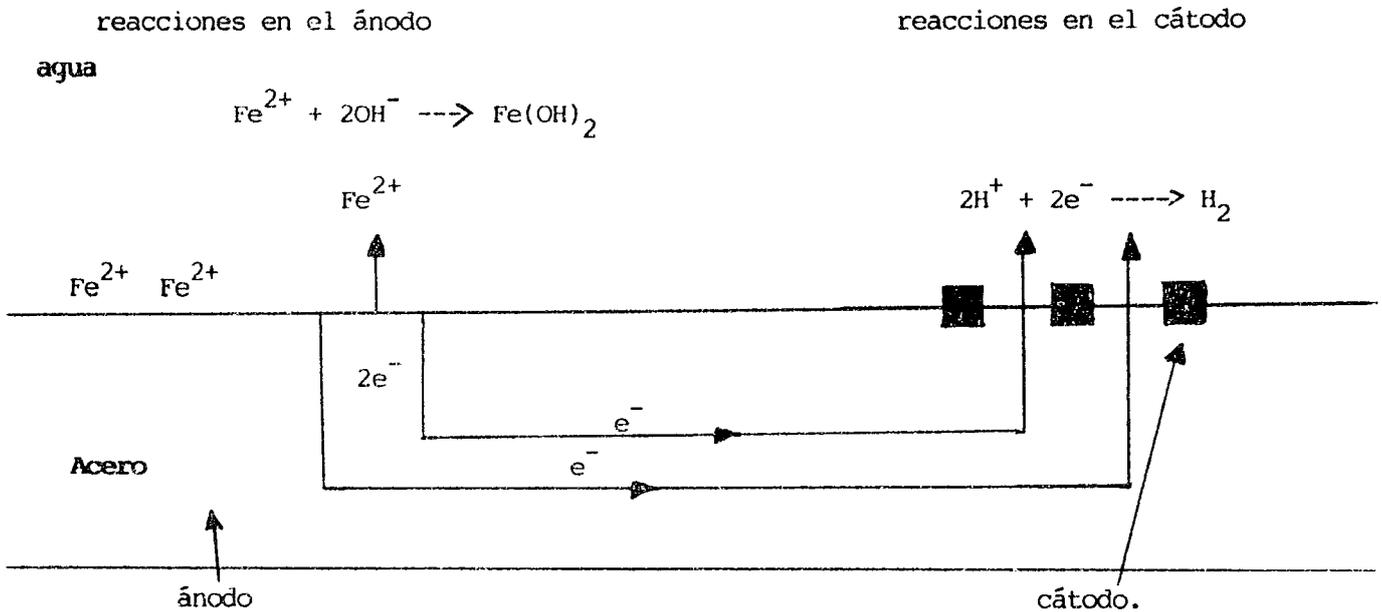
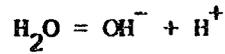


Figura 2.1. Corrosión en medio desaireado o por hidrógeno.

La corrosión por hidrógeno es esencialmente electroquímica. En ella se definen dos polos, uno eléctropositivo y otro electronegativo llamados cátodo y ánodo entre los cuales circula una corriente eléctrica.

En el ánodo se produce una disolución del metal u oxidación, mientras que el cátodo se encuentra protegido contra la corrosión. Esta disolución sólo puede referirse a metales cuyos potenciales prácticos en el electrolito son menores que el potencial del cátodo de hidrógeno que se les opone localizándose:

- Sobre un metal más noble que el metal anódico.
- Sobre una impureza extraña (óxidos, suciedad).
- Sobre una irregularidad de textura cristalina del metal.

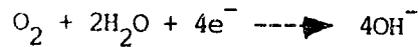
La corrosión se desarrolla de forma indefinida, en tanto no quede limitada por la

ausencia de iones H^+ a PH elevado o por la saturación del medio en iones Fe^{2+} que da lugar a la formación de un deposito protector por precipitación de hidróxido ferroso que detiene en principio la corrosión. Ya que el electrolito arrastra el precipitado.

Morfológicamente la corrosión por hidrógeno se manifiesta en forma de una corrosión bastante uniforme del metal, lo cual se debe a la presencia de una infinidad de cátodos y de ánodos que coexisten y que incluso pueden presentar una alternancia de polos.

2.1.3.- Corrosión por oxígeno.

En el agua aireada, el proceso complementario de electrodo se produce por el oxígeno presente.

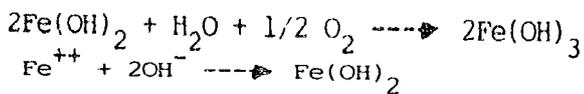


Este electrodo puede absorber electrones y comportarse como un cátodo.



O_2
(difusión lenta)

reacciones en el ánodo



reacciones en el cátodo

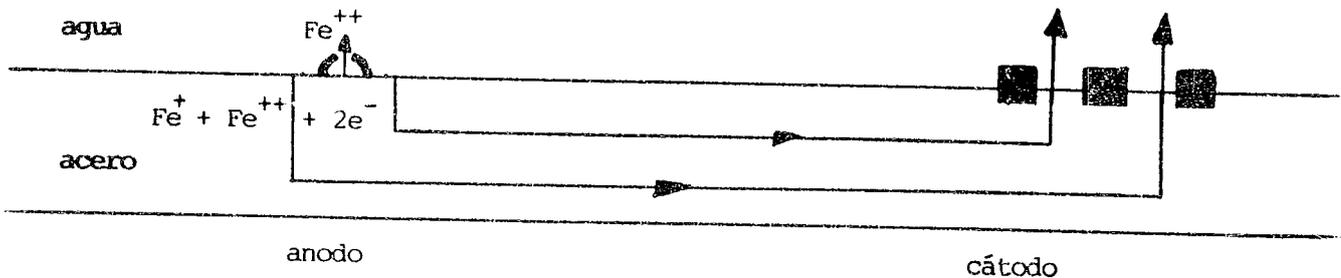
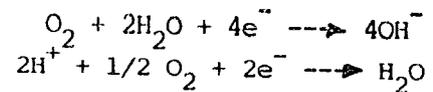


Fig. 2.2.- Corrosión en medio aireado.

Aquí el potencial de equilibrio es función de :

- a) la concentración de los iones OH^- y del PH.
- b) la presión parcial del oxígeno.

$$E' = E_0 - (RT/F) \ln(\text{OH}^-) + (RT/4F) \ln P_{\text{O}_2}$$

La corrosión se produce cuando este potencial es superior al del electrodo metálico, y cuando el oxígeno esta disuelto en el agua, cuanto más elevada sea la concentración de oxígeno disuelto, más elevada será el potencial de electrodo.

Así de forma aparentemente paradójica, la falta de oxígeno en una zona de un metal la hace anódica, y por tanto, corrosible con relación al resto de la superficie, que se encuentra protegida por el oxígeno, se comprende entonces el efecto nocivo de los depósitos de toda naturaleza, los cuales, al frenar la difusión de oxígeno sobre las superficies subyacentes, desarrollan en las mismas una zona anódica.

En el cátodo de oxígeno, la liberación de los iones OH^- aumenta el PH del agua, por lo menos en la proximidad inmediata de la superficie metálica. Además, los iones Fe^{2+} en presencia de oxígeno se oxida Fe^{3+} . Ahora bien el óxido férrico, $\text{Fe}(\text{OH})_3$, es poco soluble, por ello, los productos de corrosión en el caso de un medio aireado, se acumulan alrededor del ánodo en lugar de ser arrastrados por el agua, dejando una superficie limpia como sucede en una corrosión en medio no aireado.

Dichos productos forman la conocidas "pustulas" que se oponen a la difusión del oxígeno y refuerzan el caracter anódico de la superficie recubierta. Así se explican las perforaciones producidas en la corrosiones por oxígeno.

Del mecanismo anterior, se deduce también que las partes del metal exentas de oxígeno disuelto tales como los huecos de roscados, recodos, fisuras, etc. constituyen zonas anódicas, mientras que las que se encuentran en presencia de oxígeno disuelto constituyen zonas catódicas.

Igualmente puede establecerse una diferencia de potencial entre zonas dentro de la película líquida en las que exista un gradiente de concentración en oxígeno disuelto de aquí se caracteriza la presencia de un gran número de micropilas elementales constituidas por una **aeración diferencial** que pueden generalizarse a todas las diferencias que presenten las piezas metálicas causadas por su naturaleza, su construcción, su estado de ensuciamiento o por simples desviaciones de temperatura.

El desarrollo del proceso de corrosión por aeración diferencial al nivel de la capa interfacial, se rige esencialmente por la **solubilidad** del oxígeno y sobre todo por su **velocidad de difusión**, la cual debido a su lentitud favorece la corrosión.

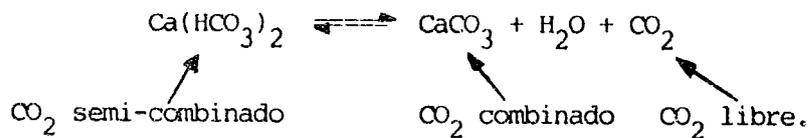
La solubilidad del oxígeno es función de la temperatura y de la presión parcial que es pequeña a temperaturas elevadas pero nunca se anula.

La velocidad de difusión del oxígeno es función de la temperatura, de la velocidad de circulación del agua y tiene gran importancia en el proceso de auto-protección.

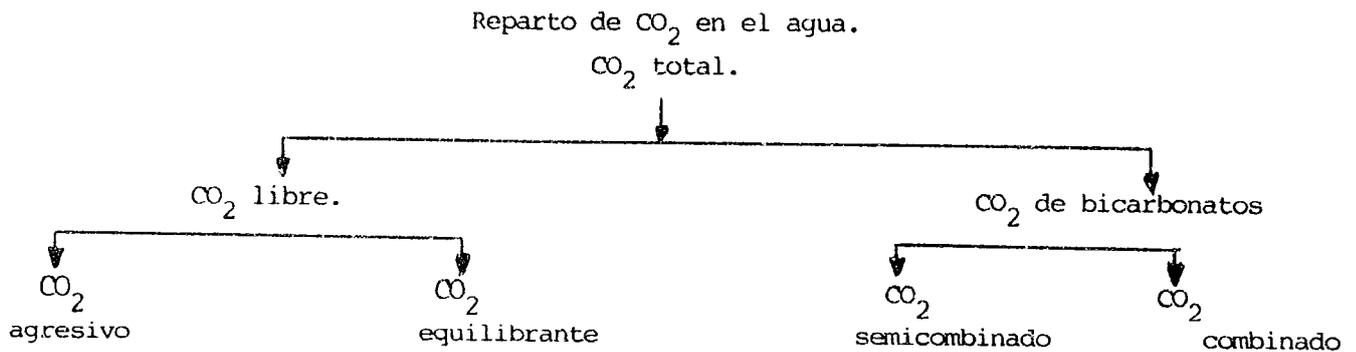
2.2.- Acción del dióxido de carbono.

Las aguas no son puras y contienen diferentes elementos químicos disueltos, entre los cuales el más frecuente es el bicarbonato cálcico. El equilibrio práctico de esta sal con el CO_2 se rige por leyes bastantes complejas y su desplazamiento puede dar lugar a reacciones químicas de disolución de carbonato cálcico que pueden superponerse a las reacciones simples electroquímicas de corrosión específicas de los metales.

El bicarbonato cálcico que existe en disolución acuosa es inestable y tiende a formar ácido carbonico y a precipitar carbonato cálcico causando incrustaciones.



para mantener el bicarbonato cálcico en solución es necesario introducir una cierta cantidad de CO_2 , llamado equilibrante que hace retroceder la reacción de precipitación.



Un agua natural puede contener CO_2 libre en cantidad superior a la necesaria para mantener el bicarbonato cálcico en solución, este excedente es el CO_2 agresivo.

Si el CO_2 libre es inferior al CO_2 equilibrante, el agua es incrustante; Langelier calculó el PH de equilibrio o de saturación PH_s de un agua partiendo de cuatro parámetros:

- (Ca^{2+}) Contenido en calcio.
- (HCO_3) Concentración total de alcalinidad.
- La salinidad total (sólidos solubles totales).

-La temperatura que influye sobre PK_s y PK_2 .

Obteniendo que:

$$PH_s = PK_2 + PK_s - \log(Ca^{2+}) - \log(HCO_3^-) .$$

por lo tanto Langelier estableció que un índice de saturación I_s igual a la diferencia entre el PH medido de un agua considerada y su PH_s calculado:

$$I_s = PH - PH_s$$

si $PH < PH_s$, I_s es negativo y el agua es agresiva.

si $PH > PH_s$, I_s es positivo y el agua es incrustante.

en el método de Langelier el HCO_3^- se sustituye por la alcalinidad en $CaCO_3$ y la fuerza iónica por la concentración total de sales disueltas, estas concentraciones se expresan en mg/l.

2.3.- Factores secundarios de la corrosión.

Aunque el equilibrio carbónico y el contenido de oxígeno son dos factores principales que determinan las condiciones de corrosión, intervienen también otros factores como la presencia de sales disueltas, las variaciones de temperatura, el estado de limpieza física de las aguas y la presencia de microorganismos.

2.3.1.- Influencia de la mineralización.

La velocidad de corrosión de hierro en un agua desmineralizada muy pura en presencia de oxígeno es mínima. Sin embargo la disolución de sales en dosis muy pequeñas provoca el fenómeno de la corrosión debido a varios procesos :

2.3.1.1.- La mineralización global de un agua aumenta su conductividad y disminuye por ello la resistencia a la corriente de corrosión. Así los iones tales como Cl^- , Br^- , SO_4^{--} , NO_3^- en concentraciones de menos de un mg/l pueden disminuir las sobretensiones y en estas condiciones el acero exige menos energía para disolverse, de manera que la absorción de estos iones sobre las zonas anódicas facilitaría la migración del hierro hacia la solución.

2.3.1.2.- La influencia de los **cloruros** es muy marcada durante el proceso inicial

de la corrosión, se produce un aumento de la concentración de la zona anódica en iones Cl^- conducidos por la corriente, así como la aparición de iones H^+ por precipitación de iones OH^- en forma de hidróxido ferroso, lo que produce una concentración local importante en iones H^+ y Cl^- , que impiden la precipitación de los hidróxidos.

El aumento del contenido de Cl^- en un agua incrementa estadísticamente la probabilidad de que se constituya una infinidad de macro-ánodos que provoque el desarrollo de una corrosión generalizada y por picaduras, explicando así la aparición de picaduras en línea, en el sentido del paso de los fluidos, que se observa en el interior de tuberías que son debidas al desplazamiento de las concentraciones locales de HCl .

2.3.1.3.- Influencia de los Sulfatos.

Se manifiesta de tres formas:

- a) directamente por incremento de la mineralización y disminución de la resistividad eléctrica.
- b) Indirectamente por participación en el ciclo de la bacterias sulfato-reductoras y en el desarrollo de corrosiones biológicas (ver punto 2.3.3.1 inciso "c").
- c) En un proceso especial de degradación del hormigón.

2.3.2.- Influencia de la temperatura en las aguas aireadas.

2.3.2.1.- Por debajo de los 60°C .

En recipientes cerrados el calentamiento provoca la inestabilidad del agua, la incrustación y seguidamente la estabilización del equilibrio cal-carbónico pero también un aumento simultáneo de la corrosividad frente al acero.

Inversamente la refrigeración de un agua recalentada y equilibrada por depósito de CaCO_3 al volver a su temperatura inicial la hace agresiva y así mismo más corrosiva en este caso la ausencia de calcificación permite el desarrollo de la corrosión.

En una red industrial no cerrada se desarrollan dos procesos:

- a) Efecto químico.

se desarrollan los mismos procesos que un recipiente cerrado, pero el equilibrio puede desplazarse por pérdida de CO_2 , en el sentido de un elevado carácter incrustante.

- b) Efecto electroquímico.

La coexistencia posible de zonas calientes (en la que el PH es mayor) determina concentraciones en H^+ que varían en sentido inverso y crea una superficie heterogénea con-

zonas anódicas calientes y zonas catódicas frías.

De esta forma, una diferencia de temperatura de 20°C puede producir una diferencia de potencial de 55mV.

También la formación de bolsas de gas carbónico y de películas de agua de condensación de menor salinidad, provoca la creación de zonas anódicas.

2.3.2.2.- Por encima de 60°C.

Se produce un fuerte desprendimiento de oxígeno que da lugar a la formación de pares de aereación diferencial muy superior, desarrollando una gran corrosión.

2.3.3.- Influencia de los microorganismos.

La corrosión biológica es en general, una manifestación secundaria que caracteriza normalmente por la formación de concreciones en forma de tubérculos muy juntos que provocan obstrucciones y a veces picaduras subyacentes, que pueden producir perforaciones.

Estas concreciones están constituidas por acumulaciones de ferrobacterias filamentosas recubiertas de óxido ferrico parcialmente deshidratado.

La masa tuberculiforme laminar está generalmente hueca en su interior conteniendo en su corazón una masa líquida a veces muy negra, que se oxida rápidamente con el aire atmosférico.

2.3.3.1.- Medios bacterianos activos.

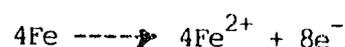
a) Bacteria del hierro:

Son del tipo Leptothrix, Crenothrix y gallionella, viven en medio aerobio y emplean su energía de síntesis en el consumo de hierro ferroso y se oxida a hierro férrico.

Mediante la secreción de enzimas, aceleran esta oxidación que es lenta, empobrecen el medio en oxígeno y despolarizan los ánodos incrementando las causas que favorecen la corrosión.

b) Bacterias que oxídan el hidrógeno naciente.

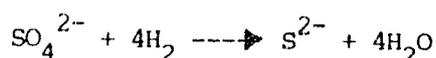
Son del tipo hydrogenomonas autotrofas y toman de la oxidación del hidrógeno catódico su energía de síntesis.



Tienen igualmente una acción despolarizante sobre el cátodo, que favorece la corrosión.

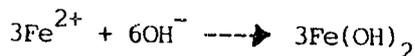
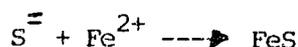
c) Bacterias sulfato-reductoras.

Son del tipo desulfobrio desulfuricans, son bacterias anaerobias facultativas que pueden resistir temporalmente la saturación del agua en oxígeno, lo que explica su presencia en los circuitos de refrigeración, son autótrofas y favorece la formación de sulfuro de hidrógeno por reducción de los sulfatos a partir de hidrógeno tomado en las zonas catódicas.

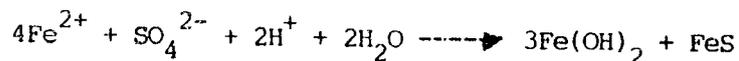


Los sulfuros liberados por la reducción de los sulfatos precipitan los iones ferrosos en forma de sulfuro de hierro negro.

La formación de diversos productos de corrosión son los siguientes:



siendo la reacción global:



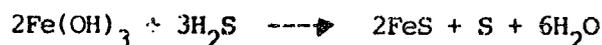
Conviene subrayar que la corrosión biológica en casi siempre posterior a una corrosión electroquímica la cual se acelera por el consumo de hidrógeno.

Las condiciones favorables de la corrosión biológica por las bacterias del azufre son las siguientes:

- medio anaerobio
- PH de 5.5 a 8.5
- presencia de sulfatos
- Presencia de sustancias minerales (PO_4^{3-} y Fe^{2+}) y orgánica favorables al desarrollo de las bacterias.
- Temperatura óptima de desarrollo de 30 a 40 °C.

El consumo de oxígeno en la superficie de los tubérculos disminuye la difusión de este gas hacia el interior de los mismos, donde se produce un estado creciente de anaerobiosis que favorece el desarrollo de las bacterias reductoras.

La formación de sulfuros provoca la precipitación de sulfuros de hierro y también la reducción del hidróxido ferrico.



se produce una contracción del volumen en el interior del tubérculo por transformación del hidróxido férrico en sulfuro de hierro más denso.

Por lo tanto la corrosión biológica consiste en el desarrollo de la asociación formada por las familias de bacterias mencionadas.

2.3.4.- Degradación del hormigón.

El hormigón es un material constituido por cemento y granulados diversos que generalmente recubre una armadura de acero

En principio, la corrosión de esta armadura sólo es posible después de la degradación del recubrimiento, debido al carácter electropositivo del hierro en el hormigón armado cuyo PH es aproximadamente de 11.6 que es del orden de +100 mV con relación al electrodo de hidrógeno por lo tanto, las medidas de prevención deben referirse en primer lugar al hormigón salvo en caso de hormigón pretensado en el que los elevados esfuerzos y la finura de las armaduras exponen a estas frecuentemente a una rotura bajo tensión y a la corrosión química por agua de infiltración. Las fases de degradación del hormigón son en primer lugar de origen mecánico y seguidamente de carácter químico.

2.3.4.1.- Causas mecánicas.

Son de tres tipos:

- a) Permeabilidad excesiva, una condición mínima en presencia de aguas agresivas, será la obtención de una compacidad muy elevada, con dosificación de 300 a 400 kg/m³.
- b) Existencia de caverna y fisuras debidas a unas condiciones deficientes de elaboración que pueden mejorarse aumentando la plasticidad del hormigón mediante una dosificación agua/cemento inferior a 0.45 o con el empleo de un plastificante.
- c) Erosion debida a velocidades de circulación del agua superiores a 4m/s o a gradientes térmicos demasiado fuertes.

2.3.4.2.- Causas químicas.

Están ligadas a la composición de los cementos y a la corrosión de las aguas. Los cementos están compuestos principalmente por sílice, cal, alúmina y en proporción menor por hierro, magnesio y alcalinos, esta composición define un medio generalmente muy básico, que encierra una gran reserva de sales solubilizables.

Durante el fraguado especialmente en el caso de cemento portland, se produce una liberación importante de cal en forma de Ca(OH)_2 y una formación de aluminato tricalcico.

La degradación química puede manifestarse de varias formas:

a).- Agresividad carbónica.

El ataque de las estructuras por dióxido de carbono se produce cuando se encuentran en contacto con agua dulce o cuando el contenido de CO_2 es superior a 15 mg/l. Pero la reserva de alcalinidad en cal dentro de los poros del hormigón es elevada y permite la precipitación de un depósito de CaCO_3 y otras sales que aminoran temporalmente la velocidad de destrucción del hormigón por estas aguas.

b).- Ataque por acidez fuerte

Este ataque grave cuanto más soluble son las sales de calcio formadas y la presencia de los ácidos fosforico, sulfurico, nítrico y clorhídrico, aumentan la corrosividad.

Los ácidos orgánicos son igualmente nocivos, en el caso de acidez moderadamente fuerte se mejora la resistencia a la corrosión disminuyendo la relación agua/cemento y/o utilizando cementos aluminosos, esto es valido para PH superiores a 2.

Por otra parte, algunas legislaciones relacionadas al vertido de aguas residuales mencionan que el PH del agua que circula en contacto con las paredes se mantenga entre 4.5, 5.5 y 9.0.

c).- Acción del amoníaco.

La presencia de amoníaco en aguas residuales puede intervenir en los procesos de destrucción del hormigón de dos formas:

1).- Por desarrollo de reacciones nitrificantes y acidificantes, que sólo pueden tener lugar en medio aerobio, por ejemplo en refrigerantes atmosféricos.

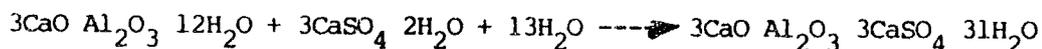
2.-) Por desprendimiento del amoníaco desplazado por la cal que acelera la solubilización de ésta y provoca la degradación rápida del cemento.

Las sales magnésicas y las de cualquier base mas débil que la cal pueden dar lugar al mismo proceso. Deben evitarse las concentraciones demasiado elevadas de NH_4^+ y de Mg^{2+} especialmente cuando exista la presencia de sulfatos.

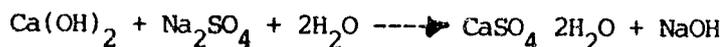
d).- Acción de los sulfatos.

Esta acción que afecta a numerosos casos se basa en la transformación del sulfato cálcico en sal de Candlot expansiva.

- Transformación de los aluminatos del cemento en sal de Candlot muy expansiva.



- Sulfatación de la cal libre del cemento por los sulfatos disueltos en el agua:



En presencia de magnesia, la descomposición de los silicatos alcalinos del cemento puede añadirse igualmente a los dos mecanismos anteriores.

A continuación se citan valores límites para la apreciación de la agresividad de aguas salinas frente a los hormigones clásicos.

	agua débilmente agresiva	agua fuertemente agresiva	agua muy fuertemente agresiva
- PH	6.5 - 5.5	5.5 - 4.5	menos de 4.5
- CO_2 agresivo mg/l	15 - 30	30 - 60	mas de 60
- iones amonio mg/l	15 - 30	30 - 60	mas de 60
- iones magnesio mg/l	100 - 300	300 - 1500	mas de 1500
- iones sulfato mg/l	200 - 600	600 - 2500	mas de 2500

e) Ataque por alcalinidad fuerte (NaOH, KOH, Na_2CO_3).

Esta alcalinidad fuerte perjudica a todos los cementos, debido al peligro de solubilización de ciertos constituyentes a base de alúmina y en ausencia de recubrimiento, se aconseja que no se admitan aguas con PH superior a 12 si se trata de cementos comunes, y con PH superior a 8.5 si se trata de cementos aluminosos.

f) Corrosión bacteriana con formación de H_2S .

El mecanismo de este tipo de corrosión en medio anaerobio, en el caso de aguas fecales o muy sucias, procede generalmente el proceso de fermentación anaerobia de materias depositadas que comprende dos fases.

- Formación y liberación de H_2S .
- Oxidación de H_2S en presencia de agua y formación de H_2SO_4 .

Estas reacciones se aceleran tan pronto como el PH baja a 6 y tanto más caliente este el agua.

En alcantarillado, el ataque se efectúa por encima del agua, debido a su desgasificación y a su condensación.

Estas corrosiones sólo pueden evitarse manteniendo unas velocidades de paso elevadas mediante la decantación previa de las aguas y preaeración, evitando turbulencias y desgasificación en las tuberías.

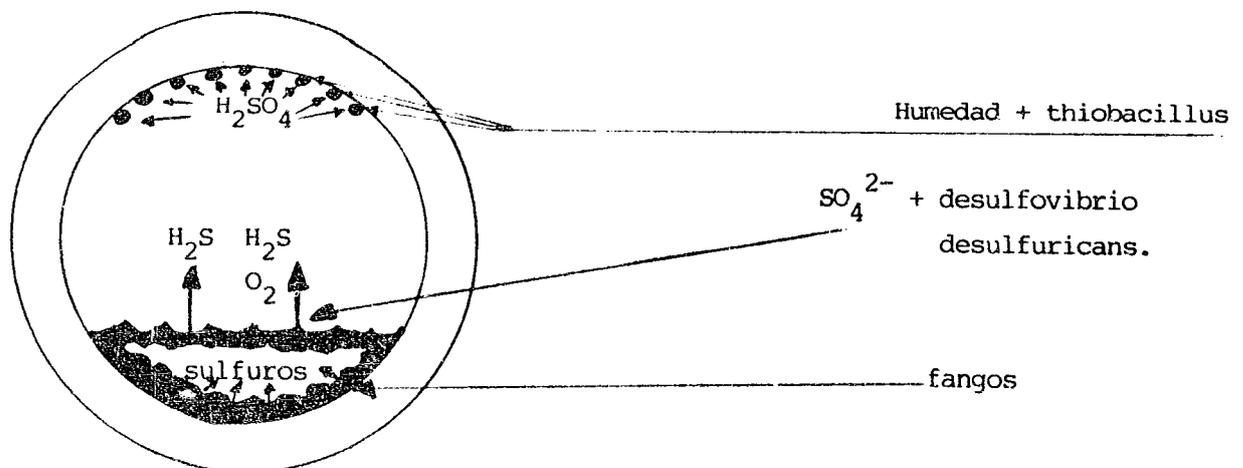


Fig. 2.3.- Mecanismo de ataque de un tubo de saneamiento por sulfuro de hidrógeno.

2.3.5.- Corrosión de aceros inoxidables.

Convencionalmente se llama acero inoxidable a una aleación hierro-cromo cuyo contenido en cromo es superior a 11.5 %.

El hierro aleado con cromo se hace pasivo en un gran número de medios, su carácter inoxidable da una estabilidad máxima de esta pasivación en un medio oxidante sin embargo en un medio reductor puede no existir. Esta pasivación se debe a la formación de una fina película de óxido de cromo.

Toda rotura accidental de esta película protectora dará lugar a fenómenos de corrosión salvo en medios netamente oxidante en el que la película volverá a formarse por sí sola. La adición de níquel aumenta la resistencia a la corrosión en los medios poco o nada oxidantes, mientras que el molibdeno la mejora en presencia de ácidos reductores o de iones halógenos (Cl^- , Br^- , I^-). Conviene señalar que la corrosión del acero inoxidable puede producirse en medio muy oxidante por ejemplo en ácido nítrico que contenga cromo hexavalente como consecuencia del fenómeno denominado transpasividad.

2.3.5.1.- Corrosión por picaduras.

Contrariamente a lo que sucede en el acero normal el oxígeno disuelto favorece la pasivación del acero inoxidable, salvo en presencia de cloruros y de bromuros, en cuyo caso se produce el fenómeno de corrosión por picaduras. Este tipo de corrosión bastante generalizado y muy peligroso se puede producir por soluciones cloruradas en medio aireado.

2.3.5.2.- Corrosión en cavernas.

Es muy reducido el número de metales que no están sujetos a este tipo de corrosión esto se manifiesta en zonas estancadas, en las que la difusiones son demasiado difíciles. Aparecen especialmente debajo de las incrustaciones, óxidos, adherencias de crustáceos bajo las juntas no metálicas.

Este proceso se inicia por un fenómeno de aireación diferencial que conduce a la formación de una pequeña célula en la que se encuentran atrapados los productos de corrosión. Si el medio corrosivo está constituido por agua aireada neutra pero con cloruros, la hidrólisis de los productos primarios de corrosión en la célula formara

ácido clorhídrico el cual, a partir de una concentración crítica, iniciara el proceso de corrosión en forma de cavernas.

La corrosión en caverna se caracteriza por un tiempo de incubación que puede alcanzar hasta varios meses, pero una vez iniciado el proceso, este puede desarrollarse de forma muy brusca. La corrosión se intensifica en este caso por la formación de pares locales entre el metal pasivo y el metal activo que produce una destrucción rápida de la capa pasivante.

Si durante el proceso de incubación los productos de corrosión son barridos por una agitación del agua, se interrumpe el proceso que sólo puede continuar partiendo nuevamente de cero.

Para evitar el máximo la corrosión en cavernas, debe eliminarse las condiciones que favorecen el desarrollo del fenómeno de aereación diferencial. Por ello es necesario evitar toda diferencia de concentración de oxígeno del medio, adoptando velocidades de circulación suficientemente elevadas (si es posible superiores a 3 m/s) para evitar la formación de depósitos.

Pueden presentarse fenómenos de corrosión galvánica en montajes heterogéneos tales como soldadura de un acero inoxidable y un acero dulce. En tal caso el acero dulce es anódico en relación con el acero inoxidable y sufre los fenómenos de corrosión por picaduras o en cavernas.

CAPITULO III.

TIPOS DE AGUA Y SU APLICACION.

CAPITULO III.

TIPOS DE AGUA Y SU APLICACION.

3.1.- CLASIFICACION.

En la industria se utiliza grandes cantidades de agua para varios propósitos, por ejemplo, como el de medio de enfriamiento de sus dispositivos y procesos, así como el de utilizarla en la producción de vapor para el calentamiento y generación de energía, de tal modo, como toda industria usa agua para la transferencia de energía también la utiliza para la transformación de materiales como agua de proceso, y para satisfacer otras necesidades como agua de servicios generales, por lo tanto, el agua dentro de la industria se clasifica según su aplicación como:

- 3.1.1.- Agua de enfriamiento.
- 3.1.2.- Agua para caldera.
- 3.1.3.- Agua para proceso.
- 3.1.4.- Agua para servicios generales.

3.1.1.- AGUA DE ENFRIAMIENTO.

3.1.1.1.- Clasificación del agua de enfriamiento.

Basadas en las condiciones de uso se pueden clasificar como:

- (a) Sistemas abiertos de un solo paso.
- (b) Sistemas de un solo paso que usan el agua de rechazo en otros sistemas.
- (c) Sistemas de enfriamiento abiertos, de recirculación.
- (d) Sistemas de enfriamiento de circulación en circuito cerrado.

a) **Sistemas abiertos de un solo paso.**- Este sistema se usa ampliamente en localidades en donde hay abundancia de agua. las fuentes de abastecimiento pueden ser un pozo profundo o aguas superficiales como ríos, lagos, lagunas o tomas de agua de mar. En cualquier

caso, debido a que el agua sólo se usará una vez el tratamiento debe ser lo más barato posible.

b).- **Sistemas de un solo paso que usan el agua de rechazo de otros sistemas.** En este caso el tratamiento del agua no sólo deberá ser de tal tipo que permita usarla para enfriamiento, sino que debe ser apta para los usos posteriores a que se destine. Estos usos posteriores variarían en diferentes industrias. En algunas en donde los balances de calor son favorables y se usan grandes cantidades de vapor, el uso posterior puede ser el de alimentar a las calderas. En otras, el uso puede ser de agua de proceso, en algunas industrias el agua de enfriamiento se usa en sistema escalonado según los potenciales de temperatura que se disponga, resultando esto en un uso más racional del agua de enfriamiento y en un ahorro sustancial del calor.

c) **Sistemas de enfriamiento abiertos con recirculación.** En este sistema el agua de enfriamiento se enfría en una torre o estanque y luego se vuelve a pasar por el equipo de enfriamiento. Teóricamente, el 1% del agua se evapora por cada 10^oF de enfriamiento efectuados en la torre o estanque de enfriamiento. Porsupuesto que actualmente las pérdidas son mayores debido al arrastre que puede ser menor del 0.3% en torres de tiro forzado o inducido y de menos de 1% en torres de tiro natural. En las torres de rocío las pérdidas pueden variar del 1 a más del 3% y en las fosas de enfriamiento las pérdidas pueden ser del 2 al 15 %. Otras pérdidas es el sistemas de purgas para mantener los sólidos solubles dentro de los límites.

Obviamente, en estos sistemas una vez que se ponen en marcha, sólo necesita tratarse el agua de compensación que usualmente es menor del 10%.

d).- **Sistemas de enfriamiento de circulación en circuito cerrado.** Los sistemas de circulación cerrada se emplean para el enfriamiento de máquinas de combustión interna y para otros usos; en estos casos el agua después de enfriar pasa por intercambiadores de calor de aire o de agua. Teóricamente no es necesaria agua de compensación, pero en la práctica es necesaria una pequeña cantidad. El agua recirculada deberá tratarse al iniciar el ciclo y lo mismo se hace con cualquier cantidad de agua de compensación que se necesite.

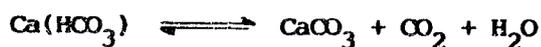
3.1.1.2.- Problemática más común del agua de enfriamiento .

En general en un sistema de enfriamiento los problemas que puede causar el agua que se utiliza como medio de enfriamiento son los siguientes :

- a) Incrustaciones.
- b) Depósitos de corrosión.
- c) Sedimentos.
- d) crecimientos orgánicos.

- a) Incrustaciones.

El principal material formador de incrustaciones en los sistemas de enfriamiento es el carbonato de calcio formado por la descomposición de bicarbonato de calcio a carbonato cálcico, bioxido de carbono y agua.



En el agua libre de bióxido de carbono, el carbonato de calcio tiene una solubilidad muy baja cerca de 15 ppm y 13 ppm a 100 °C y en aguas saturadas con bióxido de carbono a presión atmosférica y a 0°C la solubilidad es de 1620 partes de CaCO₃ formandose bicarbonato de calcio. Si esta agua se hirviera por un tiempo suficiente, el bicarbonato de calcio se descompondria hacia carbonato de calcio; el bióxido de carbono se desprenderia y puesto que la solubilidad del carbonato de calcio es unicamente de 13 ppm a 100°C, la cantidad de carbonato de calcio depositado sería de 1620 - 13 = 1607 ppm lo que es equivalente a 6.7 toneladas de incrustaciones y lodo por cada millón de galones de agua, sin embargo la aguas de enfriamiento no estan saturadas con bióxido de carbono

no contienen 1620 ppm de alcalinidad y no se calientan hasta su punto de ebullición. Muy pocas aguas de enfriamiento tendran alcalinidades de calcio de más de un cuarto de la cifra máxima de 1620 ppm y muchas tendrán alcalinidades menores de 300 ppm Las cantidades de depósitos que tales aguas pueden formar en los sistemas de enfriamiento son muy grandes y causan muchos problemas aun cuando no alcanzan más de una fracción de estas 6.7 ton. por millón de galones.

Con cualquier contenido específico de bióxido de carbono hay un equilibrio para cada temperatura , que establece la cantidad máxima de bicarbonato de calcio en solución. Aumentando la temperatura disminuye esta cantidad y la reacción anterior se deslaza hacia la derecha hasta que alcanza un nuevo equilibrio para la nueva temperatura. De aquí es evidente que para ciertas aguas altas en bicarbonato de calcio y libres de CO₂, una pequeña elevación de la temperatura es suficiente para formar depósitos.

El indice de Langelier (o índice de saturación de carbonato de calcio, es un valor

en predecir las tendencias a la incrustación del agua de enfriamiento. Para el índice es necesario tener: (1) la alcalinidad al anaranjado de metilo, (2) duraza de calcio, (3) sólidos totales aproximados, (4) pH, (5) la temperatura a la que el agua se elevará. A partir de estos datos y con ayuda de la tabla 3.1. Al calcular el índice es necesario hacer uso del sentido común y de la práctica ya que los resultados no son cuantitativos y puesto que el agua de enfriamiento pasa por equipos bastante aprisa, no hay seguridad de que llegue al equilibrio calculado.

El carbonato de magnesio en agua libre de CO_2 tiene una solubilidad de cerca de 100 ppm como CaCO_3 a 0°C y de 75 ppm a 100°C . Puesto que es casi seis veces más soluble que el carbonato de calcio y el contenido de magnesio de las aguas es de también menor que el contenido de calcio, es evidente que el magnesio juega un papel de menor importancia en los sistemas de enfriamiento en donde sólo se use el agua por una vez. Una pequeña parte puede precipitarse con el calcio y en los sistemas de circulación cerrada la concentración de la alcalinidad de Mg puede resultar en contenidos que excedan la solubilidad de carbonato.

El bicarbonato es más soluble que el carbonato de calcio, a 0°C en agua saturada con CO_2 la solubilidad es 20 veces mayor que la de bicarbonato de calcio aun en presencia de pequeñas concentraciones de CO_2 se mantendrá en solución cantidades mucho mayores de bicarbonato de magnesio que de bicarbonato de calcio.

El sulfato de calcio tienen una solubilidad de cerca de 1290 ppm a 0°C y 1250 ppm. a 100°C como CaCO_3 . En los sistemas de enfriamiento de un solo paso el sulfato de calcio no es materia incrustante. Cuando las aguas de enfriamiento se recirculan se debe tener cuidado purgar lo suficiente para mantener la concentración de sulfato de calcio baja 1200 ppm. expresado como CaCO_3 para prevenir la formación de de incrustaciones duras de sulfatos. Esto se aplica especialmente a aguas acidificadas que se recirculan.

Todas la sales de sodio, los cloruros de calcio y magnesio y el sulfato de magnesio, son extremadamente solubles, variando su solubilidad de 60000 a 500000 ppm de manera que no presenta problema de incrustación a menos que su concentración se lleve a límites increíbles.

b) depósitos debidos a la corrosión.- La forma más común de corrosión en los depósitos de hierro, es la debida a oxígeno disuelto, esta forma de corrosión se acelera notablemente por los PH bajos, de manera que el agua de baja alcalinidad y alto contenido de CO_2 libre, el ataque es mucho más rápido que en el caso contrario. usualmente este ataque

Tabla 3.1.- Datos para el calculo rápido del indice de Langelier.

Sólidos totales ppm	A	dureza de calcio ppm CaO ₃	C	Alcalinidad A.M. ppm CaO ₃	D
50 - 300	0.1	10 - 11	0.6	10 - 11	1.0
400 - 1000	0.2	12 - 13	0.7	12 - 13	1.1
		14 - 17	0.8	14 - 17	1.2
		18 - 22	0.9	18 - 22	1.3
		23 - 27	1.0	23 - 27	1.4
		28 - 34	1.1	28 - 35	1.5
		35 - 43	1.2	36 - 44	1.6
		44 - 55	1.3	45 - 55	1.7
		56 - 69	1.4	56 - 69	1.8
		70 - 87	1.5	70 - 88	1.9
		88 - 110	1.6	89 - 110	2.0
		111 - 138	1.7	111 - 139	2.1
		139 - 174	1.8	140 - 176	2.2
		175 - 220	1.9	177 - 220	2.3
		230 - 270	2.0	230 - 270	2.4
		280 - 340	2.1	280 - 350	2.5
		350 - 430	2.2	360 - 440	2.6
		440 - 550	2.3	450 - 550	2.7
		560 - 690	2.4	560 - 690	2.8
		700 - 870	2.5	700 - 880	2.9
		880 - 1000	2.6	890 - 1000	3.0

temperatura °F	B
32 - 34	2.6
36 - 42	2.5
44 - 48	2.4
50 - 56	2.3
58 - 62	2.2
64 - 70	2.1
72 - 80	2.0
82 - 88	1.9
90 - 98	1.8
100 - 110	1.7
112 - 122	1.6
124 - 132	1.5
134 - 146	1.4
148 - 160	1.3
162 - 178	1.2

AM = Alcalinidad al anaranjado de métilo.

(1).- Obtener los valores de A, B, C y D de la tabla anterior.

(2).- $pH_s = (9.3 + A + B) - (C + D)$.

(3).- **Indice de saturación** = $pH - pH_s$

Si el indice es 0, el agua esta químicamente balanceada.

Si el indice es positivo, es agua incrustante.

Si el indice es negativo, es agua corrosiva.

se denuncia por la formación de "tubérculos" que forman sobre picaduras en el metal esto reduce considerablemente el área de flujo en el equipo así como aumenta la resistencia para la transferencia de calor. Otra forma de corrosión es la ejercida por agua sulfurosa, que resulta en la formación de sulfuros metálicos. La aereación se usa para la eliminación de sulfuros de las aguas sulfurosas y reducción de CO_2 libre.

c) **Sedimentos.**- Las aguas turbias que contienen ya sea sedimentos o suspensiones, son objetables en muchos sistemas de enfriamiento pero en condensadores de superficie para vapor, tienen tubos de pequeño diámetro y en secciones rectas, estos equipos si utilizan agua turbia pueden presentar tubos limpios y brillantes debido a la acción abrasiva y en otros casos estas aguas pueden ser nocivas al producir taponamiento de estos equipos.

d) **Crecimientos orgánicos .-** Las bacterias del hierro y manganeso comúnmente llamadas "Crenotrix", pueden volverse sumamente perjudiciales en los sistemas de agua de enfriamiento que contengan hierro y/o manganeso ya que forman grandes masas que limitan el flujo en el agua. Las algas pueden ser un problema grave en la torres de enfriamiento y estanques. La deslignificación de las torres de enfriamiento puede ser causada por un desarrollo de hongos. Las bacterias del azufre comúnmente se desarrollan en los aereadores que manejan aguas sulfurosas.

Limos, esponjas, moluscos y líquenes pueden ser otros de los desarrollos orgánicos que causen taponamientos en los sistemas de enfriamiento. Algunos de estos organismos forman masas compactas cuyos depósitos a primera vista parecen de origen inorgánico. En los sistemas de enfriamiento que usan agua de mar, los moluscos y pequeños mariscos pueden causar serios problemas.

Las especificaciones del agua de enfriamiento varían tan ampliamente con diferentes clases de agua para distintos usos industriales, pero la única especificación general es que el agua no debe formar depósitos aislantes al calor ya sea de origen orgánico o inorgánico, y que no debe ser extremadamente corrosiva bajo las condiciones de trabajo.

3.1.1.3.- Tratamientos para las aguas de enfriamiento.

El agua de enfriamiento puede tratarse por cualquiera de los siguientes métodos:

(a) Coagulación, asentamiento y/o filtración, (b) Cal en frío, (c) Intercambio catiónico en ciclo sódico, (d) Cal en frío e intercambio catiónico en ciclo sódico en dos pasos, (e) Desmineralización, (f) Acidificación, (g) Eliminación de hierro y/o manganeso, clorinación y uso de sales de cobre y polifosfatos.

a).- Coagulación, asentamiento y/o filtración.-

La eliminación de la turbidez puede efectuarse por coagulación, asentamiento y filtración. Son posibles varias combinaciones, por ejemplo, la sedimentación puede ir precedida por la coagulación, o por otra parte si es objetable una poca de turbidez, se puede usar un equipo de asentamiento de cama de lodo eliminando los filtros.

El asentamiento y la coagulación pueden practicarse solos o seguirse de un intercambio catiónico o acidificación. Con el proceso de cal en frío e intercambio catiónico, se elimina también la alcalinidad.

b).- Proceso de cal en frío.

Este proceso se emplea mucho en los sistemas de agua de enfriamiento, pero casi nunca en los tipos de un solo paso. Los reactivos usados generalmente son la cal para reducir la dureza de bicarbonatos, además de alumbre como coagulante, frecuentemente seguido por una corta dosis de ácido sulfúrico para ajustar la alcalinidad del efluente a la cantidad deseada. La sosa comercial generalmente no se utiliza, ya que la reducción de la dureza de carbonato (o sulfato) resulta un gasto innecesario para un sistema recirculante. En los sistemas de enfriamiento de un paso en los que el agua se usa posteriormente en otros sistemas, se hace necesario el control de la dureza de no carbonatos, por lo que generalmente se usa un proceso en dos pasos: cal en frío e intercambio catiónico

c).- Intercambio catiónico en ciclo sódico

Este proceso se usa en los sistemas de recirculación y en los sistemas abiertos de un solo paso con uso posterior del agua en otros sistemas y nunca se usa en los sistemas de un solo paso, además de que elimina prácticamente toda la dureza. El equipo de intercambio catiónico tiene la ventaja de su facilidad de manejo y simplicidad. Las sales de calcio y magnesio que se forman son extremadamente solubles de manera que la purga no se basa en el contenido de sulfatos, traduciendo esto en un ahorro considerable de agua. En el caso de aguas claras de pozo profundo que contengan hierro

o manganeso, se eliminarán junto con la dureza, en el caso de aguas turbias de superficie, la turbidez deberá eliminarse, antes del intercambio por coagulación, asentamiento y filtración.

d).- Cal en frío e intercambio catiónico en dos pasos.

En este proceso el agua primero se trata con cal y el efluente claro se pasa por las unidades de intercambio catiónico en ciclo sódico. Este proceso tiene la ventaja de dar un agua completamente blanda de baja alcalinidad y menor contenido de sólidos totales.

Indudable este proceso es mas usado en los sistemas de enfriamiento de un paso y uso posterior del agua en otros procesos, ya que generalmente en éstos se desea un agua de baja alcalinidad y sólidos disueltos.

e).- Desmineralización

El proceso de desmineralización por intercambio iónico se usa solamente en circuitos cerrados recirculantes en donde se requiere un agua de alta pureza. Se usa en el agua de enfriamiento de ciertos procesos electroquímicos, agua de enfriamiento de calderas que trabajan a presiones supercríticas, limitadamente para equipo de investigación, etc.

f).- Acidificador.

El ácido que generalmente se usa en este proceso es casi siempre ácido sulfurico. También se puede utilizar ácido clorhídrico, pero el costo hace su uso más limitado, este tratamiento se basa en que los sulfatos de calcio y magnesio son mucho más solubles que sus carbonatos. El carbonato de calcio principal formador de costras tienen una solubilidad de 15 a 13 ppm. de 0 a 100 °C, el sulfato de calcio tiene una solubilidad no menor de 1250 ppm como CaCO_3 aun cuando el carbonato de magnesio tiene una solubilidad de 100 a 75 ppm y el hidróxido de magnesio de 8 a 17 ppm y el sulfato de magnesio tiene una solubilidad de 170,000 a 356,000 ppm en el mismo rango, todo como CaCO_3 . De aquí que si en un sistema de enfriamiento todos los carbonatos se cambian a sulfatos, no se formara ninguna incrustación si la purga del sistema mantiene a los sulfatos a menos de 1250 ppm En la práctica no toda la alcalinidad se neutraliza con ácido sino que se mantiene una pequeña alcalinidad de calcio para que se forme una película delgada de carbonato de calcio e inhibir así la corrosión.

El tratamiento anterior se aplica a sistemas de recirculación, pero si se usa para

sistemas abiertos de un solo paso, la cantidad de ácido empleado es menor ya que como opera a presión, la acción disolvente de bióxido de carbono, liberado por la acción sobre los bicarbonatos, es retenida en vez de que el bióxido de carbono se pierda en el como sucede en un sistema recirculante. En los sistemas de un solo paso el aire tratamiento con ácido sulfúrico es el más barato.

g).- Eliminación de hierro y manganeso.

Si el agua es de pozo profundo, clara y desaireada, el hierro y/o manganeso, puede eliminarse simultáneamente con la dureza en un intercambiador catiónico. En el proceso de cal en frío e intercambio catiónico en dos pasos el hierro y/o manganeso se elimina en el primer paso aireando el agua antes de entrar al equipo de tratamiento con cal. Si solamente debe eliminarse el hierro y/o manganeso solo se requiere aereación y adición de un material alcalino para aumentar el PH y posteriormente un asentamiento y filtración. Para el tratamiento de aguas que contienen hierro y manganeso orgánicos se requiere coagulación, asentamiento y filtración.

Aereación.- Como se menciona arriba, la aereación se usa en la eliminación del hierro y/o manganeso presentes como sus bicarbonatos divalentes, también se practica para la reducción de contenido de sulfuros de las aguas sulfurosas y reducción del CO_2 libre.

h).- Tratamiento con cloro y sulfato de cobre.

El cloro se usa ampliamente para inhibir los crecimientos orgánicos en los sistemas de enfriamiento. De una manera más reducida, el sulfato de cobre se emplea para inhibir el crecimiento de algas, en muchos casos se emplean ambos tratamientos, el sulfato de cobre en una forma intermitente y el cloro más o menos estable.

i).- Tratamiento por fosfatos.

En sistemas de enfriamiento de un solo paso a menudo se emplean polifosfatos para evitar la formación de depósitos. Posiblemente son más aplicables a aguas de enfriamiento que no sean muy alcalinas o de un PH muy alto, y que no estén sujetas a un gran aumento en la temperatura.

3.1.2 .- AGUA PARA CALDERA .

3.1.2.1.- Inconvenientes producidos por las impurezas del agua.

Todas las aguas naturales dejan residuos de materia mineral en la evaporación que son menos solubles a elevadas temperaturas produciendo depositos o corrosiones. En los dispositivos de calentamiento como son las calderas , estos inconvenientes causan la perdida de eficiencia en la transmisión de calor o fallas internas debido al sobrecalentamiento por la presencia de depositos o incrustaciones. La operación de las calderas modernas demanda la eliminación de todos estos inconvenientes hasta el punto de obtener la máxima eficiencia y economía en la operación.

3.1.2.1.1.- Depositos y corrosión.

En las calderas suceden dos clases de depositos: Los adherentes llamados incrustación y los no adherentes o lodos, de los cuales los lodos se pueden remover facilmente por medio de una purga mientras que las incrustaciones requiere de métodos de eliminación mas elaborados.

Las sustancias que forman lodos e incrustaciones y que pueden producir corrosión en las calderas son principalmente el carbonato y sulfato de calcio, hidróxido de magnesio, sílice, dureza y oxígeno.

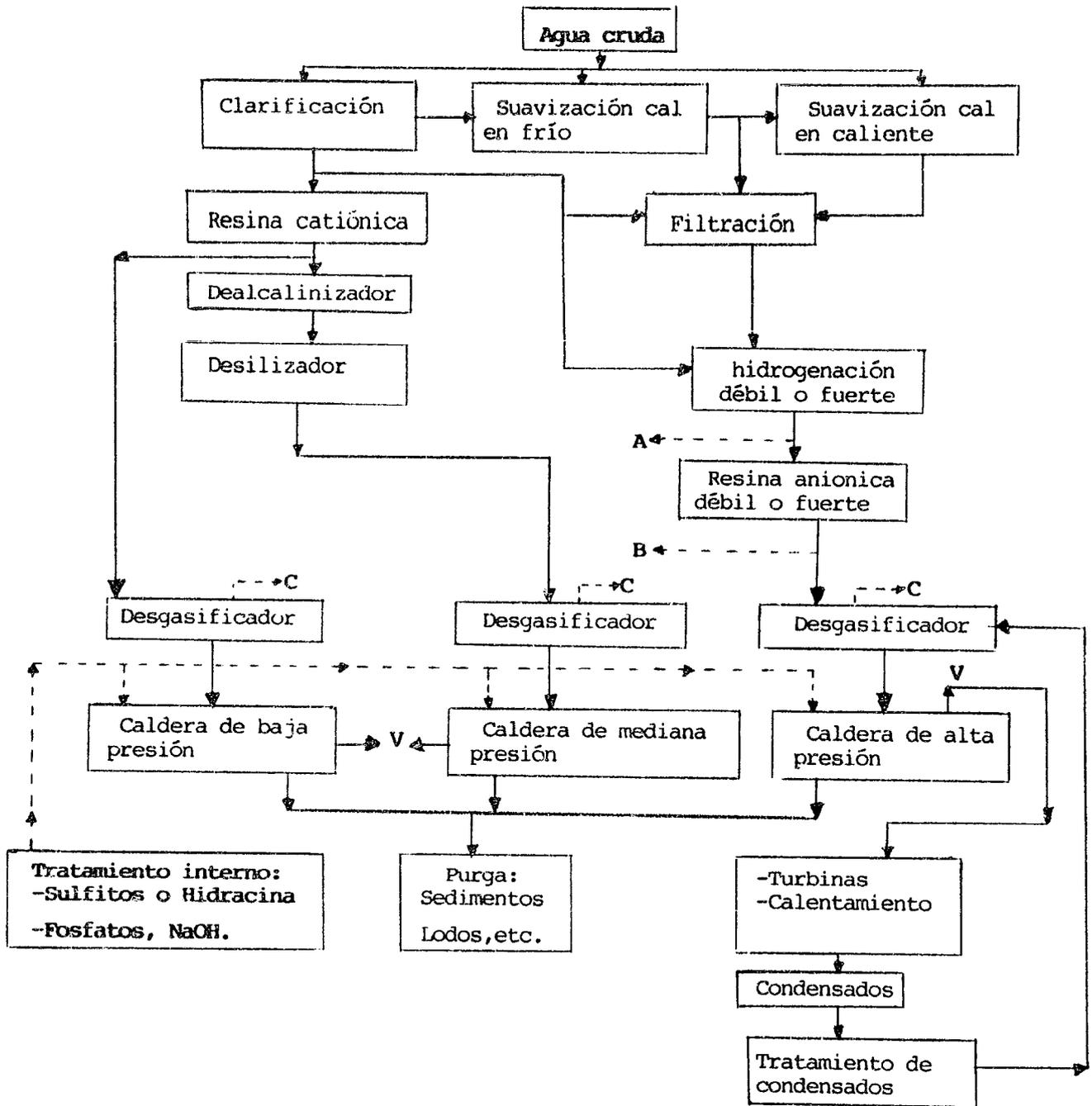
Para evitar la introducción de estas sustancias y eliminar los problemas internos de las calderas, las aguas que van a ser utilizadas se les debe de realizar dos tratamientos: uno **externo** y otro **interno** de acuerdo a la presión que va a manejar como se describe en la figura 3.2.1.

3.1.2.2.- Tratamiento externo.

El tratamiento externo consiste en acondicionar el agua cruda de la fuente de abastecimiento antes de entrar a la caldera, este tratamiento puede consistir en:

a) **Sedimentación y/o clarificación.**- Si el agua presenta turbidez o partículas en suspensión que puedan producir lodos o depositos en las superficie de los metales de las calderas.

Fig. 3.2.1.- Procesos de tratamiento externo e interno de agua para caldera .



V = Vapor.

A = Efluente ácido: sin dureza.

B = Efluente alcalino sin dureza, sin sílice, sin cátics.

C = O₂, CO₂, amonio.

b) **Procesos de intercambio catiónico en ciclo hidrógeno.**- La ventaja es que elimina completamente la dureza, reduce la alcalinidad y el contenido de sólidos totales en un cantidad igual a la reducción en alcalinidad y puede ser en frío la desventaja es que el tratamiento de agua con alto contenido de sílice para caldera de alta presión no reduce la cantidad de sílice presente.

c) **Intercambio aniónico.**- Este proceso sería el segundo paso del intercambio catiónico para la eliminación de sílice, cationes y la neutralización de los ácidos ionizados (H_2SO_4 , HCl, HNO_3 y poco ionizados, H_2CO_3 , silícico) en el intercambio catiónico con aguas que tienen una cantidad apreciable de alcalinidad de bicarbonatos es más económico usar un desgasificador o un desaerador al vacío entre las dos etapas, para eliminar el bióxido de carbono formado al descomponerse el ácido carbonico en bióxido de carbono y agua, que eliminarlo en el segundo paso.

d) **Desgasificación.**- La desgasificación o desaereación de agua para calderas se práctica para la eliminación del oxígeno, bióxido de carbono y nitrógeno disueltos.

El oxígeno es corrosivo, el nitrógeno inerte, el bióxido de carbono corrosivo y baja el PH de los condensados.

A los condensados también se les práctica la desaereación para la eliminación de oxígeno, amonio y aminos condensantes que se pueden utilizar como inhibidores de corrosión en las líneas de retorno. En las calderas de baja presión, se pueden tolerar presencia de oxígeno hasta de 0.3 ml/l.

e) **Tratamiento de condensados.**- Los condensados son prácticamente agua destilada que usualmente contiene pequeñas cantidades de material mineral disuelto, el contenido de dureza puede variar desde cero hasta posiblemente 15 ppm. dependiendo de los condensados y de la calidad del agua de enfriamiento usada. También pueden tener cierta cantidad de bioxido de carbono y oxígeno disueltos, que se pueden eliminar por desaereación como se explicó. La dureza puede ser precipitada por medio de un tratamiento interno con fosfatos.

g) **Suavización de cal sodada en frío.**- La principal ventaja de este proceso es que reduce la dureza a cantidades relativamente pequeñas (85 ppm. hasta 17ppm.) reduce el contenido de sólidos totales y la alcalinidad por una cantidad equivalente a la dureza de carbonato eliminada, aumenta el PH, reduce la sílice cuando se emplea magnesia o cal dolomítica.

h) **Proceso de cal sodada en caliente.**- En este proceso la cal hidratada y la soda ash se emplean para que reaccionen con la dureza de no carbonatos y la dureza de bicarbonatos, para precipitar la dureza de calcio como carbonato de calcio y la dureza de magnesio como hidróxido de magnesio. En este proceso el agua se calienta cerca del punto de ebullición antes de añadir los reactivos químicos, el CO₂ libre y parte del CO₂ semiunido, se elimina en este calentamiento.

i) **Intercambio cationico ciclo sodico (zeolitas).**- Se utiliza para ablandar agua para calderas de baja presión, su ventaja es la eliminación completa de dureza y su desventaja es que no reduce la alcalinidad ni los sólidos totales.

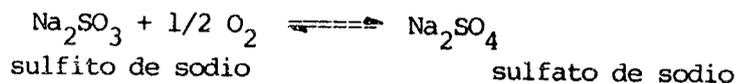
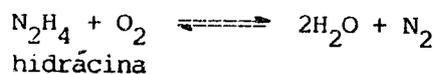
3.1.2.3.- Tratamiento interno .

El tratamiento interno de agua para calderas puede efectuarse para:

1).- Contrarrestar pequeñas cantidades de dureza resultantes del tratamiento externo o introducidas por los retornos de condensados

Un fosfato soluble a las salinas de la caldera en cantidad suficiente para precipitar la dureza y mantener un exceso reacciona con la dureza residual precipitandola en forma no adherente eliminandose por simple purga y evitandose así la formación de depositos.

2).- La cantidad de oxígeno que no alcanza a eliminarse en el deaerador y que alcanza a entrar a la caldera se elimina con la adición de hidrácina o sulfito sódico las reacciones de estos compuestos con el oxígeno son las siguientes:



El sulfito de sodio reacciona rapidamente con el oxígeno a la temperatura de la caldera para formar sulfato de sodio las ventajas de usar un compuesto u otro, es que la hidracina evita la introducción de sales minerales a la caldera sin aumentar los sólidos solubles y el sulfito resulta ser mas económico en su uso aunque aumente los sólidos solubles totales.

3).- La introducción de hidróxido de sodio también se utiliza para obtener un PH alcalino en las salinas de la caldera y aumentar la solubilidad de las mismas y no causen problemas de incrustación o corrosión.

En resumen el agua para caldera debe tener una calidad de acuerdo a las presiones de vapor que va a producir, pero en general las características que debe tener son estar libre de sílice que puede causar incrustación, depósitos o daños a los alabes de las turbinas, presentar baja dureza y alcalinidad para evitar incrustación y estar libre de oxígeno para eliminar la corrosión.

3.1.3.- AGUA DE PROCESO.

La calidad del agua referida para los diferentes procesos que se manejan en la industria varía en un amplio rango. debido a esto los procesos de tratamiento son muy variables porque van de acuerdo al tipo de industria y producto final que se obtenga, de las cuales se puede obtener una gran lista de clasificación de los tipos de industria y calidades de agua requerida para un proceso dado, Ahora bien existen procesos que demandan agua prácticamente libre de impurezas, o de alta calidad así como procesos que solo requieren acondicionamientos mínimos como posiblemente una clorinación o únicamente la reducción de la dureza de bicarbonatos.

También puede ser puntualizado que la calidad del agua requerida para un proceso dado hoy en día puede ser bastante diferente de la calidad usada en el pasado ya que en muchas ocasiones se ha observado que un cambio en la calidad del agua del proceso mejora la calidad del producto final, así como los costos del mismo.

En resumen la calidad del agua de proceso depende del uso que se la dará así como los tratamientos que ella requiera.

3.1.4.- AGUA PARA USOS GENERALES.

Este termino se usa para cubrir el agua empleada en otros usos además de la alimentación a calderas, enfriamiento y proceso húmedo. obviamente el agua que se suministra para uso del personal debe cumplir con calidad bacteriológica y deberá estar también libre de olores y sabores objetables. Por lo que respecta a agua para lavaderos regaderas, etc, no deben ser muy duras, en muchos casos donde se requiere ablandamiento únicamente el suministro de agua caliente se ablanda y esto puede ser efectuado por intercambio catiónico en ciclo sódico, el agua se ablanda antes de pasar a los calentadores

pero con suministros de agua extremadamente dura, debe de recibir un ablandamiento ya sea total o parcialmente. Cuando se efectúa en las plantas cualquier operación de lavado toda el agua usada, tanto caliente como fría, deberá ablandarse por un proceso de intercambio catiónico en ciclo sódico, ya que el agua completamente blanda se puede utilizar para otras operaciones de limpieza. El agua requerida para limpieza de suelos no requiere tratamiento.

CAPITULO IV.

PROCESOS DE TRATAMIENTO DE AGUA.

CAPITULO IV .

PROCESOS DE TRATAMIENTO DE AGUA .

La purificación del agua para uso industrial puede ser compleja o relativamente simple, dependiendo de las propiedades del agua cruda y el grado de pureza requerido. Se emplean muchos métodos y combinaciones de ellos, cuyas bases pueden ser físicas químicas o biológicas, en la que su efecto es el de eliminar en primer lugar las materias en suspensión a continuación las sustancias coloidales, y después las sustancias disueltas (minerales u orgánicas). Por último deben corregirse ciertas características de acuerdo a la calidad de agua requerida.

Por otra parte, la industria necesita generalmente caudales de agua instantaneos muy importantes, y produce en muchos casos una contaminación física o química de la que es responsable frente a la colectividad. El encargado de realizar el proyecto de una nueva fabrica o de la explotación del servicio de aguas de una planta en operación, debe estudiar por tanto, estos problemas y de la misma manera una verdadera economía del agua dentro de la misma, teniendo en cuenta sus diversos usos, las posibilidades de organización de la red de distribución, los pretratamientos comunes y las posibles recirculaciones y así entonces podrá emprenderse la elaboración de los tratamientos principales.

En este capitulo se mencionarán los procesos de tratamiento mas comunes que se llevan a cabo en la industria, describiendo brevemente su funcionamiento y la finalidad de cada uno.

4.1 PRETRATAMIENTOS .

Antes de su tratamiento, propiamente dicho, las aguas brutas se someten, generalmente a un pretratamiento que comprende un cierto número de operaciones físicas o mecánicas. Tiene por objeto separar del agua la mayor cantidad posible de las materias que por su naturaleza o tamaño, crearían problemas en los tratamientos posteriores.

En esta sección, el pretratamiento se refiere a los procesos de tratamiento "preliminares" diseñados para remover las partículas grandes y sedimentables del agua cruda antes de que esta llegue a las unidades de tratamiento iniciales. Estos procesos son:

- DESBASTE.
- DILACERACION
- DESARENADO Y DESENGRACE
- PREDECANTACION
- TAMIZADO

4.1.1.- DESBASTE .

El desbaste tiene por objeto :

- Proteger a la estación de la posible llegada intempestiva de grandes objetos capaces de provocar obstrucción en las distintas unidades de la instalación.
- Separar y evacuar fácilmente las materias voluminosas arrastradas por el agua cruda, que podría disminuir la eficiencia de los tratamientos siguientes.

La operación puede ser mas o menos eficaz según la separación entre los barrotes de las rejas, distinguiéndose como:

- Desbaste fino, con una separación de 3 a 10 mm.
- Desbaste medio, con una separación de 10 a 25 mm.
- predesbaste, con una separación de 50 a 100 mm.

Las rejas utilizadas en desbaste pueden ser de limpieza manual o de limpieza automática, de los cuales pueden encontrarse diferentes tipos de rejas:

-**Rejas de cable con rastrillo.**- La reja se limpia mediante un rastrillo unido a un carro móvil accionado por dos cables. Los residuos se elevan a lo largo de un tablero metálico y se vierten después en un recipiente existente aguas abajo de la reja.

- **Reja de cables con garfio.**- Se trata de una reja parecida a la anterior que puede utilizarse con aguas muy cargadas, el garfio se acciona independientemente del carro

y el eyector puede ser motorizado, fig 4.1.a.

- **Reja de cremallera.**- Este dispositivo de concepción muy original, suprime toda conexión mecánica por cable. Se limpia mediante un rastrillo solidario de un carro que se desplaza a lo largo de la cremallera, 4.1.b.

Los residuos del desbaste se pueden secar con el fin de reducir su peso y humedad para facilitar el transporte o incineración. Los productos son muy heterogéneos y su destino final es generalmente el mismo que el de las basuras urbanas.

4.1.2.- DILACERACION .

Esta operación se aplica en especial a las aguas residuales, tiene por objeto desintegrar las materias sólidas arrastradas por el agua. Estas materias , en lugar de separarse del efluente bruto, se trituran y continúan en el circuito hacia las siguientes fases de tratamiento. Este proceso suprime la evacuación y la descarga de los residuos de la reja sin embargo en la práctica presenta varios inconvenientes, en especial la necesidad de una atención frecuente sobre un material bastante delicado, el peligro de obstrucciones de tuberías y bombas provocadas por la acumulación en masa de fibras textiles o vegetales unidas a las grasas.

4.1.3.- DESARENADO Y DESENGRASE .

El desarenado tiene por objeto eliminar materias pesadas de granulometría superior a 20 micras.

El desaceitado tiene por objeto eliminar los cuerpos flotantes mas importantes : grasas, fibras, pelos, estopas y el constituir una barrera de seguridad contra los vertidos intempestivos accidentales importantes de grasas, aceites residuales o fuel.

Estas dos funciones pueden realizarse en un mismo lugar mediante disposiciones particulares.

Desarenador circular.- Para evitar el depósito de los fangos orgánicos putrescibles existe una inyección permanente de aire en el fondo de la cuba de sección cilíndrica-có-

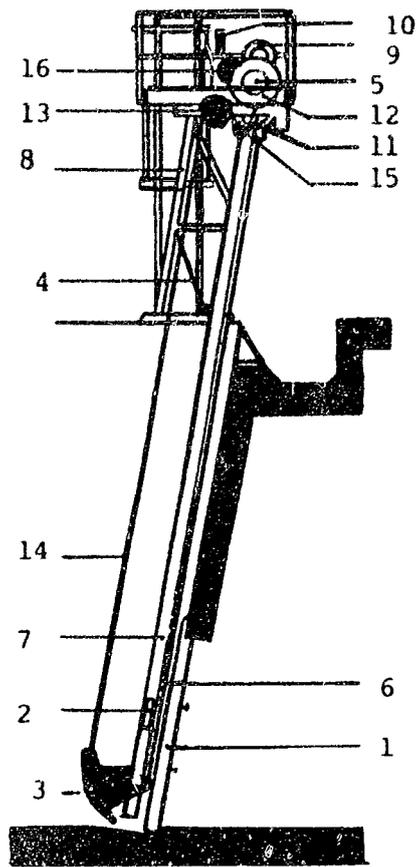


Fig. 4.1.a.- Reja de cables con garfio.

- 1.- Reja.
- 2 Carro portagarfio.
- 3.- Garfio basculante.
- 4.- Eyector.
- 5.- Tambor de cable de carro.
- 6.- Cable de mando del carro.
- 10.- Limitador de esfuerzos.
- 11.- Polea de jiro del carro.
- 12.- Tambor de cable del garfio.
- 13.- Polea de transmisión del garfio.
- 14.- Cable del garfio.
- 15.- Polea de giro del garfio.
- 16.- Motorreductor del garfio.

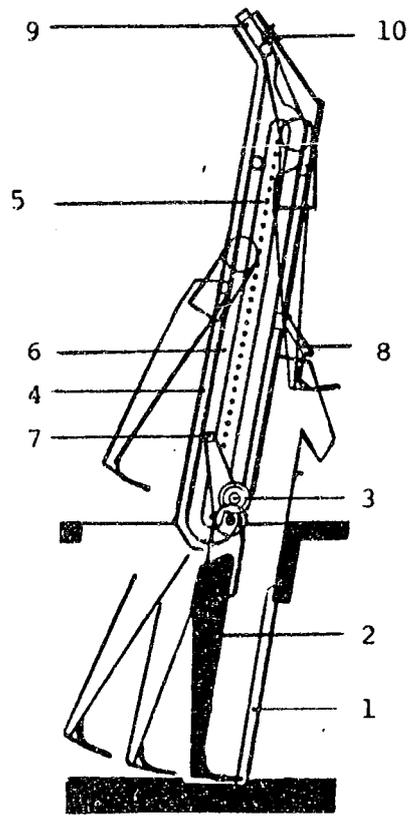


Fig. 4.1.b.- Reja de cremallera.

- 1.- Campo de la reja.
- 2.- Rastrillo de limpieza.
- 3.- Arrastre móvil.
- 4.- Pórtico.
- 5.- Cremallera
- 6.- Camino de conducción.
- 7.- Rodillo de posición.
- 8.- Eyector basculante.
- 9.- Interruptor fin de carrera.
- 10.- Automátismo.

nica esta corriente de aire mantiene las condiciones de turbulencia mínima necesarias. Las arenas se extraen por suspensión en la emulsión de agua y aire.

Si debe preverse un desengrasado se dispone de una zona tranquila de acumulación en la periferia. La evacuación de las materias flotantes se produce por desbordamiento.

4.1.4.- PREDECANTACION .

La predecantación es una operación que se efectúa antes de la clarificación con aguas de superficie muy cargadas y tiene por objeto eliminar la arena fina y la mayor cantidad posible de barro.

Según la carga de materia en suspensión y su naturaleza un predecantador debe dimensionarse como un decantador (generalmente es el caso de aguas brutas cuya carga no excede de 20 a 30 g/l) o como un espesador (cuando la carga de agua bruta es superior a dicho límite). En efecto se comprueba a baja carga, la posibilidad de una decantación natural sin agregar coagulantes y si aumenta la carga, es necesario añadir un reactivo para alcanzar un rendimiento de clarificación suficiente. Al aumentar aún más la carga del agua bruta, se comprueba la desaparición de la fase de sedimentación libre y la aparición de un asentamiento. Generalmente éste no mejora mediante el empleo de un coagulante tipo sulfato de alúmina o cloruro férrico sino que para alcanzar una compresión suficiente es necesario el empleo de polielectrólitos específicos.

Cuando los predecantadores trabajan como decantadores su velocidad ascensional varía entre 2 y 6 m/h en función del contenido de materias en suspensión que se desee obtener a la salida, la naturaleza de las materias que han de retenerse y de la utilización de reactivos. El tiempo de contacto depende de la carga de materias en suspensión, de sus características de compresión y de la concentración final que se desea en la extracción, este tiempo varía generalmente, entre una hora y dos horas.

Cuando es elevada la carga de materias en suspensión o cuando su velocidad de compresión es lenta los predecantadores deben considerarse como espesadores de fangos. En tal caso, la velocidad ascensional es menor (entre 2 m/h 0.5 m/h y a veces menos) y el tiempo de contacto se encuentra comprendido entre 2 y 5 horas. el rendimiento de un predecantador varía de un 50 a un 65 % sin adición de reactivos pudiendo llegar hasta un 75 a 98 % con una dosis adecuada de floculante.

Al igual que los decantadores, los predecantadores son de forma rectangular o circular y los fangos se extraen como a continuación se menciona:

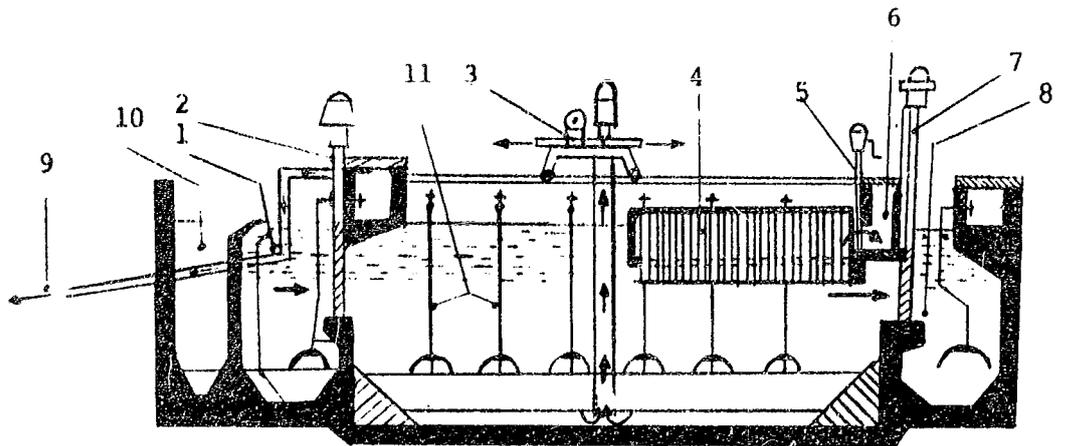


Fig. 4.1.2. Desarenador desaceitador .

- 1.- Canal de entrada.
- 2.- Válvula de entrada.
- 3.- Puente móvil para elevación de la arena.
- 4.- Tranquilizador.
- 5.-Válvula de desaceitado.
- 6.- Canal de evacuación de aceite.
- 7.- Válvula de salida.
- 8.- Canal de salida. Alimentación de la decantación.
- 9.- Evacuación de la arena.
- 10.- By-pass por vertedero de rebose.
- 11.- Tubos de inyección de aire.

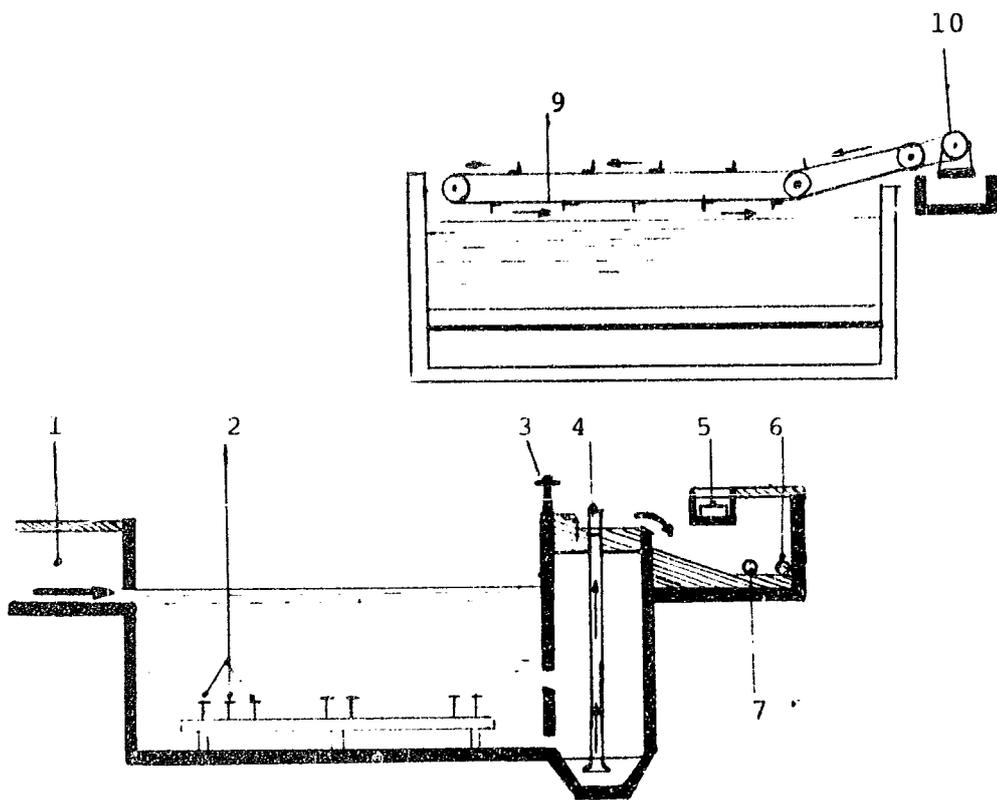


Fig. 4.1.3.- Desengrasador-desaceitador.

- 1.- Llegada de agua bruta.
- 2.- Aereación por difusores porosos.
- 3.- Columna de maniobra de la válvula de vaciado.
- 4.- Bomba hidroneumática.
- 5.- Cinta transportadora de grasas.
- 6.- Evacuación de agua.
- 7.- By-pass.
- 8.- Válvula de vaciado.
- 9.- Dispositivo de rascado.
- 10.- Grupo motorreductor del dispositivo de rascado.

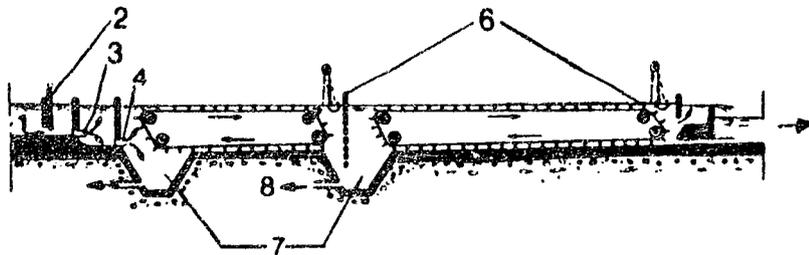


Fig. 4.1.4.- Desaceitador longitudinal con 2 compartimientos en serie.

- 1.- Llegada.
- 2.- Válvula de aislamiento.
- 3.- Prerrepatición.
- 4.- Repartidor.
- 5.- Salida.
- 6.- Canales orientables de recogida de aceites.
- 7.- Fosas de fangos .
- 8.- Hacia la fosa de fangos.

- Sin rascado, por extracción gravitatoria, a partir de tolvas incorporadas
- Sin rascado, mediante bombas aspirantes montadas sobre un puente grúa de corredera de movimiento alterno. El puente puede ir equipado con una bomba de inyección de agua destinada a provocar el desprendimiento de la masa de fango depositada hacia la aspiración de las bombas aspirantes.
- Con rascado, a partir de una o varias fosas, por extracción gravitatoria, o por bombas fijas.

El estudio de los predecantadores exige un conocimiento preciso de los volúmenes de fangos producidos en los periodos críticos así como de las posibilidades de compresión de estos fangos.

4.1.5.- Tamizado .

El tamizado es una filtración sobre un soporte delgado que se utiliza en numerosos campos de tratamiento de agua. Según las dimensiones de los orificios de paso del soporte se distinguen dos variantes:

1.- El **macrotamizado** (sobre chapa perforada o enrejado metálico con paso superior a 0.3 mm) se emplea para retener ciertas materias en suspensión flotantes o semiflotantes residuos vegetales o animales, insectos, ramas, algas, hierbas, etc. de tamaño comprendido en 0.2 mm y algunos milímetros.

2.- El **microtamizado** (sobre tela metálica o plástica de malla inferior a 100 micras) se utiliza para retener materias en suspensión de muy pequeñas dimensiones, contenidas en las aguas de abastecimiento (plancton) o en aguas residuales pretratadas.

Los aparatos de microtamizado utilizables en pretratamiento pueden clasificarse en:

- Aparatos instalados al ras del agua, con pequeña pérdida de carga: Macrotamices rotatorios, tamices fijos con rasquetas.
- Aparatos necesariamente alimentados por bombeo: Tamices de autolimpieza, estáticos o rotatorios, filtros mecánicos.

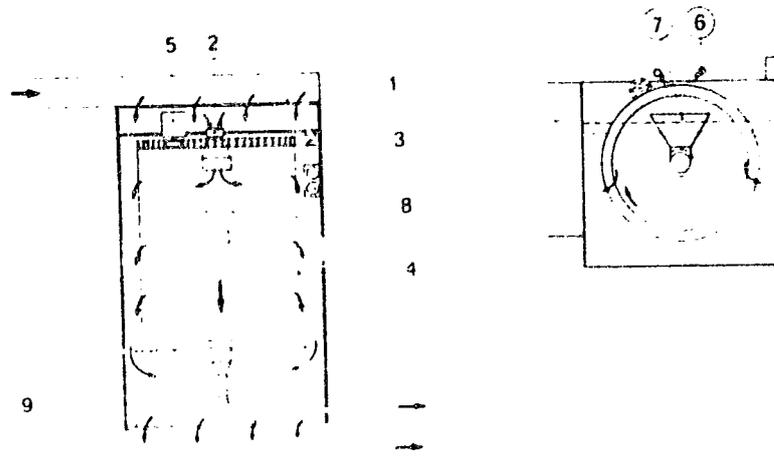


Fig.4.1.5.- Instalación de microtamizado.

- 1.- Vertedero de alimentación.
- 2.- Válvula de entrada de agua bruta.
- 3.- Válvula de seguridad.
- 4.- Tambor de microtamizado.
- 5.- Dispositivo de arrastre.
- 6.- Rampas de lavado con boquillas.
- 7.- Canal y tubería de agua de lavado.
- 8.- Indicador de pérdida de carga.
- 9.- Vertedero de salida.

4.2 .- COAGULACION Y FLOCULACION .

La pequeña dimensión de partículas coloidales presentes en un agua, así como la existencia de cargas negativas repartidas en su superficie, dan lugar a una estabilidad de las suspensiones coloidales.

En el campo del tratamiento de aguas la coagulación es por definición, el fenómeno de desestabilización de las partículas coloidales que puede conseguirse especialmente por medio de la neutralización de sus cargas eléctricas. Se llama coagulante al producto utilizado para esta neutralización.

La agrupación de las partículas descargadas, al ponerse en contacto unas con otras, constituye la floculación, que da lugar a la formación de flóculos capaces de ser retenidos en una fase posterior del tratamiento del agua. Algunos productos pueden favorecer la formación del flóculo; a éstos se les llama floculantes.

La separación sólido-líquido del floculo formado y del agua puede hacerse por filtración, decantación o flotación seguidas o no de filtración.

La coagulación y la floculación intervienen generalmente en el tratamiento de agua destinada al abastecimiento público y en la preparación de aguas industriales de fabricación. Con estos procedimientos se consigue la neutralización de los coloides del agua y su adsorción en la superficie de los precipitados formados en el proceso de floculación. También pueden adsorberse sobre el flóculo ciertas sustancias disueltas (materia orgánica, contaminantes diversos).

En el tratamiento de aguas residuales urbanas con frecuencia es tal la concentración de materia en suspensión que puede conseguirse una floculación mediante simple agitación. Con el fin de favorecer la eliminación de la contaminación coloidal, puede introducirse un coagulante.

Las aguas residuales industriales presentan composiciones muy variables, según la industria considerada. En algunos casos, el agua contiene un constituyente capaz de flocular por simple agitación o que lo hace mediante la adición de un floculante; otras veces es necesario utilizar un coagulante que de origen a un precipitado que pueda flocularse a continuación.

4.2.1.- COAGULACION .

La coagulación consiste en introducir en el agua un producto capaz:

- de neutralizar la carga de los coloides, generalmente electronegativos, presentes en el agua
- de formar un precipitado.

Este producto se conoce con el nombre de coagulante.

4.2.1.1.- Principales coagulantes .

Los coagulantes principalmente utilizados son sales de aluminio o de hierro. En algunos casos, pueden utilizarse igualmente productos de síntesis tales como los polielectrólitos catiónicos.

La sal metálica actúa sobre los coloides del agua por medio del catión que neutraliza las cargas negativas antes de precipitar.

Al polielectrólito catiónico se le llama así porque lleva cargas positivas que neutralizan directamente los coloides negativos. Los polielectrólitos catiónicos se emplean generalmente junto con una sal metálica, en cuyo caso permite una importante reducción de la dosis de dicha sal que habría sido preciso utilizar. Puede llegarse incluso a suprimir completamente la sal metálica con lo que se consigue reducir notablemente el volumen de fango producido.

a).- SALES DE ALUMINIO.-

1.- Sulfato de aluminio (forma líquida o sólida):



Dosis: en clarificación. 10 a 150 g/m³ según la calidad del agua bruta.

2.- Cloruro de aluminio (forma líquida):

de empleo excepcional.



3.- Sulfato de aluminio + cal :



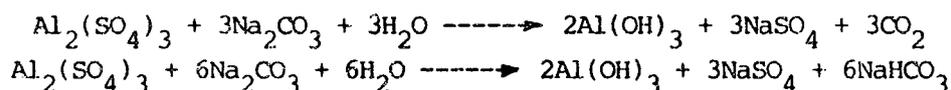
Dosis: en clarificación se necesita, de cal $\text{Ca}(\text{OH})_2$, un tercio de la dosis de sulfato de alúmina comercial $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$.

4.- Sulfato de aluminio + sosa cáustica:



Dosis: En clarificación, se necesita, de sosa cáustica NaOH, el 36% de la dosis de sulfato de aluminio comercial $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18 \text{H}_2\text{O}$.

5.- Sulfato de aluminio + carbonato sódico:



Dosis: Se necesita, de sosa entre el 50 y el 100 % de la dosis de sulfato de aluminio comercial $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$.

6.- Aluminato sódico:



Dosis: En clarificación, 5 a 50 g/m³ de reactivo comercial del 50 % de Al_2O_3 .

7.- Polímeros de aluminio:

En ciertas condiciones, las sales de aluminio pueden condensarse, llegando a la formación de polímeros capaces de coagular y flocular. Se forma así el policloruro básico de aluminio (PCBA), neutralizado progresivamente con sosa una solución de cloruro de aluminio.

Se obtienen polímeros de la forma $Al_6(OH)_{12}^{6+}$ a $Al_{54}(OH)_{144}^{8+}$ cuyas propiedades coagulantes y floculantes son excepcionales. El PCBA ha de prepararse en el mismo lugar de su utilización y almacenarse durante un largo período, como consecuencia de la estabilidad aportada al polímero por la adición de diversos productos (aniones de ácidos fuertes, como SO_4^{2-}).

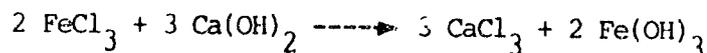
b.-) SALES DE HIERRO .

1.- Cloruro férrico (generalmente en forma líquida, a veces cristalizado):



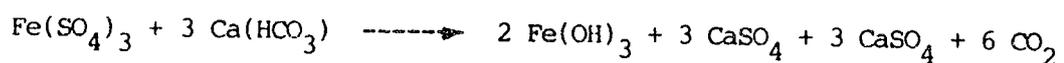
Dosis: En clarificación, 5 a 150 g/m³ de cloruro férrico comercial $FeCl_3 \cdot 6H_2O$.

2.- Cloruro férrico + cal:



Dosis: En tratamiento de aguas residuales urbanas, se necesitan 100 a 800 g/m³ de cal para dosis de 100 a 600 g/m³ de cloruro férrico comercial.

3.- Sulfato férrico:

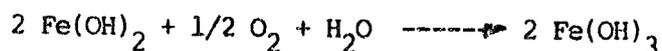


Dosis: En clarificación. se necesitan 10 a 150 g/m³ de reactivo comercial $Fe_2(SO_4)_3 \cdot 9 H_2O$.

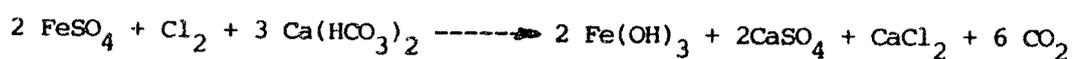
4.- Sulfato ferroso:



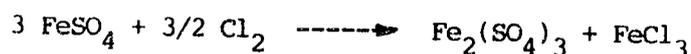
Dosis: En clarificación se necesitan de 10 a 100 g/m³ de reactivo comercial FeSO₄*7H₂O
En aguas aireadas, el hidróxido ferroso se oxida a hidróxido ferrico:



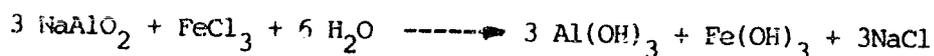
5.- Sulfato ferroso + cloro:



Dosis: se necesita, de cloro el 12 % de la dosis de sulfato ferroso FeSO₄*7H₂O. el sulfato ferroso y el cloro pueden introducirse separadamente en el agua a tratar, o bien puede oxidarse una solución de sulfato ferroso con cloro, antes de su utilización. Se obtiene entonces una mezcla de sulfato y cloruro férrico, a la que se le conoce comercialmente con el nombre de clorosulfato férrico, según la reacción:



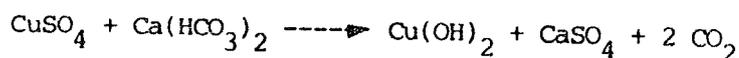
6.- Cloruro férrico + aluminato sódico:



Dosis: Se necesita tanto aluminato sódico comercial de 50 % de Al₂O₃ como cloruro férrico comercial FeCl₃*6H₂O.

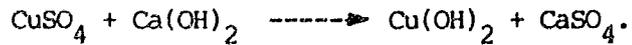
c).- OTROS COAGULANTES .

1.- Sulfato cúprico:



Dosis: 5 a 20 g/m³ (empleo excepcional)

2.- Sulfato cúprico + cal :



Dosis: Se necesitan 30 g de cal Ca(OH)_2 por cada 100 g de sulfato cúprico $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ (empleo excepcional).

4.2.1.2.- Práctica de la coagulación .

a).-Elección del coagulante .

La elección del coagulante se efectuará después de un estudio del agua en laboratorio mediante la técnica de ensayos de floculación, en esta elección deben tenerse en cuenta diversos factores:

- naturaleza y calidad del agua bruta
- variación de la calidad del agua bruta (variaciones diarias o según las estaciones, en especial, influencia de la temperatura).
- criterios de calidad y destino del agua tratada.
- tratamiento previsto después de la coagulación (coagulación sobre filtro, decantación)
- grado de pureza del reactivo, especialmente en el caso de aguas para abastecimiento público. Para este uso se excluyen los productos de recuperación, subproductos de fabricación, etc..

b).-Introducción del coagulante .

Teniendo en cuenta que la neutralización de los coloides es el principal objetivo que se pretende en el momento de la introducción del coagulante es conveniente que el reactivo utilizado se difunda con la mayor rapidez posible.

El tiempo de coagulación es extraordinariamente breve la utilización óptima del coagulante exige que la neutralización de los coloides sea total antes de que una parte del coagulante haya comenzado a precipitar (por ejemplo, en forma de hidróxido metálico).

Para la mezcla de los reactivos, se utiliza a veces únicamente la turbulencia creada

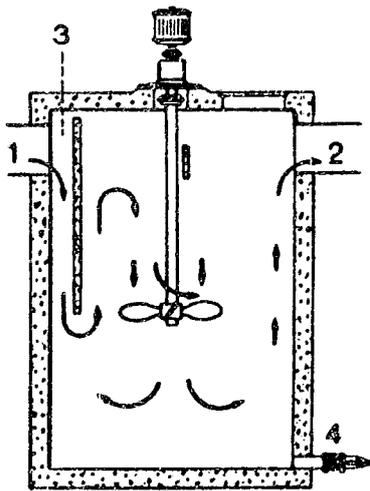


Fig. 4.2.1.- Cámara de mezcla con agitador rápido.

- 1.- Entrada de agua.
- 2.- Salida de agua.
- 3.- Reactivo.
- 4.- Vaciado.

por un vertedero, pero conviene disponer de un sistema que permita esta mezcla rápida, sistema denominado mezclador rápido o coagulador, y que sea capaz de crear un gradiente de velocidad comprendido entre 100 y 1000 seg^{-1} .

No son indispensables los mezcladores rápidos cuando se utiliza un decantador por contacto de fango, mientras que sí lo son en el caso de floculación difusa.

Se distinguen varios tipos de mezcladores:

- Mezcladores estáticos:

Se trata de dispositivos colocados en el interior de una tubería (sistema helicodal, diafragma, cono.) que crea una turbulencia suficiente para permitir la difusión instantánea del coagulante.

Estos mezcladores producen una pérdida de carga a veces importante. Son muy eficaces al caudal nominal, pero su eficiencia decrece cuando disminuye el caudal que pasa por la tubería.

- Mezcladores rápidos:

Se trata de un agitador rápido del tipo de hélice o de palas (turbina), colocado en una cámara de mezcla especial (ver figura 4.2.1.).

4.2.2 .- F L O C U L A C I O N .

El coagulante introducido da lugar a la formación del flóculo, pero es necesario aumentar su volumen, su peso y sobre todo su cohesión. Se favorecerá el engrosamiento del flóculo por medio de :

- una coagulación previa, tan perfecta como sea posible
- un aumento de la cantidad del flóculo en el agua; conviene poner el agua en contacto con los precipitados ya formados por el tratamiento anterior (recirculación de fangos tratando de conseguir la mayor concentración posible.
- una agitación homogénea y lenta del conjunto, con el fin de aumentar las posibilidades de que las partículas coloidales descargadas eléctricamente se encuentren con una partí-

cula de flóculo.

- el empleo de ciertos productos llamados floculantes.

4.2.2.1.- Floculantes .

Los floculantes llamados también ayudantes de coagulación , ayudantes de floculación e incluso ayudantes de filtración son productos destinados a favorecer cada una de estas operaciones. La acción puede ejercerse al nivel de la velocidad de reacción (floculación mas rápida) o al nivel de la calidad del flóculo (floculo más pesado, mas voluminoso y mas coherente).

Los floculantes pueden clasificarse por su naturaleza (mineral u orgánica). su origen (sintético o natural) o el signo de su carga eléctrica (aniónico, catiónico o no iónico).

a).- Sílice activada .

La sílice activada fue el primer floculante que se empleó, y sigue siendo en la actualidad, el que mejores resultados puede dar, principalmente si se utiliza juntamente con sulfato de alúmina.

Se introduce generalmente después del coagulante, y se prepara neutralizando parcialmente la alcalinidad de una solución de silicato sódico (la sílice activada se prepara mezclando silicato sódico y ácido sulfúrico). Industrialmente, n grandes instalaciones, se prefiere dosificar las soluciones de silicato sódico y de ácido de forma continua, se mezclan estas dos soluciones en un depósito que lleva eventualmente, una llegada de agua para que pueda conseguirse la concentración deseable de SiO_2 , y a continuación se hace pasar la solución a un deposito de envejesimiento, con un tiempo de permanencia de media hora y posteriormente se distribuye a los floculadores.

b).- Otros floculantes minerales .

A veces se utilizan ciertos productos para cargar un agua bruta que no contiene su-

ficiente materia bruta en suspensión.

Entre ellos pueden citarse:

- algunas arcillas.
- blanco de Meudon o carbonato cálcico precipitado.
- carbón activo en polvo (cuando se impone este tratamiento).
- arena fina, kieselguhr (diatomeas).

c).-Floculantes orgánicos .

El progreso de la Química Orgánica ha permitido el desarrollo de otros floculantes más activos.

Algunos se fabrican a partir de productos naturales: algianatos (extractos de algas), almidones (extractos de granos vegetales), derivados de la celulosa, ciertas gomas.

Los algianatos se utilizan especialmente como ayudantes de floculación de sales férricas, aunque a veces, también dan buenos resultados con sales de aluminio.

Se obtienen a partir del ácido algínico, el cual a su vez se extrae de algas marinas (en especial el género laminaria). Su empleo en el tratamiento de aguas de abastecimiento público está autorizado en todos los países.

Otros floculantes son totalmente sintéticos, se distinguen por una parte las poliacrilamidas, de larga cadena y gran masa molar (2 a $4 \cdot 10^6$ g/mol), y por otra, las poliaminas que tienen generalmente cadenas más cortas y menores masas molares ($1 \cdot 10^6$ g/mol).

Las poliacrilamidas se utilizan en el tratamiento de clarificación de aguas y en la deshidratación de fangos, mientras que las poliamidas se emplean sobre todo en clarificación.

Los floculantes orgánicos se descomponen en dos clases de empleo: productos sólidos y productos líquidos.

Existe gran cantidad de floculantes orgánicos, entre los cuales pueden citarse los siguientes: Praestol, Superfloc, Magna floc, Alginatos, Prosédim, Purifloc.

En el caso de decarbonatación con cal, la elección deba orientarse hacia un floculante no iónico o aniónico.

En el caso de una clarificación, la elección deba hacerse entre un floculante no iónico ligeramente aniónico y un floculante catiónico si el pH está próximo al de equilibrio, y en presencia de gran cantidad de materia orgánica, se ensayará en primer lugar

un floculante catiónico.

Por último, en el caso de tratamiento de agua destinada al abastecimiento público, es indispensable tener en cuenta la legislación del país considerado, ya que el empleo de floculantes orgánico está reglamentado, algunos países tienen publicada una lista de los productos autorizados.

4.2.2.2.- Práctica de la floculación .

La floculación será tanto mejor cuanto más eficaz sea la coagulación previa. El coagulador, en el que tiene lugar la agitación rápida, va seguido de un floculador, en el que se mantiene una agitación lenta durante 5 min o durante un tiempo mucho mayor en tratamiento de agua de abastecimiento público.

Esta agitación lenta puede tener lugar en un floculador separado o bien en el interior del decantador propiamente dicho. En este caso puede utilizarse turbinas de recirculación o la acción del propio lecho de fango.

La elección del tipo de mezclador y del tipo de floculador está en estrecha relación con la elección del procedimiento de separación utilizado en la continuación del tratamiento. Debe estudiarse cuidadosamente esta elección cuando la floculación es del tipo difuso y va seguida de una decantación estática, o de una flotación.

a).- Floculadores:

La floculación se efectúa en este caso en depósitos provistos de sistemas de agitación que giran con relativa lentitud para no romper los flóculos ya formados pero con la velocidad suficiente para conseguir el engrosamiento progresivo del flóculo e impedir que se formen sedimentos sobre el fondo del depósito.

El volumen de la cuba de floculación debe ser el necesario para que se consiga el tiempo de floculación determinado mediante ensayos de laboratorio.

Los sistemas de agitación utilizados pueden estar constituidos por helices especialmente estudiadas con este fin, o por un conjunto de palas fijadas sobre un eje giratorio, vertical u horizontal. Es conveniente obtener en el floculador un gradiente de velocidad comprendido entre 20 a 50 m/seg.

También conviene prever, en la transmisión del sistema de agitación, un conjunto motorreductor-variador, para que pueda regularse mejor la velocidad de agitación en función de la calidad de la floculación.

Si es grande el volumen necesario para la floculación, es preferible utilizar varios

depósitos de pequeñas dimensiones, colocados en serie. En este caso, cada uno de los depósitos va provisto de un sistema de agitación independiente cuya velocidad regulable puede adaptarse mejor a la calidad de la floculación.

Por ultimo, es importante que no se rompa el flóculo al pasar del floculador a la zona de decantación. Según la cantidad del agua tratada, las velocidades de paso deberán limitarse a los siguientes valores:

- floculo de hidróxido metálico frágil. $v = 0.20 \text{ m/s}$
- flóculo de hidróxido metálico resistente $v = 0.50 \text{ m/s}$
- floculo de aguas residuales. $v = 1.00 \text{ m/s}$

4.3.- PRECIPITACION QUIMICA .

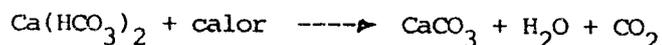
Cuando se añade a una solución acuosa algunas sales solubles, parte de los iones libres pueden reaccionar para formar compuestos comparativamente insolubles. El precipitado puede separarse por filtración o decantación del líquido claro después de que se ha asentado el precipitado. La precipitación se produce de acuerdo con leyes definidas que rigen los pesos de combinación de los reactivos y sus productos de solubilidad. Muchos de los métodos que se describen a continuación dependen de la precipitación de impurezas.

Suavizamiento: El primer proceso de precipitación química que se empleó comercialmente, fue la adición de cal hidratada ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) al agua para eliminar la dureza de bicarbonatos formado carbonato de calcio relativamente insoluble:



El proceso se puede efectuar tanto en equipo intermitente como continuo, en cualquier caso, es necesario ejercer un control minucioso de la dosificación de cal para llegar a la dureza mínima teórica. Por lo general, si las partículas de cal son lo suficientemente pequeñas y se proporciona una buena agitación, el costo del reactivo necesario para el tratamiento es bajo. Apagando y dispersando la cal viva, o bien dispersando eficientemente cal hidratada, puede obtenerse partículas del tamaño apropiado.

La eliminación de dureza de carbonatos calentando el agua para expulsar el bióxido de carbono disuelto y el que proviene de compuestos inestables, logra el mismo resultado que la adición de cal:



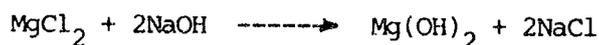
El agua cuya dureza no se debe a la presencia de carbonatos sólo se suaviza en forma parcial al agregar cal. La dureza de no carbonatos se elimina mediante la adición de carbonatos de sodio:



Usualmente el carbonato de sodio se combina con la cal para eliminar ambos tipos de-

dureza en un solo paso. Las dos reacciones se pueden efectuar en formas simultáneas, en caliente o en frío, en equipos intermitentes o en forma continua. Por lo general se utiliza un coagulante para mejorar la separación de la fase sólida.

El magnesio puede precipitarse en un suavizador de cal-carbonato incrementando la concentración de hidróxidos en el efluente hasta un punto en el que el hidróxido del magnesio sea relativamente insoluble. Esto puede lograrse con cal hidratada o sosa cáustica:



Si el magnesio se precipita por medio de cal, no se produce una reducción apreciable en la dureza a menos que se utilice una cantidad adicional de sosa para precipitar el calcio que sustituye al magnesio. En algunos casos es económico precipitar el magnesio adicionando únicamente sosa caustica, en vez de cal y carbonato de sodio. Esto elimina los problemas de alimentar lechada de cal y las dificultades que causa el tamaño de las partículas.

La mayoría de las instalaciones de proceso continuo para el ablandamiento por cal y carbonato o sosa cáustica, utiliza los lodos acumulados en suspensión para favorecer el crecimiento de las partículas de precipitado. Este método hace que los procesos de precipitación química y absorción se realice en un lapso corto. La unidad en que se realiza esta operación se conoce como precipitador de lecho de lodo suspendido. La temperatura desempeña muy importante papel en la reacción química. Cuando se desea una dureza baja y se puede utilizar agua caliente, como en la alimentación de calderas, se emplea temperaturas comprendidas entre 104°C y 146°C. A temperaturas comprendidas entre 10°C y 26°C, la dureza más baja que puede obtenerse es de 70 mg/l aproximadamente, pero a 104°C puede reducirse hasta 25 o 30 mg/l y a 146°C alcanza un valor de 10 mg/l.

Es conveniente que el suministro de remplazo de una caldera tenga una dureza de cero siendo evidente que el método de cal y carbonato no puede proporcionar este nivel. con mucha frecuencia después del tratamiento con cal y carbonato en caliente se emplea la suavización con fosfato como una segunda etapa del proceso. Cuando la dureza inicial es de 30 mg/l o menor, se le utiliza para un suavizamiento en una sola etapa el método se basa en la precipitación del ion de calcio como fosfato tricálcico, que es un material insoluble:



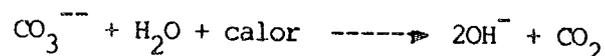
Se puede utilizar cualesquiera de los fosfatos añadiendolos en solución acuosa. Cuando la dureza de calcio es principalmente por bicarbonatos, el ácido fosfórico permite obtener el control de la alcalinidad al mismo tiempo que el total de sólidos en el efluente es menor. La reacción se efectúa a un pH de mas de 10 manteniéndose unos cuantos mg/l de hidróxido residual. La dureza en el agua tratada es aproximadamente 1 mg/l en forma de CaCO_3 . Cuando emplean fosfatos para precipitar el calcio, se puede utilizar sosa cáustica para la precipitación del ion de magnesio.

4.3.1.- Suavizamiento interno del agua de calderas. Por lo general, no es muy satisfactorio depender sólo del suavizamiento externo para el control del suministro de remplazo de una caldera, sobre todo en equipos que funcionan a altas presiones. Puede ser necesario aplicar un tratamiento interno al agua de caldera, para convertir las sales que forman incrustaciones en lodos suaves que pueden eliminarse al pulgarla. Los compuestos químicos cuya solubilidad aumenta con los incrementos en la temperatura, pueden convertirse en lodos no adherentes, aquellos cuya solubilidad disminuye al incrementarse la temperatura, con frecuencia forman incrustaciones que se adhieren con fuerza. En la práctica el tratamiento interno del agua de calderas es mucho mas complejo de lo que revelan estos principios generales. Ello se debe a la gran variedad de compuestos, mezclas de los mismos que pueden encontrarse en una caldera, a los efectos de materia orgánica y las velocidades de evaporación sobre la estructura de los cristales.

Dentro de una caldera no conviene precipitar grandes cantidades de minarales debiéndose

aplicar preferentemente el tratamiento interno del agua como un complemento al tratamiento químico o físico externo. El uso exclusivo de tratamiento interno únicamente, puede ser satisfactorio en calderas de baja presión, para las que solo se requieren cantidades moderadas de agua de alimentación de baja dureza.

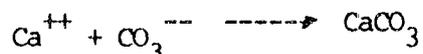
Los bicarbonatos y carbonatos con el agua de alimentación o con el tratamiento interno se descomponen dentro de la caldera formando bióxido de carbono que pasa al vapor e hidróxidos que se concentran en el agua de la caldera:



Los hidróxidos así producidos pueden precipitar al magnesio disuelto en el agua de la caldera en forma de hidróxido:



Durante la descomposición de los bicarbonatos y carbonatos, parte del calcio del agua de la caldera se precipita como carbonato:



La descomposición de los bicarbonatos y carbonatos puede ser tan rápida a presiones de la caldera superiores a 5 lb/pul² de presión manométrica, que el calcio precipita por completo y la concentración de hidróxido se hace excesiva. Esta dificultad puede resolverse utilizando fosfatos; otro método consiste en usar agentes quelantes tales como las sales de sodio de EDTA (ácido etilendiaminotetracético) y NTA (ácido nitrilotriacético). Estos agentes reaccionan con iones metálicos formando complejos muy solubles evitando con ello la formación de depósitos sobre las superficies de calentamiento.

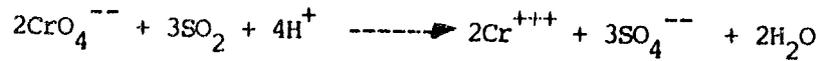
4.3.2.- Eliminación de hierro, manganeso y cromo:

El hierro y el manganeso se eliminan por precipitación, utilizando cal o sosa cáustica para ajustar el pH al nivel adecuado. Con frecuencia las aguas subterráneas contienen hierro y manganeso que deben eliminarse. Generalmente estas aguas tienen poco color o turbidez, excepto el que se debe a la presencia de estos minerales. El hierro está casi siempre unido con el bióxido de carbono en forma de bicarbonato y es necesario dar al agua un tratamiento previo de aereación para liberar CO₂ y precipitar parte del hierro férrico anhídrido que se sedimenta. Cuando solo hay hierro es suficiente contar con un pH de 8.5; pero si también hay manganeso presente se requiere un pH mayor de 9. Casi siempre se necesita un coagulante para facilitar la sedimentación del precipitado. Con frecuencia se necesita cloro para acelerar la velocidad de oxidación, también se necesitan depósitos de retención donde se separe el precipitado. Posteriormente pueden utilizarse filtros de arena para proporcionar un efluente final satisfactorio.

Las aguas de desecho de operaciones de galvanoplastia pueden contener cromo, casi siempre en la forma hexavalente. Este cromo es tóxico para la vida acuática y humana; por lo que debe eliminarse antes de hacer la descarga final.

El cromo se convierte primero a la forma trivalente, reduciendo el pH a 2 con ácido

y añadiendo un agente reductor, por ejemplo sulfato ferroso, bisulfito de sodio o bióxido de azufre. La reacción química que se lleva a cabo es:



Entonces , el cromo trivalente se precipita como hidróxido utilizando cal y ajustando el pH a un valor comprendido entre 7.8 y 8.5 , por medio de este método la concentración residual de cromo puede reducirse a límites muy bajos.

4.3.3.- Ruptura de emulsiones o desemulsificación.

Las emulsiones orgánicas que forman los aceites con las aguas de desecho presentan un problema de eliminación porque contienen una catidad considerable de material orgánico con alta demanda bioquímica de oxígeno (DBO), y al romperse la emulsión libera aceite que no puede descargarse a las corrientes superficiales. En muchos casos, estas emulsiones pueden depurarse acidulando a un pH inferior a 4, pero el agua ácida resultante es extremadamente corrosiva y debe manejarse en estructuras resistentes al ácido. Se requiere modificar el pH despues de la sedimentación y antes de la descarga de la corriente receptora. Un método que ha ido obteniendo un aceptación cada vez mayor en la desemulsificación en cloruro de calcio y el reajuste del pH con carbonato de sodio. La dosificación de cloruro de calcio es elevada, aproximadamente 2000 mg/l, pero la ruptura y precipitación de la emulsión han sido excepcionales y el porcentaje de recuperación del aceite sumamente alto.

No se ha llegado a comprender del todo la química de este procedimiento, pero las intalaciones a gran escala han demostrado la factibilidad del proceso.

4.4 .- D E C A N T A C I O N .

En la decantación se aprovecha la acción que ejerce la fuerza de gravedad sobre las partículas más pesadas que el agua, que descienden depositándose sobre el fondo, este método se utiliza para clarificar el agua cruda, ya sea por sedimentación simple o mediante la alimentación de coagulantes químicos. Los recipientes en donde se lleva a cabo este proceso se denominan tanques de decantación.

El tamaño, peso y forma de la partícula, así como su resistencia a la fricción viscosidad desempeñan un importante papel en el diseño de dichos tanques. Los calculos teóricos se basan casi siempre en modificaciones de la ley de Stokes y supone que las partículas son esféricas. Muchos son los factores que intervienen en el diseño y todos ellos deben modificarse según lo indique el sentido común y la experiencia.

4.4.1.- Decantacion estática .

Puede procederse por intermitencia, llenando un depósito en el que el agua permanezca en reposo durante varias horas, y vaciando a continuación la capa superior de agua hasta un nivel por encima de los fangos depositados. En una explotación industria siempre es preferible utilizar un decantador en circulación continua, con el fin de evitar frecuentes intervenciones manuales. El decantador esta constituido por un depósito rectangular o circular y para que se depositen los fangos, es preciso que la velocidad ascensional del agua sea inferior a la velocidad de caída de las partículas, lo que naturalmente depende de la densidad y tamaño de las mismas.

Los decantadores estáticos deben funcionar preferentemente de forma regular, puesto que las variaciones de caudal provocan la formación de remolinos que hacen que los fangos suban a la superficie.

Igualmente, cualquier variación en la temperatura, por pequeña que sea, del agua bruta y el agua del decantador, da lugar a movimientos de convección que produce el mismo efecto.

Debe estudiarse cuidadosamente el reparto del agua bruta y la recogida del agua decantada, para evitar la formación de corrientes preferentes y para conseguir que el agua se reparta uniformemente en todo el volumen útil de decantación, dejando al mismo tiempo una zona de calma para la sedimentación del fango.

En el caso de coagulación por la adición de reactivos químicos, el proceso de decantación debe ir precedido de un floculador. Este floculador permitirá una floculación

"difusa" en la que el volumen de materia en suspensión estará compuesto por las materias del agua bruta y por las procedentes de los reactivos introducidos.

4.4.2.- Decantación por contacto de fangos .

Los progresos de la técnica han mejorado la floculación aumentando la concentración del flóculo, o recirculando los fangos con los cual se acelera la floculación.

En el caso del tratamiento biológico de aguas residuales, los decantadores finales, en los que se se separa el flóculo biológico del agua depurada, se denominan "clarificadores". Estos decantadores debe admitir grandes porcentajes de recirculación, de forma que los fangos permanescan el menor tiempo posible en el aparato antes de volver a los depósitos de aereación. En este aspecto, el progreso técnico ha permitido pasar de los clarificadores de rasquetas a los clarificadores de succión y a los aparatos combinados.

En el caso de aguas de consumo o de aguas de fabricación destinadas a la industria, se combina la floculación y la decantación en un aparato único, como el circulator (que utiliza la circulación de fangos) o el pulsator (que produce un manto de fango en cuyo seno la concentración de materia en suspensión es elevada) por medio de las cuales se consiguen reacciones completas con precipitados densos. De esta forma puede aumentarse considerablemente la velocidad de circulación del agua y adoptarse una superficie de decantación igual al caudal horario dividido por 1.5 a 6 según el tipo de decantador. Con decantadores puede obtenerse un agua decantada de calidad buena y constante, estos cualesquiera que sean la turbiedad del agua bruta y la naturaleza del tratamiento.

Una cámara especial o "concentrador" garantiza el espesamiento del exceso de fangos y permite su evacuación de manera automática.

Cuando el volumen de fangos es elevado, se utiliza el decantador-floculador de rasquetas.

Con los sistemas de decantación por contacto de fangos se mejora el fenómeno de floculación y se obtiene un rendimiento óptimo de la cantidad de reactivo introducido, debido a la concentración que se produce en el lecho de fango. Se consigue así una mejor absorción de las materias disueltas sobre el floculo formado. En casos de tratamiento con carbón activo en polvo, la concentración en el seno del lecho de fango es tal que pueda dar lugar a igualdad de resultados, a una notable reducción de la dosis de tratamiento, pudiendo alcanzarse una economía de hasta el 40% del carbón utilizado.

4.4.3.- Aplicación de la decantación laminar a los decantadores por contacto de fangos.

En un decantador por contacto de fangos, del tipo de recirculación de fangos (Circulator, Accelator) o de lecho de fangos (pulsator) mediante el empleo de módulos laminares, a igual velocidad ascensional, puede mejorarse la calidad del agua decantada, consiguiéndose retener el flóculo residual que escapa del lecho de fangos. Así mismo, a igualdad de calidad puede aumentarse sensiblemente el caudal tratado por el aparato.

En efecto si se introducen placas inclinadas en un lecho de fangos que se mantienen en suspensión, se observa que se produce una sedimentación acelerada: los fangos se depositan en la placa inferior, desplazándose por deslizamiento hacia la base de lecho de fangos. Al mismo tiempo que el agua liberada como consecuencia de esta sedimentación, se desplaza hacia la placa superior y tiende a subir rápidamente hacia la parte superior del aparato.

4.4.4.- Decantación super-acelerada .

La decantación del efecto laminar y del efecto de contacto de un lecho de fangos, que se consigue introduciendo placas inclinadas en el lecho de fangos (Superpulsator), permite alcanzar velocidades 2 a 3 veces más elevadas que en la decantación acelerada tradicional por contacto de fangos.

- **Corrientes de convección:** Cualquier proceso de decantación puede verse afectado si la densidad del agua no es constante. lo que sucede cuando varían su temperatura o salinidad. Una variación de 1 °C por hora en la temperatura del agua bruta puede ser suficiente para reducir el rendimiento del decantador. El mismo efecto produce una variación de salinidad de 1 g/l por hora.

4.4.5.- DECANTADORES .

Cuando el proceso de decantación se realiza dinámicamente, es decir cuando la separación de dos fases líquido-sólido se efectúa de forma continua, estando el agua en movimiento permanentemente en el aparato, el diseño de este no puede hacerse partiendo únicamente de la noción de velocidad ascensional.

para definir su estructura, es necesario que se tenga en cuenta otros parámetros tales

como la relación altura-diámetro, los números de Reynolds y de Frude cuyos valores deben conciliarse en diferentes puntos del aparato para asegurar un flujo lo menos turbulento posible y al mismo tiempo suficientemente homogéneo, la disipación de energía al nivel de la distribución del agua a la entrada del aparato, que debe hacerse progresivamente, de forma que no se creen turbulencias perjudiciales para la decantación, al mismo tiempo que se consiga una alimentación uniforme de la zona de decantación. Debe presentarse especial atención a los dispositivos de recogida de agua decantada que siempre debe hacerse de forma homogénea.

El estudio hidráulico del sistema no se limita únicamente a la fase líquida, sino que se refiere igualmente al flujo a la concentración y a la evacuación de los fangos producidos cuyos parámetros característicos conoce por experiencia, el especialista de tratamiento de aguas.

Un decantador, por lo tanto, no debe de ser considerado como una simple cuba, si no como un conjunto, más o menos complejo según el tipo de aparato, cuyo rendimiento esta condicionado por su hidráulica, que debe ser objeto de un estudio minucioso.

4.4.6.- DECANTADORES ESTATICOS .

La costumbre ha hecho que el termino "estatico" se reserve para designar a los decantadores que no son ni de recirculación de fangos ni de lecho de fangos, en estos aparatos la decantación se efectúa como un proceso dinámico.

Según la cantidad de materia en suspensión en el agua bruta, el volumen de los precipitados a evacuar y la pendiente de fondo del aparato el decantador puede equiparse o no con un sistema de rascado de fangos.

4.4.6.1.- Decantadores estáticos sin rascado.

A).- Decantadores cilindro-cónicos normales.

Este decantador de flujo vertical, se utiliza para instalaciones de pequeño caudal, hasta unos 20 m³/h especialmente en el caso de depuración por vía química.

También puede utilizarse en instalaciones de mayor importancia cuando el volumen precipitados es reducido y elevada su densidad. Este decantador puede ir precedido de un floculador e incluso de un desaerador.

La pendiente de la parte cónica del aparato estara comprendida entre 45° y 65°

ESTA TESIS NO DEBE
SALIR DE LA BIBLIOTECA

gún la naturaleza del agua tratada y el tratamiento aplicado.

La velocidad ascensional media será de 0.5 a 1 m/h en el caso de clarificación de agua para abastecimiento público, y de 1 a 2 m/h para decantación primaria de aguas residuales urbanas.

B).- Decantadores estáticos de flujo horizontal.

En este tipo de decantador la superficie de decantación en metros cuadrados, es igual a 1 ó 2 veces el caudal horario en metros cúbicos de agua a tratar.

Esta solución exige grandes superficies y obras de fabricas importantes. Por otra parte, cuando se requieren evacuar los sedimentos de fango, debe procederse al vaciado total del depósito. Por lo tanto, este sistema solo puede utilizarse cuando cuando el volumen del fango es pequeño.

Los depósitos de decantación estática generalmente van precedidos de una camara de mezcla en la que se consigue una difusión rápida de los reactivos y de un floculador de agitación lenta para favorecer la floculación

C).-Decantadores estáticos laminares.

Existen diversos tipos de decantadores estáticos laminares, provistos de placas paralelas o de tubos

El **Sedipac** representado en la figura 4.4.2, reúne en un mismo recinto una zona de mezcla del agua y de los reactivos de tratamiento, un floculador acelerado equipado del dispositivo de "placa deflectoras" del superpulsator y una zona de decantación laminar. Los fangos producidos pasan por gravedad, concentrándose en la tolva del fondo del aparato.

4.4.6.2.- Decantadores estáticos con barrido mecánico de fangos.

Los decantadores de rasquetas se utilizan generalmente en el desbaste de agua bruta y en el tratamiento primario, clarificación y depuración química de aguas residuales

Se utiliza igualmente en la depuración de aguas de minas de lavado de carbón y en general de cualquier tipo de agua que contenga materias pesadas que puedan sedimentar espontáneamente.

Es conveniente que los fangos puedan extraerse a medida que se van formando.

Con el barrido de los fangos en el fondo del decantador, se consigue el espesamiento

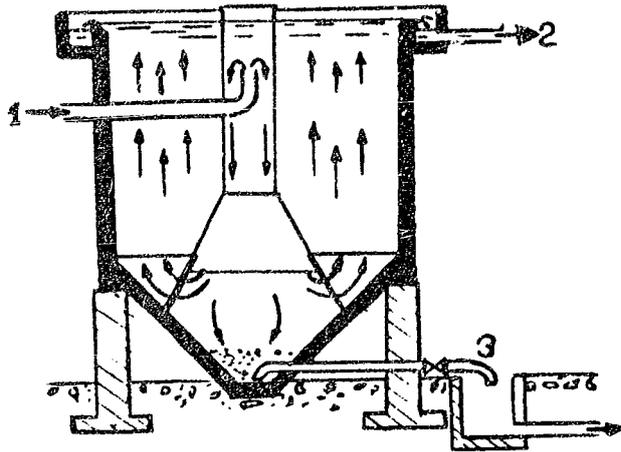
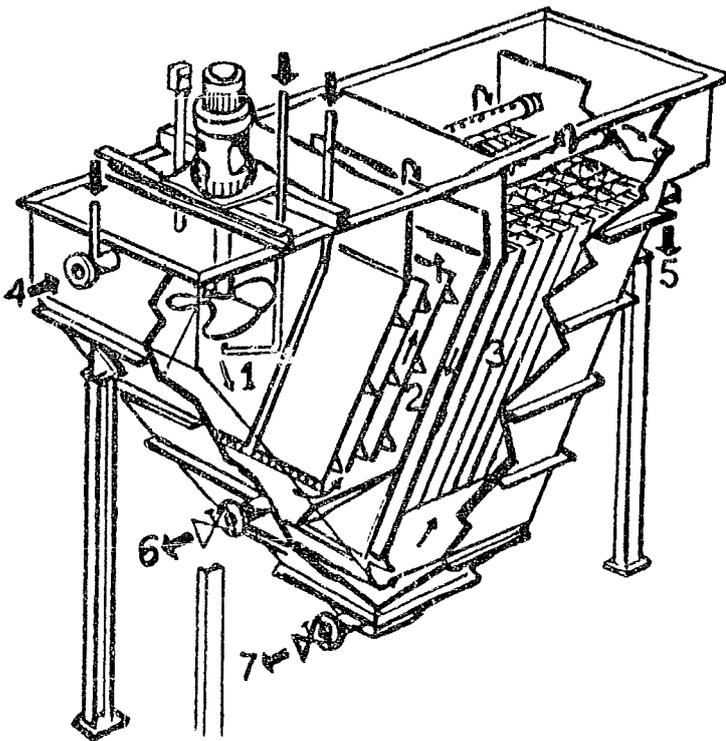


Fig. 4.4.1.- Decantador cilindro- cónico .

- 1.- Agua bruta.
- 2.- Agua tratada.
- 3.- Vaciado.



- 1.- Mezclador.
- 2.- Floculador.
- 3.- Decantador.
- 4.- Entrada de agua bruta.
- 5.- Salida de agua decantada.
- 6.- Purga.

Fig. 4.4.2.- Decantador estático laminar SFDIPAC.

de los mismos: el volumen a extraerse es pequeño y la pérdida de agua evacuada con los fangos es mínima. Por otra parte mediante este barrido, los fangos pueden enviarse a una o varias fosas especiales de la que mas tarde son extraídos.

Las velocidades de desplazamiento de las rasquetas destinadas a reunir los fangos en las fosas de concentración y evacuación depende del porcentaje de sólidos en suspensión en el agua a tratar, así como su densidad.

Por termino medio en los decantadores rectangulares de barrido longitudinal esta velocidad es del orden de 1 cm/seg para agua de abastecimiento y de 2 cm/seg para aguas residuales. En los decantadores circulares de barrido rotatorio las velocidades periféricas de los brazos, son respectivamente de 1 a 3 cm/seg y de 2 a 6 cm/seg.

A.- Decantadores circulares

En los decantadores circulares, el sistema de barrido va sujeto a una estructura que gira alrededor del eje del depósito puede llevar una sola lámina o bien una serie de rasquetas montadas en celosía.

Según el tratamiento y la calidad del agua tratada, puede ser conveniente prever un sistema de eliminación de espuma en la superficie. Este sistema especialmente se utiliza para aguas residuales.

El sistema de barrido puede ser radial o diametral, en el segundo caso se duplican los rascadores de fondo. Este sistema es accionado por una estructura giratoria, de arrastre periférico o central.

La construcción mas frecuente es la del puente radial, de arrastre periférico. Un motor reductor montado sobre el puente acciona una rueda motriz que se desplaza sobre el muro de coronación del decantador. la berredera de superficie va fijada rígidamente a la pasarela giratoria, y las rasquetas de fondo, cuya fijación generalmente va articulada, son arrastradas por la misma pasarela.

En el caso de arrastre central, la estructura metálica se compone de dos brazos suspendidos de una corona dentada central, accionada por un grupo moto-reductor fijo. Los rascadores de fondo y de superficie son solidarios de la estructura giratoria. La corona central y el grupo de arrastre pueden apoyarse sobre una pasarela diametral fija o sobre una columna central de hormigón, que descansa sobre el fondo del decantador, la pendiente de solera en la que se efectúa el barrido de fangos, es de 4 a 10 % . Los fangos, concentrados en una fosa central, son evacuados por un sistema automático de extracción.

Los decantadores de rasquetas pueden equiparse con floculador de agitación lenta que se sitúa en el centro del aparato.

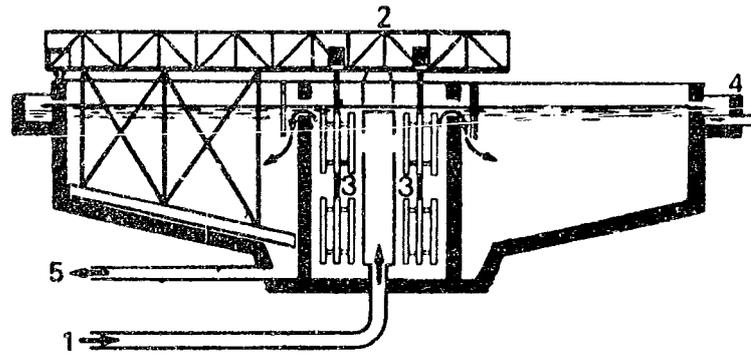


Fig. 4.4.3.- Decantador floculador con puente de rasquetas de arrastre periférico, sin recirculación de fangos.

- 1.- Llegada de agua bruta.
- 2.- Puente de rasquetas.
- 3.- Zona de floculación.
- 4.- Salida de agua decantada.
- 5.- Evacuación de fangos.

El agua floculada pasa a través de amplias averturas sin vertedero (con el fin de evitar una turbulencia excesiva) a la zona periférica de decantación, en la que se depositan partículas floculadas y las materias en suspensión.

Los decantadores circulares de rasquetas generalmente tienen alturas periféricas del agua comprendidas entre 2 y 3.5 m.

B.- Decantadores longitudinales rectangulares.

Los decantadores rectangulares presentan la ventaja de que permiten una implantación más compacta de los diferentes equipos de tratamiento, si bien su costo generalmente es más elevado. Normalmente se adopta una relación longitud/anchura comprendida entre 3 y 6. La profundidad de los depósitos está comprendida frecuentemente entre 2.5 y 4 m la pendiente del fondo es del orden del 1 % .

El sistema de barrido puede ser accionado por un puente que abarque el depósito, que se desplace de un extremo a otro del decantador, o mediante cadenas sin fin, sumergidas.

Las fosas de fango van situadas justamente debajo de la llegada del agua bruta, y la recogida de espuma inmediatamente antes de la salida del agua decantada. El rascador del fondo desplaza los fangos en sentido contrario al de circulación del agua, y el rascado de superficie en el mismo sentido. Las maniobras de los diferentes rascadores, así como la inversión del sentido de marcha del puente, se efectúa de forma totalmente automática.

Pueden preverse puentes que soporten y muevan rascadores correspondientes a varios decantadores paralelos. La luz de estos puentes puede ser superior a 25 m.

En el caso de agua bruta relativamente poco cargada, puede utilizarse un puente único para varios decantadores, desplazándolo periódicamente de un decantador a otro.

4.4.6.3.- Decantadores estáticos con succión de fangos .

Los decantadores estáticos con succión de fangos se utilizan principalmente en el caso de tratamiento de aguas residuales por fangos activados en el que es importante que se reduzca el tiempo de permanencia de estos fangos en el decantador con el fin de evitar su degradación.

Cuando el decantador alcanza un cierto diámetro, conviene multiplicar los puntos de recogida de los fango depositados, utilizando un dispositivo de succión.

En efecto no puede acelerarse el retorno de los fangos hacia el centro del aparato aumentando la velocidad de rotación de las rasquetas de fondo sin crear turbulencias inaceptables. El dispositivo de succión puede adaptarse tanto a decantadores circulares

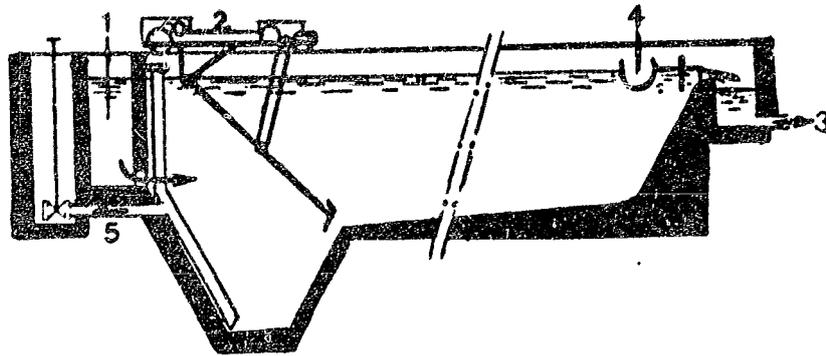


Fig. 4.4.4.- Decantador longitudinal, con puente de rasquetas.

- | | |
|-----------------------------|----------------------------|
| 1.- Llegada de agua bruta. | 4.- Recogida de flotantes. |
| 2.- Puente de rasquetas. | 5.- Evacuación de fangos. |
| 3.- Salida de agua tratada. | |

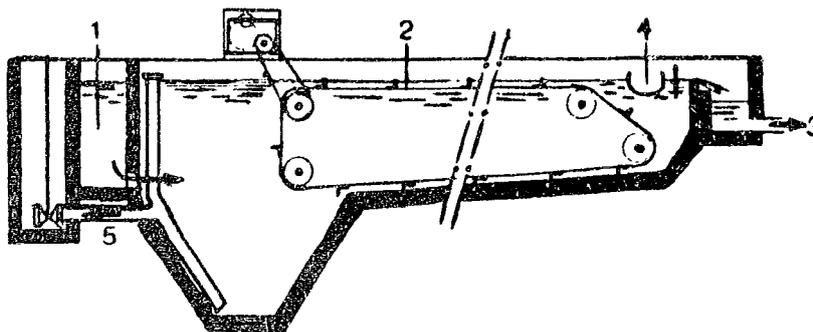


Fig. 4.4.5.- Decantador longitudinal con sistema de cadenas.

- | | |
|-------------------------------|----------------------------|
| 1.- Llegada de agua bruta. | 4.- Recogida de flotantes. |
| 2.- Cadena rascadora. | 5.- Evacuación de fangos. |
| 3.- Salida de agua decantada. | |

como a decantadores rectangulares.

En los decantadores circulares de diámetro inferior a 40 m se utiliza generalmente un puente radial de arrastre periférico del que es solidaria una canaleta a la que llega un cierto número de tubos que quedan sumergidos casi hasta el fondo del aparato.

Cuando el diámetro del aparato es superior a 40 m, la succión de fangos no se realiza únicamente en un radio sino en todo el diámetro. El dispositivo de succión es generalmente de arrastre central.

En ambos casos puede conseguirse el efecto de succión por presión hidrostática, estando en este caso la llegada de los tubos a la canaleta de recogida a una cota inferior a la de la superficie del agua, o bien por emulsión del fango con aire, lo que permite regular por separado el caudal de cada uno de los tubos de aspiración actuando sobre el caudal de aire inyectado.

La evacuación de los fangos recogidos en la canaleta móvil se efectúa por el centro del aparato, mediante un sifón que a su vez es móvil si el aparato es de arrastre periférico.

En un decantador rectangular, los fangos aspirados se recogen en una canaleta, cuyo movimiento de vaivén es perpendicular a la dirección del flujo de agua. Los fangos se evacúan de esta canaleta por bomba o sifón. El diseño del aparato debe estar especialmente bien estudiado, tanto por lo que se refiere a la entrada de agua cuya distribución debe ser uniforme, sin formación de aguas perjudiciales a la decantación, como a los extremos con el fin de evitar zonas muertas en las que podría acumularse fango.

4.4.7.- DECANTADORES POR CONTACTO DE FANGOS .

A) Factores que favorecen la floculación

Para que puedan flocular las partículas presentes (hidróxidos metálicos y materias coloidales), es preciso que se pongan en contacto unas con otras. La floculación se facilita considerablemente agitando el líquido. Por otra parte las posibilidades de encuentro de las partículas aumentan con su concentración conservando en el líquido un elevado porcentaje de los fangos formados en el tratamiento anterior.

La agitación necesaria para que se mezclen el agua a tratar, el reactivo y los fangos, debe ser suficientemente lenta para que no se rompa el flóculo ni se provoque una nueva suspensión coloidal.

Es esencial que las partículas antiguas que se ponen en contacto con el líquido que se está tratando, se encuentren en el mismo estado físico que las formadas por reactivos

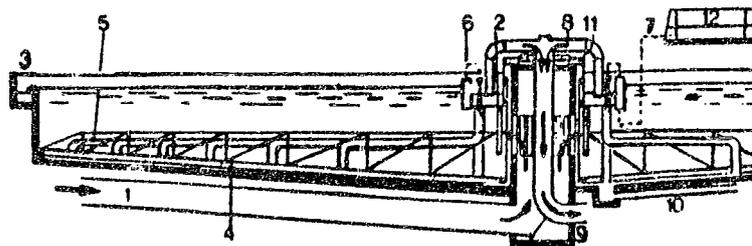


Fig 4.4.6.- Clarificador de succión de fangos, con rasqueta diametral de arrastre central.

- | | |
|------------------------------------|--|
| 1.- Alimentación. | 7.- Alimentación de aire a presión. |
| 2.- Deflector calado. | 8.- Sifones de extracción de los fangos. |
| 3.- Vertedero. | 9.- Tubería de salida de fangos. |
| 4.- Rasquetas. | 10.- Tubería de vaciado. |
| 5.- Tubos de succión. | 11.- Cabeza de arrastre. |
| 6.- Air-lift de descarga de tubos. | 12.- Pasarela de acceso. |

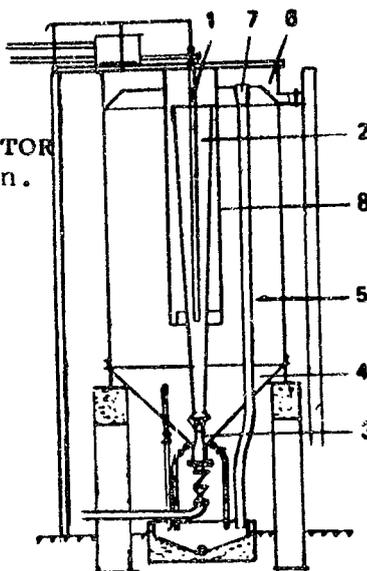


Fig. 4.4.7.- Decantador CIRCULATOR en descarbonatación.

- | |
|---------------------------------|
| 1.- Reactivos. |
| 2.- Zona de rreacción. |
| 3.- Hidroeyector. |
| 4.- Concentracion de fangos. |
| 5.- Zona de decantación. |
| 6.- Colector de agua decantada. |
| 7.- Rebose. |
| 8.- Campana deflectora. |

añadidos. Los fangos que se reintroducen no deben haberse aglomerado a causa de una decantación prolongada que puede dar lugar a una excesiva deshidratación.

Para conseguir que los fangos se mezclen con el líquido, pueden utilizarse dos procedimientos:

- **Aparatos de circulación de fangos.**- los fangos se separan del agua clara en una zona de decantación, seguidamente, se recirculan haciéndoles pasar a una zona de mezcla provista de un sistema de agitación mecánica (**Accelerator, Tubocirculator**) o hidráulica (**Circulator**). El agua bruta, a la que se han añadido los reactivos, se introduce igualmente en esta zona de mezcla.

-**Aparatos de lecho de fangos propiamente dicho.** (tipo **Pulsator**): no se pretende que circule el fango, se trata solamente de mantenerlo en forma en una masa en expansión, que el agua puede atravesar de abajo arriba, de manera regular y uniforme. La agitación, muy lenta, tiene lugar en el punto de introducción del agua a tratar.

B.- Separación de los fangos:

En el seno del lecho de fango o de la zona de recirculación, el fango se encuentra en suspensión y ocupa un volumen aparente que varía según su densidad y la velocidad ascensional del agua. No puede producirse aglomeración.

La verdadera separación tiene lugar en unas zonas tranquilas previstas en el decantador, del cual solo ocupa una pequeña parte. Los fangos se concentran en estas pequeñas fosas (llamadas también concentradores), de las que se extraen automáticamente por medio de válvulas o de sifones, accionados por un programador.

C.- Aplicación de la decantación laminar:

El principio de la decantación laminar no se reserva únicamente a los decantadores estáticos sino también es aplicable a los decantadores por contacto de fangos, en los que aumenta los resultados de velocidad.

En los aparatos de recirculación de fangos los módulos laminares generalmente en forma de tubos cuyas dimensiones deben de elegirse cuidadosamente, para que se consigan los resultados previstos y al mismo tiempo se eviten obstrucciones, se colocan en la zona de decantación, cuya superficie eficaz, de esta forma resulta aumentada artificialmente (**decantador laminar R.P.S.**).

En los aparatos de lecho de fangos, los módulos se colocan en la zona de decantación (**Pulsator de placas o de tubos**) o en el propio lecho de fangos (**Superpulsator**).

En el primer caso los módulos desempeñan la misma misión que en un decantador laminar estático o de recirculación de fangos.

En el segundo caso, los módulos diseñados de forma especial están formados por placas o deflectores y realizan una doble función: aumentan la eficacia del lecho de fangos por medio de los lentos movimientos de torbellino que se crean en su seno, con lo que se reduce considerablemente el tiempo necesario para la floculación; por otra parte su concepción permite que se produzcan torbellinos estacionarios se mantenga entre las placas un lecho de fangos sometido a velocidades ascensionales importantes.

D.- Campo de aplicación:

Los decantadores por contacto de fangos pueden utilizarse en todos los procesos de depuración en los que interviene un reactivo químico:

- Coagulación de materias coloidales (clarificación).
- Decoloración y desodorización.
- Precipitación de sales alcalinotérreas (descarbonatación desendurecimiento).
- Eliminación de hierro y manganeso.
- Tratamiento de aguas residuales por vía química.

4.4.7.1.- Decantadores de recirculación de fangos .

Se caracterizan por la existencia de una zona de decantación . Los fangos se recogen en la base de esta última y a continuación, se envían nuevamente a la zona de reacción.

Estos aparatos por principio de funcionamiento es muy simple, deben estudiarse en su forma general y en todos sus detalles, con el fin de evitar los depósitos de fangos, procurando que éste circule de forma regular, sin importantes movimientos de torbellino, tratando de conseguir su mezcla sin excesiva agitación.

A .- Decantador CIRCULATOR.

Este tipo de decantador está provisto de un dispositivo hidráulico muy eficaz con el que se consigue la aceleración de las reacciones por circulación metódica de los precipitados formados con los reactivos y el agua a tratar.

Es de construcción muy sencilla, y se adapta muy bien a instalaciones medianas con cubas de pequeños diámetros, también se utiliza normalmente cuando se desea conseguir una floculación y una decantación acelerada a presión.

Generalmente, los aparatos tienen un fondo cónico, para facilitar el deslizamiento

de los fangos del eyector que efectúa la circulación. El aparato no lleva ningún órgano mecánico.

En los aparatos de gran diámetro, que no pueden tener suficiente pendiente de fondo, se utilizan rasquetas giratorias idénticas a las de los decantadores primarios.

El Circulator puede clarificar o descarbonatar normalmente un agua con un tiempo de retención comprendido entre 45 min y 2 h, según los casos; la velocidad ascensional del agua no debe ser superior a 2 m/h en clarificación y 5 a 7 m/h en desendurecimiento.

B.- Decantador TURBOCIRCULATOR:

En este aparato, la recirculación de los precipitados formados se realiza mediante una hélice de perfil bien estudiado. Esta hélice evita que se rompan los precipitados frágiles de hidróxido metálico, que no soporta la recogida por eyector hidráulico y permite que el aparato se utilice tanto en clarificación como en desendurecimiento.

La zona de reacción situada en el centro del aparato, permite una reacción completa de coagulación, floculación, desendurecimiento e incluso de oxidación.

Un sistema de berrido lleva los fangos, de forma continua, hacia el centro donde se recogen por el sistema de recirculación, o se dirigen hacia la fosa de fangos, en la que se concentran o de donde se extraen intermitentemente.

C.- Decantador ACELATOR:

El decantador **Acclator NS** dispone de una zona central de reacción rodeada por una zona de decantación. Estas dos zonas se comunican por arriba y por abajo.

Una turbina situada en la parte superior de la zona de reacción hace que el agua pase a la zona de decantación. Los fangos que sedimentan en esta última, vuelven por circulación inducida a la zona central, produciéndose así un enriquecimiento del fango con el que se consigue una floculación rápida y la formación de un precipitado denso.

Eventualmente, un agitador de fondo realiza una mezcla rápida del agua bruta con el fango y los reactivos que al mismo tiempo evita la acumulación de sedimentos pesados, que podrían atascar el aparato.

Por medio de una o varias fosas puede extraerse el exceso de fangos en la forma más concentrada posible.

D.- Decantador laminar R.P.S.

El decantador R.P.S. es en realidad un turbocirculator de rasquetas, con zona de decantación laminar dentro de una estructura rectangular.

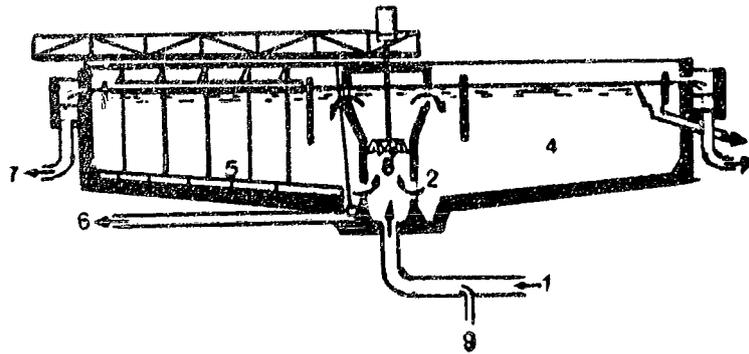


Fig. 4.4.8.- Decantador **TURBOCIRCULATOR**.

- | | |
|------------------------------|---|
| 1.- Llegada agua bruta. | 6.- Fangos en exceso. |
| 2.- Recirculación de fangos. | 7.- Salida de agua tratada. |
| 3.- Maduración del flóculo. | 8.- Helice de mezcla agua bruta-
fangos recirculados |
| 4.- Zona de decantación | 9.- Introducción de reactivos. |
| 5.- Rascadores. | |

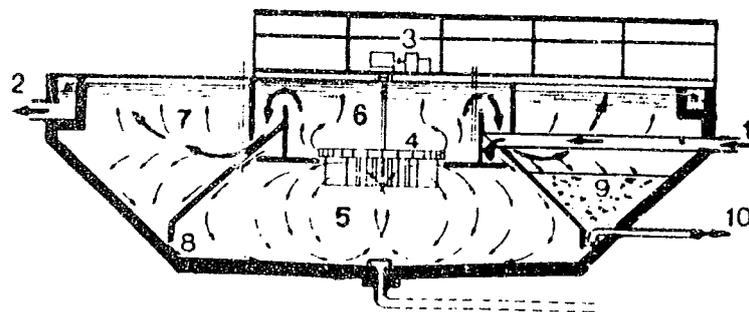


Fig. 4.4.9.- Decantador **ACCELATOR**.

- | | |
|------------------------------|--------------------------------|
| 1.- Llegada de agua bruta. | 6.- Zona de mezcla secundaria. |
| 2.- Salida de agua tratada. | 7.- Agua clarificada. |
| 3.- Grupo de arrastre. | 8.- Recirculación de fangos. |
| 4.- Turbina. | 9.- Concentrador de fangos. |
| 5.- Zona de mezcla primaria. | 10.- Fangos en exceso. |

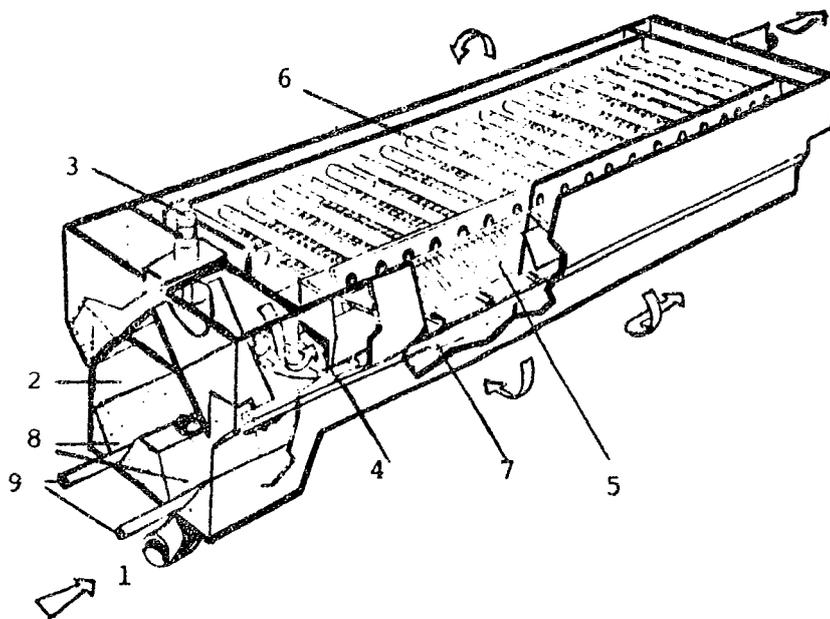


Fig. 4.4.10.- Decantador laminar R.P.S.

- 1.- Entrada de agua bruta.
- 2.- Cámara de reacción.
- 3.- Helice de recirculación.
- 4.- Conductos de alimentación de la zona de decantación.
- 5.- Zona de decantación laminar.
- 6.- Dispositivo de recogida de agua decantada.
- 7.- Rasquetas de fangos.
- 8.- Fosa de fangos.
- 9.- Tuberías de extracción de fangos.

en este aparato la cámara de reacción cuyo fondo esta previsto como de fosa de fangos, va equipada con una hélice de flujo axial, que realiza la recirculación de los fangos y que comunica lateralmente, por su parte inferior con la zona de decantación laminar. En esta zona un dispositivo de barrido de la solera lleva los fangos depositados de forma permanente hacia la cámara de reacción en que nuevamente se ponen en circulación o se concentran antes de ser extraídos del aparato.

La mezcla agua-fango que sale por la parte superior de la cámara de reacción, se reparte uniformemente por dos conductos laterales, en toda la longitud de la zona de decantación. La homogeneidad en la recogida del agua decantada se consigue mediante una serie de tuberías perforadas, uniformemente espaciadas que vierten a dos arquetas dispuestas por encima de los conductos de distribución.

Cuando los caudales de agua a tratar son muy importantes, el aparato puede estar provisto de dos zonas de decantación, dispuestas a ambos lados de una misma cámara de reacción.

En caso de equipos de pequeñas dimensiones, éstos pueden preverse sin sistema de barrido.

4.4.7.2.- Decantadores de lecho de fangos .

A.- Comportamiento de un lecho de fangos:

Si se hace pasar a través de una capa de fango una corriente vertical de agua, se comprueba que el volumen ocupado por el fango varia con el caudal y aumenta con este hasta cierto límite por encima del cual la expansión del fango es tal que las partículas que lo constituyen se encuentran tan alejadas unas de otras, que la fuerza de gravitación es insuficiente para mantener su cohesión. El fango es arrastrado por el agua y el efecto de fangos queda suprimido. La velocidad límite así definida no es la velocidad máxima a la que podrá funcionar el decantador. Esta velocidad máxima depende de gran número de factores (temperatura, naturaleza del agua. etc.).

Un lecho de fangos se comporta como un resorte que tiende a comprimirse bajo la acción de la gravedad, pero que se estira bajo la acción de la fuerza ejercida por el agua sobre las partículas de fangos que constituyen este resorte, las cuales aumentan con la velocidad del agua. El resorte se rompe si se estira demasiado, lo que es preciso evitar adoptando una velocidad conveniente.

Puede evitarse la resistencia del resorte y aumentar por tanto la velocidad máxima posible mejorando la cohesión de lecho de fangos mediante el empleo de ayudantes de

floculación tales como la sílice activada o los polielectrólitos. Esta velocidad puede más que duplicarse si se mejora mecánicamente el contacto del agua con los fangos y la concentración de estos reduciendo al mismo tiempo el nivel de turbulencia del flujo de agua que atravieza el lecho de fangos.

Si se coloca un recipiente sin tapa en el seno de una masa de fangos mantenida en expansión por una corriente de agua ascensional se comprueba que el fango se concentra en el mismo. Esto se comprende fácilmente, ya que dentro de dicho recipiente no circula el agua y no existe fuerza alguna que tienda a mantener el fango en expansión sucede como si el recipiente constituyese una zona de débil presión (resorte en su posición naturalmente comprimida), mientras que en el resto del decantador existe una presión más elevada (resorte estirado por la acción de una fuerza de rozamiento).

Es natural que el fango pase rápidamente de la zona de alta presión hacia la zona de baja presión. El recipiente en cuestión constituye el concentrador desde el cual podrá evacuarse el exceso de fango.

B.- Decantador PULSATOR .

El PULSATOR está constituido por un depósito de fondo plano, provisto en su base de una serie de tubos perforados que permiten introducir el agua bruta uniformemente por todo el fondo del decantador en su parte superior va provisto por una serie de tubos perforados o canaletas mediante los cuales se consigue la recogida uniforme del agua decantada y se evita cualquier irregularidad de velocidad en las diferentes partes del aparato. Para alimentar el colector inferior de una manera discontinua, pueden emplearse diferentes medios. Todos consisten en almacenar, durante un tiempo determinado un cierto volumen de agua bruta que se hace penetrar en seguida en el aparato de la forma más rápida posible.

El procedimiento más económico para efectuar esta operación consiste en introducir el agua bruta en una campana (6) en cuyo interior se aspira el aire por medio de una máquina (7), que extrae un caudal de aire sensible igual a la mitad del caudal máximo a tratar. Esta campana se encuentra en comunicación con el colector inferior del decantador (ver fig. 4.4.11.).

En estas condiciones el nivel de agua bruta aumenta progresivamente en la campana, cuando alcanza una altura comprendida entre 0.6 m y 1.0 m por encima del nivel de agua en el decantador, se efectúa la apertura brusca de una válvula (8) de comunicación de la campana con la atmósfera por medio de un relé eléctrico, la presión atmosférica actúa entonces, inmediatamente, sobre el agua almacenada en la campana, que penetra en el de-

floculación tales como la sílice activada o los polielectrólitos. Esta velocidad puede más que duplicarse si se mejora mecánicamente el contacto del agua con los fangos y la concentración de estos reduciendo al mismo tiempo el nivel de turbulencia del flujo de agua que atravieza el lecho de fangos.

Si se coloca un recipiente sin tapa en el seno de una masa de fangos mantenida en expansión por una corriente de agua ascensional se comprueba que el fango se concentra en el mismo. Esto se comprende fácilmente, ya que dentro de dicho recipiente no circula el agua y no existe fuerza alguna que tienda a mantener el fango en expansión sucede como si el recipiente constituyese una zona de débil presión (resorte en su posición naturalmente comprimida), mientras que en el resto del decantador existe una presión más elevada (resorte estirado por la acción de una fuerza de rozamiento).

Es natural que el fango pase rápidamente de la zona de alta presión hacia la zona de baja presión. El recipiente en cuestión constituye el concentrador desde el cual podrá evacuarse el exceso de fango.

B.- Decantador PULSATOR .

El PULSATOR está constituido por un depósito de fondo plano, provisto en su base de una serie de tubos perforados que permiten introducir el agua bruta uniformemente por todo el fondo del decantador en su parte superior va provisto por una serie de tubos perforados o canaletas mediante los cuales se consigue la recogida uniforme del agua decantada y se evita cualquier irregularidad de velocidad en la diferentes partes del aparato. Para alimentar el colector inferior de una manera discontinua, pueden emplearse diferentes medios. Todos consisten en almacenar, durante un tiempo determinado un cierto volumen de agua bruta que se hace penetrar en seguida en el aparato de la forma mas rápida posible.

El procedimiento más económico para efectuar esta operación consiste en introducir el agua bruta en una campana (6) en cuyo interior se aspira el aire por medio de una máquina (7), que extrae un caudal de aire sensible igual a la mitad del caudal máximo a tratar. Esta campana se encuentra en comunicación con el colector inferior del decantador (ver fig. 4.4.11.).

En estas condiciones el nivel de agua bruta aumenta progresivamente en la campana, cuando alcanza una altura comprendida entre 0.6 m y 1.0 m por encima del nivel de agua en el decantador, se efectúa la apertura brusca de una válvula (8) de comunicación de la campana con la atmósfera por medio de un relé eléctrico, la presión atmosférica actúa entonces, inmediatamente, sobre el agua almacenada en la campana, que penetra en el de-

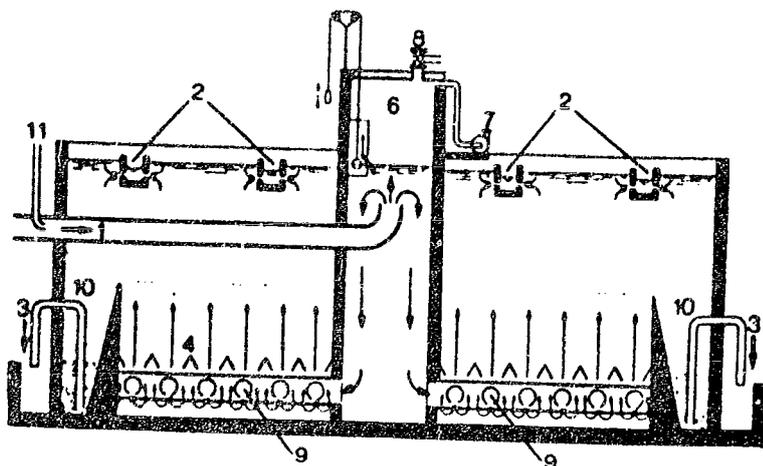


Fig. 4.4.11.- Decantador PULSATOR.

- | | |
|-------------------------------|--|
| 1.- Llegada de agua bruta. | 7.- Bomba de vacío. |
| 2.- Salida de agua decantada. | 8.- Válvula automática rompevacío. |
| 3.- Extracción de fangos. | 9.- Tubos perforados de reparto de agua bruta. |
| 4.- Tranquilizadores. | 10.- Concentradores de fangos. |
| 6.- Campana de vacío. | 11.- Introducción re reactivos. |

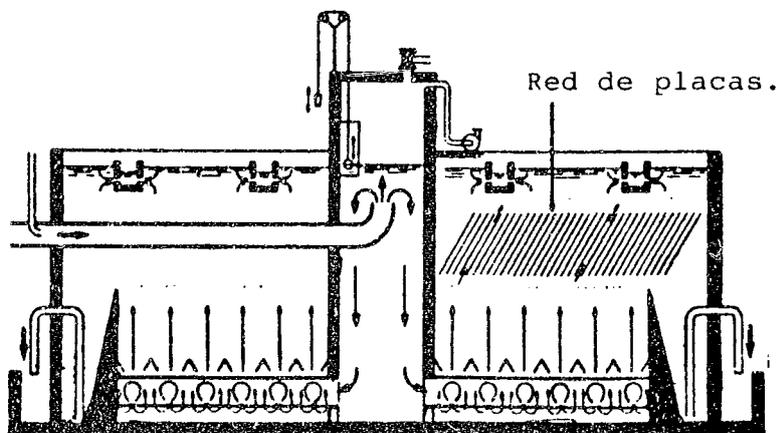
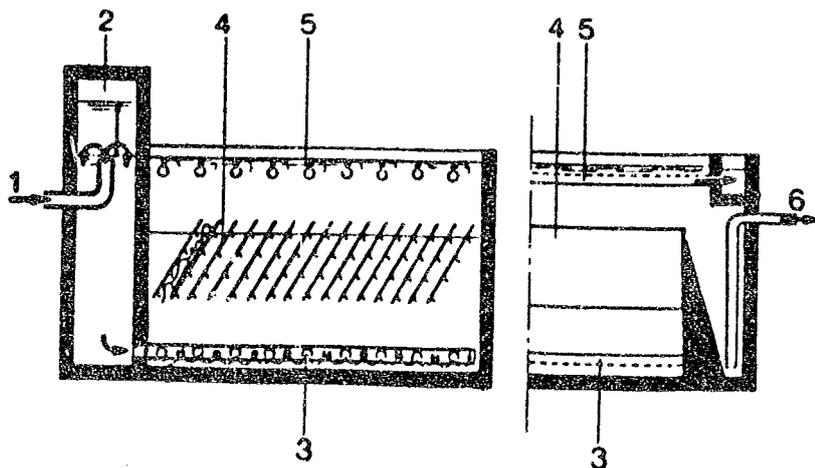


Fig. 4.4.12.- Decantador PULSATOR laminar.



- | |
|---|
| 1.- Llegada de agua bruta. |
| 2.- Campana de vacío. |
| 3.- Tubos perforados de reparto. |
| 4.- Placas. |
| 5.- Tubos perforados de salida de agua. |
| 6.- Extracción de fangos. |

Fig. 4.4.13.- Decantador SUPERPULSATOR.

cantador a gran velocidad.

Estos aparatos se regulan generalmente de forma que el vaciado de la campana al decantador se efectue en 5 a 10 segundos , en tanto que el tiempo de llenado de esta campana dura de 30 a 40 segundos.

La aspiración en la campana se efectúa por medio de un ventilador o de un grupo motocompresor que funciona como bomba de vacío. Las aperturas y cierres de la válvula de puesta en comunicación con la atmósfera se accionan en función de los niveles del agua contenida en la campana.

El colector general, situado en la parte inferior del decantador, es de gran succión, con el fin de reducir su pérdida de carga. Los orificios dispuestos en sus ramificaciones están calculados de forma que se constituya un lecho de fangos homogéneo en la mitad inferior del decantador. Este lecho está animado de movimientos alternos verticales y tiende a amentar el volumen, debido a las impurezas aportadas por el agua bruta y a los reactivos floculantes introducidos, con lo que su nivel asciende de manera regular. Se reserva una cierta zona del decantador para formar las fosas de fondo inclinado (10) en las que vierte y concentra el exceso de fangos. Las purgas tienen lugar de forma intermitente, por las tuberías (3).

El aparato carece de todo sistema de agitación mecánica de los fangos, que tendería romper los floculos ya formados. A causa de la elevada concentración de lecho de fango y de su acción amortiguadora, un mal ajuste de la dosis de tratamiento, o una variación del pH del agua bruta no provoca graves tanstornos de forma inmediata: se observa una variación lenta de la turbiedad del agua decantada, pero nunca el escape en masa de los fangos contenidos en el decantador.

C.- Decantador PULSATOR laminar.

Instalando por encima de lecho de fangos del pulsator, módulos laminares, placas o tubos generalmente de material plástico inclinados unos 60 °C con respecto a la horizontal, puede mejorarse la calidad del agua producida a igual velocidad de decantación en un aparato clásico. o bien aumentar dicha velocidad, la disposición de estos módulos puede apreciarse en la fig. 4.4.12.

Las partículas de floculo que hayan podido escapar de lecho de fangos se depositan sobre las paredes inferiores de los módulos y se acumulan en una ligera capa hasta que su cohesión les permita deslizarse y descender nuevamente al lecho de fango.

D.- SUPERPULSATOR .

En el superpulsator se combinan las ventajas de la decantación por contacto de fangos, de la pulsación de un lecho de fangos y de decantación laminar. Este decantador tiene varios puntos en común con el Pulsator, del cual se deriva y cuyas posibilidades aumenta. Por consiguiente, conserva el mismo principio de alimentación de agua bruta y de reparto en la base del aparato. (fig. 4.4.13).

La mezcla agua "coagulada-fango ya floculados" asciende verticalmente en filetes paralelos, a travéz de la zona profunda situada entre los tubos inferiores de distribución y de las placa inclinadas, que se alimentan así de manera uniforme. En este caso, pueden suprimirse los "tranquilizadores" utilizados en el Pulsator.

El agua floculada, perfectamente equirrepartida por la red de distribución, penetra seguidamente en la red de placas paralelas inclinadas a 60° sobre la horizontal, y perpendiculares al concentrador. La cara inferior de cada placa va provista de deflectores, que sirven a la vez de soportes y de órganos creadores de movimientos de torbellino.

Las placas de deflectores permiten mantener en el lecho de fangos una concentración elevada, dos veces superior a la de un Pulsator que funcione a la misma velocidad. Esta fuerte concentración del lecho de fangos, que puede llegar hasta un 50 % en volumen hace que el Superpulsator desempeñe el papel de un verdadero filtro de impurezas, principal ventaja de los decantadores de lecho de fangos concentrados de gran altura.

Como el pulsator, el nivel superior del lecho de fangos se limita por vertido a la zona del concentrador en la que no se ejerce empuje alguno debido a la velocidad ascensional, y la recogida del agua decantada se realiza por medio de una red de colectores. La velocidad de funcionamiento del Superpulsator le permite una puesta en marcha muy rápida.

4.4.7.3.- Dispositivos de extracción de fangos .

En el caso de aguas sometidas a un tratamiento de floculación o de precipitación química, con excepción de los decantadores horizontales sin barrido (que deben vaciarse por completo para su limpieza), los fangos obtenidos en el tratamiento se concentran en las fosas de fangos (o concentradores). Estos fangos pueden extraerse mediante un dispositivo de depura continua, pero es preferible evacuar de forma intermitente los fangos que sedimentan, la frecuencia y duración de las purgas pueden regularse mediante aparatos de relojería.

El caudal instantáneo es entonces mayor siendo necesario disponer de una carga sufi-

ciente para conseguir velocidades elevadas en las tuberías y evita así todo riesgo de obstrucción.

Los órganos de extracción pueden ser válvulas automáticas, sifones o incluso bombas.

Las válvulas automáticas, generalmente son válvulas de membrana o de mangito, cuyo cierre se consigue aplicando una presión de agua o de aire al exterior del manguito o de la membrana, la apertura de la válvula es accionada por una electroválvula de 3 vías situada en el circuito del fluido motor y conectada al programador.

Los sifones se utilizan especialmente para extracciones de fangos de los concentradores de los decantadores Pulsator y Superpulsator. Se provoca el cebado del sifón conectando su punto alto al órgano de puesta en vacío de la campana del Pulsator. Se desceba el mismo mediante la puesta a la atmósfera de la tubería.

La extracción de fangos fuertemente concentrados se realiza por medio de bombas. Su empleo está totalmente indicado en el caso de un decantador de rasquetas con arrastre central, que trate un agua cargada, en tal caso, las bombas se alojan en la columna central del aparato tal como puede apreciarse en la figura 4.4.14. lo que permite una salida aérea de los fangos.

Cuando el caudal del decantador es variable y se desea conseguir una pérdida mínima de agua y una concentración máxima del fango extraído la frecuencia de las purgas debe conseguir las variaciones del caudal, lo que puede hacerse automáticamente intercalando la apertura de válvulas de purga durante un tiempo constante, pero a intervalos de duración proporcional al caudal de alimentación del decantador.

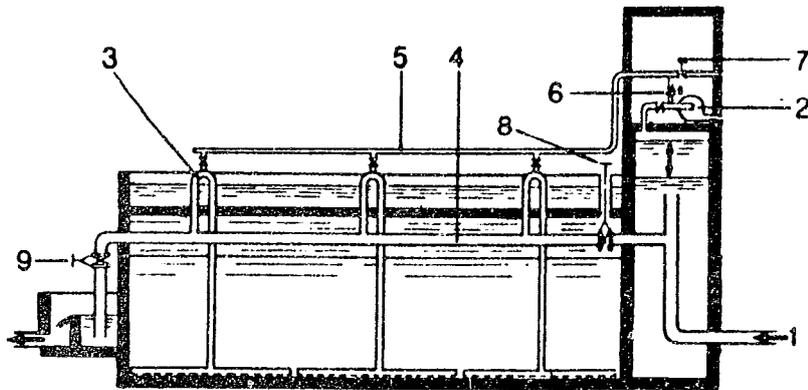


Fig. 4.4.14.- Dispositivo de extracción de fangos por sifón del PULSATOR y del SUPERPULSATOR .

- 1.- Llegada de agua bruta.
- 2.- Bomba de vacío.
- 3.- Extracción de fangos por sifón.
- 4.- Tubería general de extracción de fangos.
- 5.- Tubería de puesta en vacío de los sifones.
- 6.- Electro válvula.
- 7.- Válvula de puesta a la atmósfera.
- 8 y 9.- Válvulas para limpieza automática de la solera.

4.5.- FLOTACION .

En la flotación interviene la diferencia de la masa volúmica de sólidos o de globulos líquidos y la del líquido en el que se encuentra en suspensión. Contrariamente a lo que ocurre en la decantación, este proceso de separación sólido-líquido o líquido-líquido únicamente se aplica a partículas que tienen una masa volúmica real (flotación natural) o aparente (flotación provocada) inferior a la del líquido que la contiene.

En la flotación provocada se aprovecha la aptitud que tienen ciertas partículas sólidas o líquidas para unirse a partículas de gas (generalmente, aire) y formar conjuntos partícula-gas menos densos que el líquido del cual constituye la fase dispersa.

La resultante de las fuerzas (gravedad, empuje de Arquímedes, y fuerza de resistencia) conduce a un desplazamiento ascendente de los conjuntos partícula-gas que se concentran en la superficie libre del líquido del que se trata de eliminar.

Para que sea factible la flotación de partículas sólidas o líquidas mas densas que el líquido, es preciso que la adherencia de las partículas a las burbujas de gas sea mayor que la tendencia a establecer un contacto entre las partículas y el líquido. Este contacto entre un líquido y un sólido se determina mediante la medida del ángulo formado por la superficie del sólido y la burbuja de gas. fig. 4.5.1.

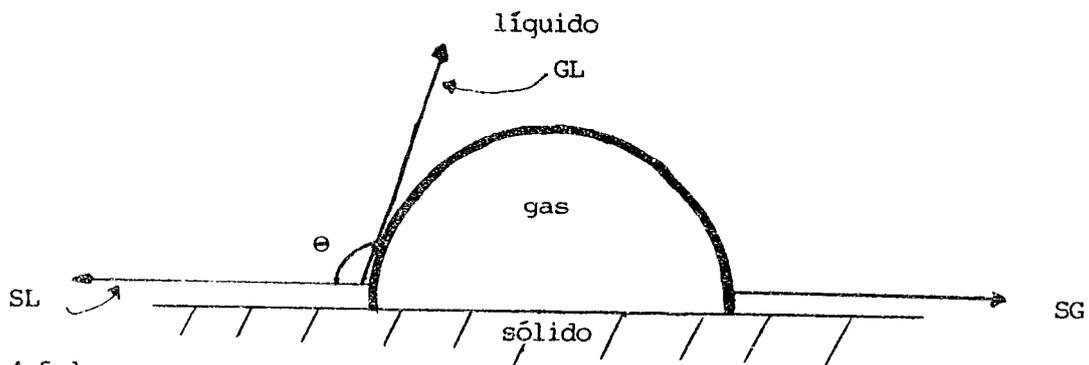


fig.- 4.5.1.

- si $\theta = 0$, el contacto entre el sólido y el líquido se realiza de forma perfecta; es imposible la adherencia sólido-gas.

-si $\theta = 180^\circ$, el contacto entre el sólido y el líquido es nulo; es óptimo el contacto sólido-gas se trata de un caso límite que nunca se da en la práctica, puesto que ningún líquido de un ángulo θ mayor de 110° .

- entre estos dos valores, la adherencia partícula-gas aumenta con el valor del ángulo θ .

Puede considerarse este tipo de flotabilidad de una partícula en el caso de partículas sólidas o líquidas (aceites) que tienen una forma relativamente simple y una naturaleza bien conocida. En el caso de partículas floculadas, a los fenómenos de superficie se suman las adherencias mecánicas ligadas a la estructura de los flóculos, especialmente inclusiones de gas en los flóculos.

4.5.1.- Ecuaciones de la velocidad ascensional .

El conjunto de partícula-burbuja de gas adquiere rápidamente una velocidad ascensional cuyo valor permanece constante, se trata de la velocidad límite de ascensión, que se calcula como para las partículas sometidas a sedimentación, por medio de la fórmula general de Newton, en la que para el caso de flotación:

d : diámetro del conjunto partícula-burbuja de gas.

ρ_a : masa volúmica aparente del conjunto partícula-burbuja gas.

Los cálculos siguen siendo los mismos: por lo tanto, en función del número de Reynolds, pueden definirse regímenes de flujo para los cuales la velocidad límite ascensional viene dada por las fórmulas particulares de Stokes (laminar), de Allen (intermedio) y de Newton (turbulento) .

$$\text{La ecuación de Stokes } v = \frac{(\rho_a - \rho_s)gd^2}{18 \eta}$$

Mediante esta ecuación, se aprecia la influencia de los diferentes factores : la velocidad v varía como d^2 y $(\rho_a - \rho_s)$ y en el mismo sentido que la temperatura del líquido la que varía en sentido inverso a la viscosidad. Igualmente es preciso que intervenga el factor de forma o de esfericidad del conjunto partícula-burbuja de gas que en la ecuación de Stokes se asimila a una esfera.

La influencia favorable del diámetro o del tamaño del conjunto partícula- burbuja de gas no ha de hacer olvidar que en el caso de la flotación de partículas más pesadas que el líquido , la superficie específica, es decir la relación

$\frac{\text{superficie}}{\text{volumen}}$ o $\frac{\text{superficie}}{\text{masa}}$ disminuye cuando aumenta el diámetro

Se obtiene así para una misma cantidad de aire fijado por unidad de superficie una reducción del factor $(\rho_a - \rho_s)$, interviniendo por lo tanto, los dos parámetros.

El volumen mínimo de gas V_g , de masa volúmica ρ_g , necesario para conseguir la flota-

ción de una partícula de masa s y de masa volúmica p , en un líquido de masa volúmica l , viene dado por la relación:

$$\frac{Vg}{s} = \frac{\rho_p - \rho_l}{\rho_l - \rho_g} \frac{1}{\rho_p}$$

4.5.2.- Flotación mecánica .

Este procedimiento consiste en una dispersión mecánica de burbujas de aire de 0.1 a 1 mm de diámetro , se utiliza especialmente para la separación y concentración por formación de espumas de los minerales. El mineral triturado en forma de partículas de diámetro generalmente inferior a 0.2 mm se pone en suspensión en el agua al que se añade un agente colector, que favorece la adherencia del aire a las superficies haciéndolas hidrófobas y en un agente espumante. A veces es necesario un activador para permitir la adherencia a la superficie del agente colector. Cuando se pretende una separación se utiliza un agente depresor selectivo para evitar la flotación del cuerpo indeseable. Normalmente es necesario ajustar el pH.

La suspensión así acondicionada se introduce en el centro de un rotor que gira a gran velocidad y que igualmente aspira el aire. Las burbujas de aire finalmente divididas, aparecen durante la impulsión de la emulsión através de una jaula que rodea el rotor.

Debido a su brusquedad este procedimiento no se aplica al tratamiento de aguas, en el que el material que ha de separarse se presenta en forma de un precipitado más o menos frágil.

Un procedimiento de flotación mecánica mejor adaptado a los problemas de tratamiento de agua consiste en provocar la creación de las burbujas de aire y su dispersión por medio de los **VORTIMIX**, consiste en :

- un agitador mecánico con hélice sumergida de palas inclinadas que crea una circulación del líquido de arriba a abajo.

- un dispositivo de inyección de aire comprimido situado bajo la hélice.

Las burbujas de aire de tamaño medio que escapan de este dispositivo, son pulverizados por la palas del rotor y se mezclan íntimamente con el flujo de impulsión de agua creado por el efecto de bombeo, la emulsión agua-aire se envía en diagonal hacia el fondo del depósito.

Mediante esta disposición se consigue una agitación eficaz de forma permanente puesto que el agitador es de gran rendimiento hidráulico y puede regularse la oxigenación sepa-

radamente, variando el caudal de aire inyectado. La intensa agitación creada por la hélice en la zona de introducción del aire favorece el rendimiento de oxigenación que puede alcanzar hasta un 30 % .

4.5.3.- Flotación por inyección de aire .

Se trata en realidad de una flotación natural mejorada por inyección de burbujas de aire de algunos milímetros de diámetro en el seno de la masa líquida.

Para ello se utilizan cuerpos porosos o en el caso de líquidos muy cargados, difusores de burbuja de tamaño medio dispuestos de forma que provoquen turbulencias locales que favorecen la división de las burbujas de aire. El tamaño de las burbujas deben ser lo suficientemente pequeño para que pueda adherirse a las partículas que deben flotar.

En las instalaciones destinadas a la eliminación de materias ligeras (grasas, aceites espesos, fibras gruesas, papeles, etc.), se prevén generalmente dos zonas una de agitación y emulsión y la otra en calma de flotación propiamente dicha la figura 4.5.2. representa el esquema de principio de proceso.

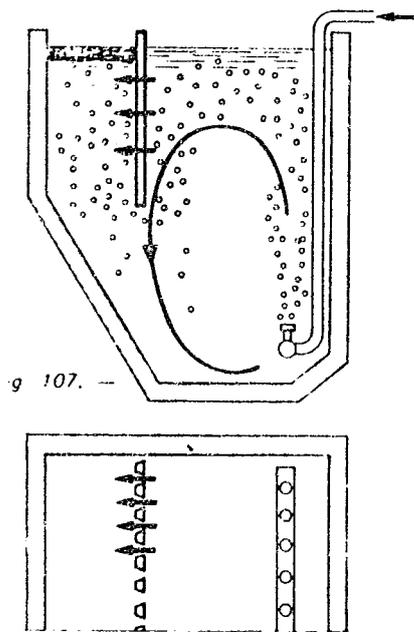
En la zona de emulsión, la suspensión se agita y se mezcla con el aire, el recorrido de la burbujas de aire aumenta por el movimiento en espiral creado por la agitación.

En la zona de separación y de recogida de los materiales flotantes el caudal es muy pequeño y por consiguiente la turbulencia muy reducida.

4.5.4.- Flotación por aire disuelto .

En el tratamiento de agua se reserva el término de flotación a los procedimientos en los que se utilizan burbujas de aire muy finas " microburbujas ", de 40 a 70 micras de diámetro, similares a las que se encuentran en el agua blanca que sale por un grifo a gran presión.

La técnica más extendida de producción de microburbujas es la de **presurización**. Las burbujas se obtienen por expansión de una solución enriquecida de aire disuelto en una presión de varias atmósferas. Como líquido presurizado se utiliza en agua bruta o agua tratada recirculada. El caudal de agua presurizada es sólo una fracción del caudal nominal de la instalación; para presiones de 8 a 3 atmósferas, esta fracción equivale del 10 al 30 % del caudal a tratar y se obtiene como el caudal medio de la disolución de un exceso de aire del 60 % aproximadamente con relación al nivel de saturación a la presión considerada el consumo de aire comprimido varía entre 15 y 50 litros nomales de aire por m³ de agua tratada.



g 107. —

Fig. 4.5.2.

4.5.5.- Electroflotación.- procedimiento en el que se producen burbujas de oxígeno y de hidrógeno por electrólisis del agua mediante electrodos apropiados. En la práctica las densidades de corriente son del orden de 80 a 90 amperios-hora por m^2 de superficie de flctador la producción de gas es de 50 a 60 litros por hora y por m^2 de superficie. Las velocidades empleadas son del orden de 4 m/h .

La flotación se combina frecuentemente con una floculación previa en la cual puede engrosarse el floculo y aumentar así la superficie de las partículas, mejorando así la fijación de las burbujas y se incrementa la velocidad ascensional de los flóculos.

La velocidad de separación o velocidad "descensional" del agua adoptada en los aparatos de flotación, varia según la naturaleza de las suspensiones a tratar y según la forma de producir y distribuir las microburbujas .

4.5.6.- Flotadores .

Los flotadores pueden ser circulares o rectangulares reservandose esta última forma al tratamiento de aguas de abastecimiento público, ya que con ella se consiguen realizar conjuntos compactos que agrupan el floculador, el flotador y los filtros dentro de un espacio reducido .

El reparto de las burbujas de aire es mejor en los aparatos de forma circular que en los de forma rectangular. La distancia entre la columna de llegada y la chimenea de salida es menor e igualdad de capacidad y puede mantenerse un reparto casi uniforme de las burbujas en toda la sección horizontal del aparato.

La alimentación esta constituida siempre por una columna o una cámara que tiene por objeto:

- la puesta en contacto del agua a tratar (floculada o no) con el agua presurizada. La expansión del agua presurizada debe efectuarse preferentemente a la entrada inmediata del aparato;
- la dispersión de la energía cinética de la mezcla agua bruta-agua presurizada y reducción de las velocidades antes de su introducción en la zona de flotación propiamente dicha .

En esta camara ademas se eliminan las burbujas gruesas que hayan podido formarse a la entrada.

En el caso de una floculación previa, tienen una gran importancia los puntos y niveles relativos de introducción del agua bruta y del agua presurizada.

Para la recogida y la eliminación de fangos, en los flotadores circulares los fangos

son empujados por una o varias rasquetas hacia el canal radial de longitud igual a la mitad del radio y cuya rampa de acceso debe de realizarse de forma que se asegure el contacto con la lámina rascadora.

El número de rasquetas está condicionado por la cantidad de fango que ha de evacuarse por la rapidez con que deba hacerse esta evacuación, con el fin de evitar todo riesgo de desaereación y por la distancia a la que puede empujarse este fango sin que se disgregue.

En los flotadores rectangulares, el fango es empujado por una serie de rascadores arrastrados por cadenas sin fin, hacia un canal de evacuación dispuesto en uno de los extremos.

4.5.6.1.- Sediflotazur .

El sediflotazur es un flotador **circular**, cuyo diámetro puede alcanzar hasta 20 m, tiene un doble dispositivo de barrido de fangos en la superficie y en el fondo, por lo tanto, se adapta perfectamente al tratamiento de aguas que produce al mismo tiempo fangos separables por flotación y fangos pesados únicamente sedimentables.

La rasqueta de fondo es accionada por una pasarela radial de arrastre periférico, idéntica a la que llevan los decantadores estáticos de rasquetas. La rotación de los brazos de los rascadores radiales cuyo número varía con la cantidad de fango que ha de extraerse y con el diámetro del aparato, es accionada por la pasarela en cuyo pivote los brazos están solidarizados por una articulación. Su extremo opuesto va soportado por un carro que se desliza sobre un camino de rodadura periférico. Las láminas rascadoras de movimiento paralelo al plano de agua se articulan alrededor de los brazos y llevan en cada extremo una rueda que al ponerse en contacto con una leva, asegura su penetración lenta y progresiva en el agua después de pasar por encima del canal de recogida de fangos. Esto evita la formación de remolinos perjudiciales para el correcto mantenimiento del lecho de fangos flotante. Los fangos se elevan hasta el nivel de vertido al canal por deslizamiento sobre una rampa cuyo perfil izquierdo garantiza en todo punto el contacto con una lamina rascadora, fig. 4.5.3.

4.5.6.2.- Sediflotor .

El Sediflotor, lo mismo que el Sediflotazur, va equipado con dispositivo de barrido de superficie y en algunos casos va provisto de rascadores de fondo. Este aparato se utiliza cuando el agua a tratar está cargada de materias pesadas sedimentables,

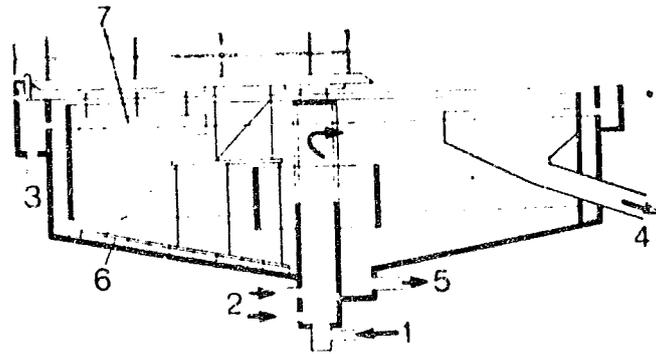


Fig. 4.5.3.- SEDIFLOTAZUR.

- | | |
|----------------------------------|----------------------------|
| 1.- Llegada de agua bruta. | 5.- Salida de fangos. |
| 2.- Llegada de agua presurizada. | 6.- Barrido de fondo. |
| 3.- Salida de agua tratada. | 7.- Barrido de superficie. |
| 4.- Salida de flotantes. | |

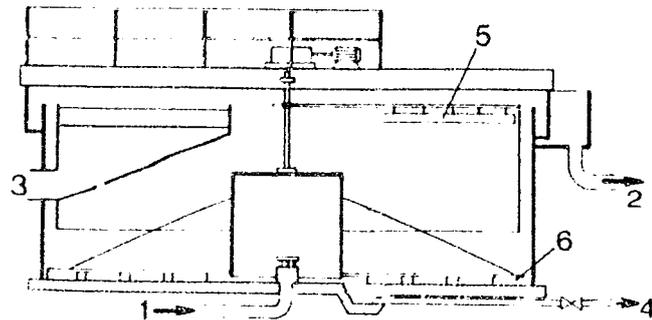


Fig.4.5.4.- SEDIFLOTOR.

- | | |
|--|----------------------------|
| 1.- Llegada de agua bruta presurizada. | 4.- Salida de fangos. |
| 2.- Salida de agua tratada. | 5.- Barrido de superficie. |
| 3.- Salida de flotantes. | 6.- Barrido de fondo. |

o también cuando, debido a unas condiciones climatológicas muy severas se hace difícil el empleo de dispositivo de arrastre periférico del sediflotazur, fig. 4.5.4.

4.6 .- F I L T R A C I O N .

La filtración es una operación unitaria clasificada dentro de las separaciones mecánicas. Implica separar partículas sólidas contenidas en un fluido por su paso a través de un medio ya sea poroso, fibroso o granular, en el cual quedan retenidas las partículas.

Como aspectos generales en la filtración se considera que intervienen dos fases, una integrada por el fluido, ya sea gas o líquido, y la otra integrada por el conjunto de partículas sólidas que se encuentran suspendidas en el fluido. La consideración de quien es el contaminante o la fase a purificar es relativa pues en ocasiones, la filtración tiene por objeto:

- 1) recuperar sólidos.
- 2) recuperar el fluido.
- 3) recuperar ambas partes.
- 4) ser un pretratamiento para facilitar otras operaciones.

La clasificación de las partículas suspendidas sólidas que se retienen pueden ser:

- a) gruesas o finas.
- b) rígidas o plásticas.
- c) redondas o alargadas.
- d) individuales separadas o agregados.
- e) orgánicas o inorgánicas.

Si las materias en suspensión que deben separarse tienen una dimensión superior a la de los poros, quedarán retenidas en la superficie del filtro. Esta filtración se denomina filtración a través de un soporte.

En el caso contrario, las materias quedarán retenidas en el interior de la masa porosa denominándose filtración a través de un lecho filtrante.

La elección entre los diversos tipos de filtración sobre soporte y filtración sobre lecho filtrante, dependen de varios criterios:

- características del líquido a filtrar, de sus impurezas y de su evolución con el tiempo.
- calidad del filtrado que debe obtenerse y tolerancias admitidas.

- calidad del aglomerado de las materias retenidas, si se tiene como fin su recuperación.
- condiciones de instalación.
- posibilidades y medios disponibles para el lavado.

Las diversas soluciones se diferenciarán en los gastos de instalación y en los gastos de explotación, estando relacionados con las condiciones del líquido a filtrar, la forma del lavado, el grado de automatismo y de control, etc.

En la elección de un filtro es tan importante la posibilidad de un lavado fácil, eficaz y económico, como la obtención de la mejor calidad del agua filtrada, ya que esta última solo se obtendrá de forma constante, si el lavado mantiene siempre intacto el material filtrante.

4.6.1.- Procedimientos de filtración .

La filtración a través de un soporte se puede clasificar como sigue:

- a) a través de un soporte delgado de mallas: desbaste por reja , tamizado, microtamizado, filtro prensa o filtro al vacío.
- b) a través de soporte grueso: filtros de material aglomerado o sintetizado o de cartuchos.
- c) a través de soporte con precapa: filtros de bujías, de bastidores, discos o tambores.

El primer método constituye técnicas de desbaste y de tamizado o de seguridad contra contaminantes accidentales, los cuales se mencionarán en los puntos 4.1.1 y 4.1.5 de este capítulo. En la filtración a través de un soporte grueso la porosidad se obtiene con hilos de algodón, vidrio polipropileno, etc. bobinados de forma especial sobre un núcleo rígido, con una porosidad decreciente hacia la salida del filtrado. Las gamas del caudal van desde algunos l/hr hasta 500 m³/hr por filtro, para porosidades de 0.3 a 75 micras.

Con productos aglomerados porosos los elementos filtrantes son de: arenas porcelanas, plástico, etc. Los filtros con pequeño caudal dan lugar a una pérdida de presión de varias atmósferas y después de su atascamiento no se puede conseguir una limpieza com-

pleta, que en algunos casos un atascamiento puede ser irreversible.

Con estos productos aglomerados, se llega a pasos de 5 micras y se encuentran filtros que van desde algunos l/hr a 400 m³/hr para pasos de 40 micras.

La filtración a través de un soporte con precapa se utiliza para que no exista un atascamiento irreversible en el elemento filtrante, la filtración no se efectúa a través de elementos fijos sino a través de un material filtrante que se introduce en el aparato al principio de cada ciclo de funcionamiento, para formar sobre un soporte fijo una capa filtrante microporosa (precapa). Después del atascamiento se elimina esta precapa, vertiéndola al exterior durante la operación del lavado. La textura de la capa filtrante incluye una multitud de canales de muy pequeño diámetro, con lo que puede obtenerse generalmente un filtrado de baja turbiedad.

Los materiales utilizados en la precapa, según su aplicación son: Diatomeas, celulosa, carbón activo en polvo y resinas intercambiadoras de iones en polvo.

La filtración en si consiste en una serie de operaciones separadas que son formación, lavado (si se requiere), secado y descarga de la torta.

Para la selección de un filtro se puede mencionar que la filtración a presión, aunque con un rango mayor de adaptabilidad a diferentes suspensiones, presenta el inconveniente de que se realiza en forma intermitente. En los filtros de vacío la descarga se realiza en forma continua teniendo como limite suspensiones con menos de 20 gr/l que en un periodo de succión de 5 min, no formen una torta por lo menos 3 mm . En estos casos se utiliza un filtro de vacío de tipo precapa, así como en suspensiones con sólidos muy finos y dispersados. Existe un gran número de factores que pueden influir en la selección del equipo adecuado, para llevar a cabo la filtración. Los mas importantes son la concentración de sólidos en la suspensión, el tamaño de las partículas y el peso específico de estas así como el flujo que se esta manejando.

4.6.2. Filtros a presión .

Los filtros a presión se fabrican en el tipo vertical y horizontal, estos filtros están formados por una coraza metálica cilíndrica con tapas abombadas que contienen una capa de medio filtrante (arena o antrafilt) soportado por capas de grava o antrafilt, equipados con los accesorios necesarios para llevar a efecto las operaciones de: filtra-

ción, retrolavado y enjuague. Los filtros verticales varían de 30 cm a 3 m de diámetro y tienen capacidades de 2.5 a 235 gpm a una velocidad de filtración de 3 gpm/pie² de superficie filtrante. La altura de los filtros verticales es usualmente de 1.60 m en la parte cilíndrica, aunque ocasionalmente se usan de 1.20 m. Los filtros horizontales tienen 2.5 m de diámetro y su longitud varía de 3.5 a 8.5 m tienen capacidades de 201 a 516 gpm.

4.6.2.1.- Filtros verticales .

a) Filtros verticales lavables sólo con agua .

Van equipados con materiales filtrantes cuya granulometría y densidad debe elegirse de acuerdo con la velocidad de retorno de agua de lavado, que es necesario prever para su expansión. La capa filtrante descansa sobre un soporte de lechos sucesivos de materiales de granulometría creciente hacia abajo y la toma de agua filtrada se efectúa por un colector ramificado perforado, embebido en la capa de granulometría mayor.

En la mayoría de los casos la capa filtrante es única, arena o antracita (fig.4.6.1.) Puede utilizarse también, capas múltiples, por ejemplo, arena fina y sobre ella antracita de granulometría mayor. Según la granulometría del lecho filtrante la velocidad de filtración puede variar de 5 a 50 m/h .

La pérdida de carga máxima que se alcanza al final del ciclo, es función esencialmente de la finura de la capa filtrante de la velocidad de filtración que puede variar de 0.2 a 2 bares.

La velocidad de lavado esta relacionada igualmente con la granulometría y debe permitir una expansión de la altura del lecho filtrante de 15 al 25 %.

En la tabla siguiente se indican las velocidades correspondientes a un lecho filtrante de arena:

velocidad (m/h)	25 a 35	40 a 50	55 a 70	70 a 90
granulometría talla efectiva (mm)	0.35	0.55	0.75	0.95

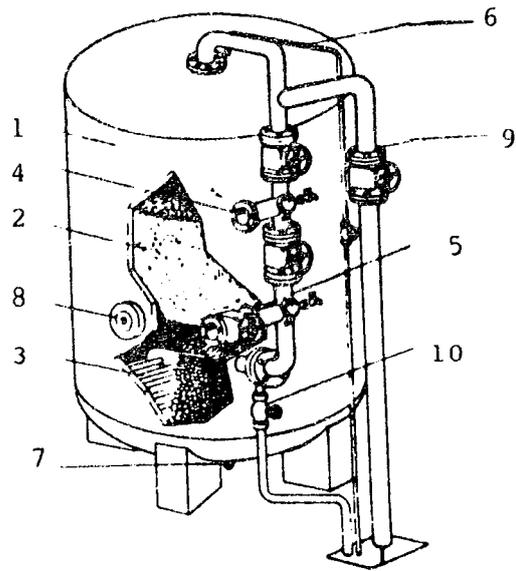


Fig. 4.6.1.- Filtro cerrado a presión, con lavado por retorno de agua.

- | | |
|------------------------------|--|
| 1.- Cuerpo del filtro. | 7.- Vaciado. |
| 2.- Masa filtrante. | 8.- Agujero de mano. |
| 3.- Colector. | 9.- Salida de agua de lavado. |
| 4.- Entrada de agua bruta. | 10.- Envío eventual de las primeras aguas filtradas. |
| 5.- Salida de agua filtrada. | |
| 6.- Purga de aire. | |

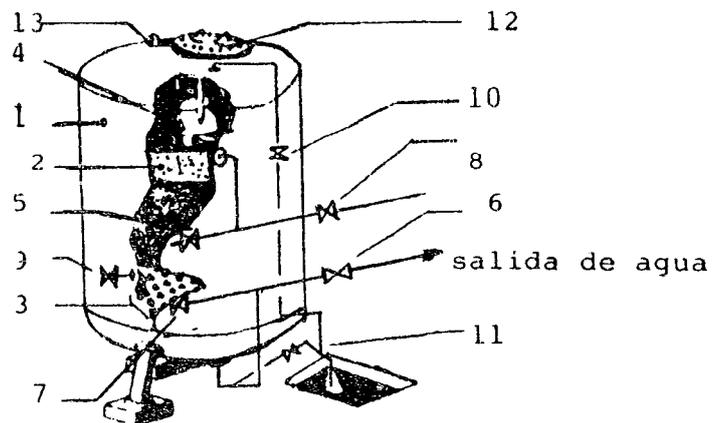


Fig.4.6.2.- Filtro vertical lavable por aire y agua.

- | | |
|--------------------------------|----------------------------------|
| 1.- Cuerpo del filtro. | 8.- Salida de agua de lavado. |
| 2.- Masa filtrante. | 9.- Entrada de aire de lavado. |
| 3.- Falso fondo de boquillas. | 10.- Purga de aire. |
| 4.- Arqueta de alimentación. | 11.- Vaciado y purga de aire. |
| 5.- Entrada de agua bruta. | 12.- Agujero de hombre. |
| 6.- Salida de agua filtrada. | 13.- Asa para elevación y carga. |
| 7.- Entrada de agua de lavado. | |

Puede controlarse fácilmente la velocidad del lavado (control esencial) disponiendo en la rasqueta de fangos un vertedero de medida. Al mismo tiempo puede observarse la evolución de la calidad de agua evacuada, y regular así la duración de lavado.

Esta duración varía entre 5 y 8 minutos, según las alturas de arena y las materias retenidas.

b) Filtros lavables por aire y agua.

b.1.- Filtros con capa única homogénea, lavados simultáneamente.

El lecho filtrante, en toda su altura descansa sobre un falso fondo metálico perforado al cual se fijan unos anillos en los que van roscadas las boquillas metálicas o de plástico, según la naturaleza y la temperatura del líquido a filtrar.(fig.4.6.2).

Generalmente estos filtros se cargan con arena, su lavado se efectúa por retorno simultáneo y de agua filtrada a caudal reducido.

Las características de este tipo de filtros son las siguientes:

- granulometría talla efectiva 0.7 a 135 mm.
- caudal de aire 50 m³/h por m² de filtro.
- caudal de agua durante durante la inyección 5 a 7 m³/h por m² de filtro.
de aire
- caudal de agua de aclarado 15 a 25 m³/h por m² de filtro.
- pérdida de carga al final de ciclo 100 a 400 mbar.

La altura de capa debe de adaptarse a la velocidad de filtración y a la carga de materias a retener.

Las velocidades de filtración varían entre 4 y 20 m/h . En el tratamiento industrial puede utilizarse este filtro con alturas de capa de 1 a 2 m y granulometrías de arena comprendidas entre 0.65 y 2 mm. Las velocidades son a veces muy superiores a las de filtración de aguas clarificadas: 20 a 40 m/h con altura de capa de arena de 1.8 a 2 mm, para aguas cargadas de óxidos metálicos y 30 a 60 m/h con capa de arena fina (0.65 mm) para aguas de mar profundas.

Estos filtros que pueden utilizarse en baterías de unidades de gran diámetro, ofrecen grandes ventajas: simplicidad de manejo, seguridad total de funcionamiento, caudal pequeño de agua de lavado y por tanto consumo reducido.

b.2.- Filtros U.H.R.

Son filtros ultra-rápidos de doble capa, cuyos diferentes pares de granulometría de antracita y de arena se eligen en función del tipo de filtración practicado.

Estos filtros U.H.R. están diseñados especialmente para funcionar a velocidades de 25 a 50 m/h y para retener materias muy granulosas y densas o cantidades importantes de materias en suspensión.

Para ello:

- recurren de pares óptimos de granulometría arena-antracita.
- llevan alturas de capa filtrante de dos metros y más.
- su tecnología y especialmente la que se refiere a la inyección de aire y a la recogida de fangos, se adapta a la evacuación de grandes cargas de materias retenidas.

Los filtros U.H.R. están constituidos por celdas cilíndricas verticales metálicas o de hormigón y pueden construirse abiertos o a presión admite ciclos de larga duración entre lavados. A pesar de su gran consumo instantáneo de agua de lavado, se utilizan especialmente en el tratamiento de aguas de laminadores, de aguas aceitosas de refinería y puede aplicarse satisfactoriamente con aguas residuales de tormenta. fig. 4.6.3.

b.3.- Bifiltro de corrientes inversas.

Con este tipo de filtro puede duplicarse la velocidad de filtración por m^2 de sección horizontal, utilizando un lecho filtrante recorrido al mismo tiempo de abajo arriba y de arriba abajo, recogiendo el agua filtrada en su parte central.

Consta principalmente de (fig. 4.6.4.):

- una alimentación de agua a filtrar que se separa en dos flujos uno de los cuales (2) se dirige hacia el fondo bombeado superior, y el otro (3) hacia el fondo bombeado inferior.
- un falso fondo de boquillas especiales, de cola larga y de amplios orificios de paso, sumergidos en una capa de grava soporte.
- una alta capa de arena filtrante, de granulometría homogénea en toda su altura
- un colector ramificado de recogida de agua filtrada (4) embebido en la parte central del lecho filtrante.
- una arqueta de recogida de agua de lavado, que la evacua al desagüe por medio de una tubería.

En realidad este filtro es la superposición de dos filtros semejantes, que trabajan con flujos inversos de igual velocidad de filtración y con la misma pérdida de carga.

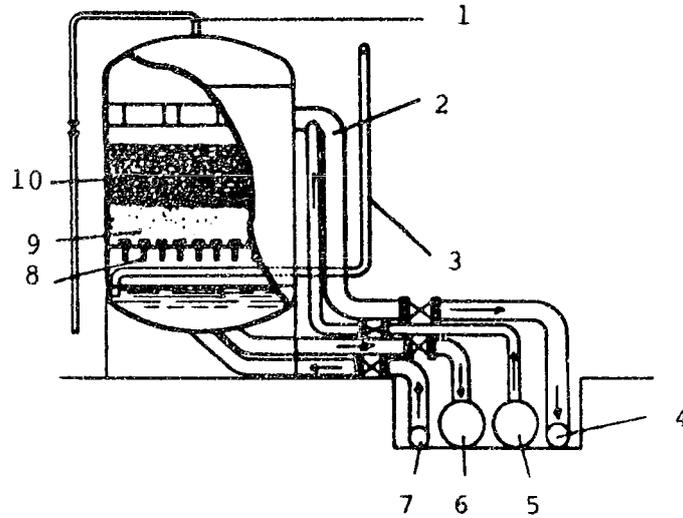
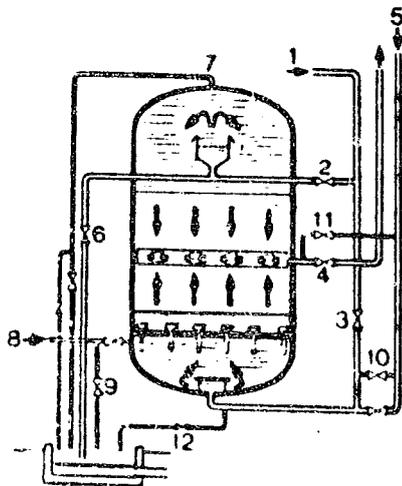


Fig. 4.6.3.- Filto MEDIAZUR tipo U.H.R.

- | | |
|----------------------------------|--------------------------------|
| 1.- Puesta a la atmosfera. | 6.- Salida de agua filtrada. |
| 2.- Salida de agua de lavado | 7.- Llegada de agua de lavado. |
| 3.- Llegada de aire. | 8.- Falso fondo con boquillas. |
| 4.- Evacuación de agua de lavado | 9.- Arena. |
| 5.- Llegada de agua bruta. | 10.- Antracita. |



- | |
|--|
| 1.- Llegada de agua bruta. |
| 2.- Entrada superior de agua bruta. |
| 3.- Entrada inferior de agua bruta. |
| 4.- Salida de agua filtrada. |
| 5.- Llegada de agua de lavado. |
| 6.- Salida de agua de lavado. |
| 7.- Purga de aire. |
| 8.- Entrada de aire comprimido. |
| 9.- By-pass de aire comprimido. |
| 10.- By-pass de agua lavada. |
| 11.- Aclarado del colector de agua filtrada. |
| 12.- Vaciado |

Fig. 4.6.4.- Bifiltro cerrado de corrientes inversas.

Estos dos flujos bloquean la arena en su posición inicial por lo que no se produce elevación alguna de la misma durante la filtración. Este sistema de funcionamiento sólo es posible como consecuencia de la homogeneidad del lecho filtrante en toda su altura. Si la arena fina se concentrara en la parte superior, el atascamiento sería muy rápido en la superficie y la casi totalidad del caudal pasaría de abajo arriba, con lo que resultaría utópica la ventaja inicial de este procedimiento y se produciría una rápida perforación del elemento filtrante inferior.

El lavado ha de ser muy eficaz, pero no debe de provocar la expansión de la arena. Se realiza por retorno de aire y agua inyectados simultáneamente a velocidades adaptadas a la talla de la arena y de la naturaleza de las partículas que han de retenerse.

En los casos mas desfavorables en los que las materias a retener son a la vez pesadas, aglutinantes y abundantes, este filtro puede lavarse mediante un sistema pulsado, que garantiza la conservación en perfecto estado de las de las capas filtrantes sin riesgo de acumulación de impurezas a lo largo de los ciclos de filtración. En este lavado pulsado se utilizan los equipos normalizados a los que se añade una válvula de mariposa para puesta a la atmósfera del circuito de aire comprimido, válvula que puede accionarse automáticamente, por medio de un temporizador.

- caudal de aire: $60 \text{ a } 80 \text{ m}^3/\text{h}$ por m^2 .

- caudal de retorno de agua durante la inyección de aire: $10 \text{ a } 15 \text{ m}^3/\text{h}$ por m^2 .

- caudal de agua de aclarado: $20 \text{ a } 30 \text{ m}^3/\text{h}$ por m^2 para filtros que retienen materias relativamente ligeras y $30 \text{ a } 50 \text{ m}^3/\text{h}$ por m^2 para filtros que retienen precipitados pesados.

Se aconseja especialmente este tipo de filtro en la filtración directa de agua de río o de aguas relativamente cargadas así como en todos los casos en que sea indispensable disponer de ciclos largos entre lavados.

4.6.2.2.- Filtros horizontales .

El filtro lavable con agua y aire, puede también construirse con cuba cilíndrica de eje horizontal. Esto supone una economía también de construcción cuando se trata de obtener grandes superficies filtrantes ya que basta para ello aumentar la longitud de la cuba, sin modificar su diámetro. Los principios de funcionamiento de estos filtros son idénticos a los filtros verticales .

Estos filtros se emplean en la filtración de aguas brutas poco o medianamente cargadas, ya que la altura de capa es por construcción, limitada. Se adaptan igualmente a la

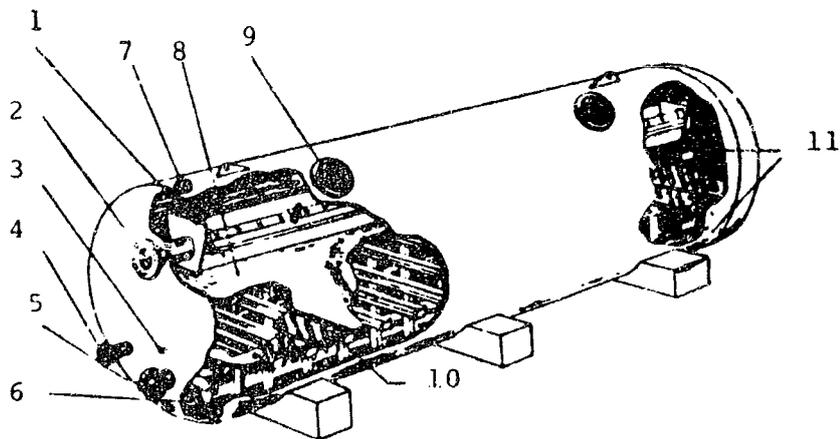


Fig. 4.6.5.- Filtro horizontal , con falso fondo, lavable por retorno de agua e inyección de aire.

- | | |
|--|---|
| <ul style="list-style-type: none"> 1.- Canal de reparto de agua bruta. Recogida de agua de lavado. 2.- Llegada de agua bruta. Salida de agua de lavado. 3.- Válvula de control del colchón de aire y de toma de muestra de agua filtrada. 4.- Llegada de aire de lavado. | <ul style="list-style-type: none"> 5.- Salida de agua filtrada. Llegada de agua de lavado. 6.- Vaciado del filtro. 7.- Purga de aire. 8.- Masa filtrante. 9.- Agujero de hombre. 10.- Falso fondo equipado con boquillas. |
|--|---|

filtración de agua decantada, funcionando a presión o por gravedad, fig. 4.6.5.

4.6.3.- Filtros abiertos .

La mayor parte de las instalaciones de filtración destinadas al abastecimiento de agua potable así como numerosas instalaciones de clarificación de aguas industriales o residuales de gran caudal, utilizan filtros abiertos generalmente de hormigón.

Según los casos de agua a filtrar no recibe previamente ningún reactivo, se somete simplemente a una coagulación sin fase de decantación o bien a un proceso de coagulación, floculación y decantación. El sistema de tratamiento influye en la concepción tecnológica de los filtros y especialmente en el diseño de la batería filtrante.

4.6.3.1.- Filtros rápidos .

Se caracterizan por:

- un lecho filtrante de granulometría homogénea y que permanece homogénea después del un lavado por retorno simultáneo de aire a fuerte caudal y de agua a caudal reducido, seguido de un aclarado a caudal medio, que no provoca expansión del lecho filtrante.
- una pequeña altura de agua por encima de la arena de 0.5m .
- una caída geométrica reducida en general 2 m que debido a un atascamiento excesivo evita que se produzca una importante desgasificación del agua.

Según la naturaleza del agua y su aptitud para desgasificarse, la velocidad máxima de filtración puede ser de 7 a 10 m/h.

Existen filtros tipos T y N de capa única homogénea que se diferencian simplemente por la naturaleza del falso fondo que soporta el material filtrante.

Los filtros T van equipados con boquillas colectoras de cola larga atornilladas en un falso fondo desmontable constituido por lozas de hormigón o placas de poliéster armado.

En los filtros T de pequeña superficie, el aire se reparte bajo el falso fondo por un colector de inyección ramificado, (fig.4.6.6.).

En los filtros de mayores dimensiones, se distribuye el aire por un canal de hormigón, dispuesto bajo de uno de los canales de evacuación de agua de lavado (fig.4.6.7.).

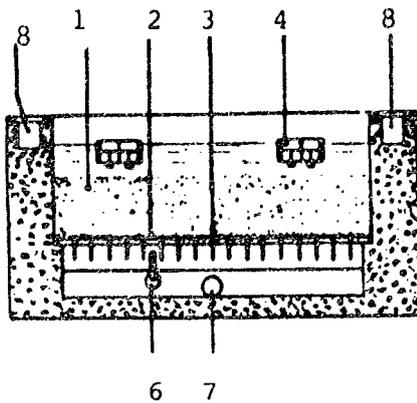


Fig. 4.6.6.- Filtro AQUAZUR tipo T con falso fondo de hor-
gón y colector de inyección de aire.

- 1.- Arena.
- 2.- Falso fondo.
- 3.- Boquillas.
- 4.- Batiante de entrada de agua.
- 5.- Canal de distribución aire-agua de lavado. Salida de agua filtrada.
- 6.- Colector de inyección de aire.
- 7.- Entrada de agua de lavado. Salida de agua filtrada.
- 8.- Canales de evacuación de fangos.

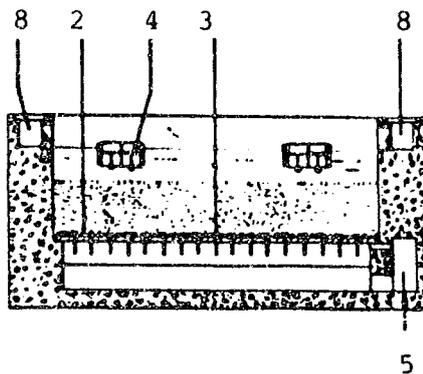


Fig. 4.6.7.- Filtro AQUAZUR tipo T con falso fondo de hor-
migón y canal de aire-agua.

En ambos casos este aire se distribuye de igual forma en toda la superficie del filtro gracias a la constitución de un colchón de aire por las boquillas de cola larga (densidad de reparto, por lo meno igual a 50 m^2 de falso fondo).

Los filtros N van provistos de pequeñas boquillas colectoras de cola corta atornilladas en un falso fondo constituido por placas de fibrocemento siendo la densidad de las boquillas de unos 80 por m^2 de falso fondo la distribución del aire de lavado se realiza por un colector ramificado perforado, situado bajo un falso fondo .

Estos filtros T y N comprenden solamente tres válvulas que corresponden al agua filtrada, agua de lavado y aire de lavado.

La llegada de agua bruta se regula por una batiente que cierra automáticamente durante el lavado, cuando el nivel de agua en el filtro sobrepasa el nivel del agua en el canal de llegada.

La evacuación de fangos se efectúa por rebose en los canales longitudinales. La regulación del nivel de estos filtros se hace por un sifón parcializado, por una válvula de mariposa o por una válvula de asiento.

La pequeña altura de agua sobre la arena (0.5 m) supone una gran ventaja, desde el punto de vista de explotación, ya que el aclarado se realiza muy rápidamente, puesto que las impurezas que deben evacuarse no se encuentran diluidas en una gran masa de agua.

Se tiene por tanto a la vez, una economía de tiempo y de agua de lavado. La explotación de este tipo de filtro es extraordinariamente sencilla y puede realizarse con una mano de obra no especializada.

Pueden realizarse estos filtros simples (con un regulador por elemento filtrante), o como filtros dobles (dos elementos filtrantes comunicados por arriba y por abajo y con un solo regulador).

4.6.3.2.- Filtros a gran velocidad 7 a 20 m/h .

Cuanto mayor sea la velocidad de filtración, mas elaborada habrá de ser la tecnología especialmente en los aspectos:

- de la elección del o los materiales filtrantes .
- de su latura .
- del metodo de lavado.
- de la hidraulica general.

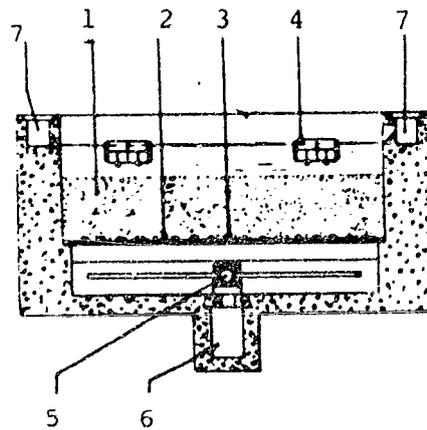


Fig. 4.6.8.- Filtro AQUAZUR tipo N, con falso fondo de fibrocemento.

- 1.- Arena.
- 2.- Falso fondo de fibrocemento.
- 3.- Boquillas.
- 4.- Batiante de entrada de agua.
- 5.- Colector de aire comprimido.
- 6.- Entrada de agua de lavado.
- 7.- Canales de evacuación de fangos.

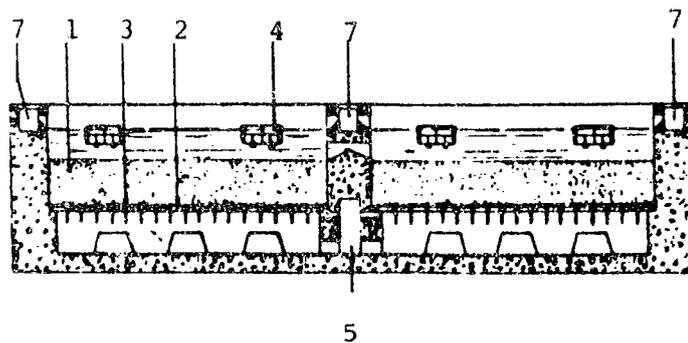


Fig. 4.6.9.- Filtro doble AQUAZUR, tipo "T" con falso fondo de hormigón y canal de aire y agua.

- 1.- Arena.
- 2.- Falso fondo.
- 3.- Boquillas.
- 4.- Batiante de entrada de agua.
- 5.- Canal de distribución de aire y agua de lavado y de salida de agua filtrada.
- 7.- Canales de evacuación de fangos.

Con una capa de material homogéneo (generalmente arena) colocada en un filtro denominado Aquazur V, se puede obtener un filtro a gran velocidad. este filtro puede tener un lavado simultáneo con aire y agua, acompañado de un barrido de superficie, seguido de un aclarado con agua al mismo caudal, sin expansión del lecho filtrante, siempre con barrido de superficie, permite mantenerlo íntegramente en el tiempo, en su estado de origen.

El filtro Aquazur V va provisto de los mismos tipos de fondo falso y de los mismos órganos de regulación (sifón o válvula de mariposa) que el filtro Aquazur T, diferenciándose del mismo por:

- su gran altura de agua por encima del lecho filtrante, normalmente igual a 1.20 m y como mínimo a 1 m.
- su gran altura de material homogéneo (arena o biolite en tratamiento de aguas residuales)
- sus sistemas de alimentación y de lavado, en el que interviene un barrido de superficie para el que se utiliza el agua a filtrar.

Sus características principales en filtración a través de arena son las siguientes:

- talla efectiva del material filtrante, generalmente 0.95 mm a 1.35 mm gamma extrema de 0.7 mm a 2 mm.
- velocidad de filtración 7 a 20 m/h.
- caudal de retorno de agua filtrada de lavado 13 a 15 m³/h por m².
- caudal de aire de lavado 40 a 60 m³/h por m².

Los filtros de doble célula se componen de dos células idénticas a las definidas anteriormente.

Los filtros de falso fondo constituido por placas armadas de poliéster tienen las mismas dimensiones que los filtros de falso fondo de homigón.

La alimentación puede efectuarse de diferentes formas, según el tipo de regulación deseada (regulación de caudal o regulación de nivel).

La figura 4.6.10 y 4.6.11, representa un filtro V de doble célula que funciona con regulación que funciona con regulación de aguas arriba . El caudal de agua a filtrar se reparte entre los distintos filtros por la combinación de un diáfragma (2) y de un vertedero (3), a partir del canal general (1) de agua a filtrar el agua penetra en el filtro por los dos orificios laterales (4) y atraviesa el lecho filtrante (5), cuyo espesor es función de la velocidad de filtración. El agua filtrada se recoge seguidamente en el canal (6) y regulada por el órgano (7), se vierte al canal general de agua filtrada (8). El aparato (9) indica y eventualmente, transmite la pérdida de carga del filtro.

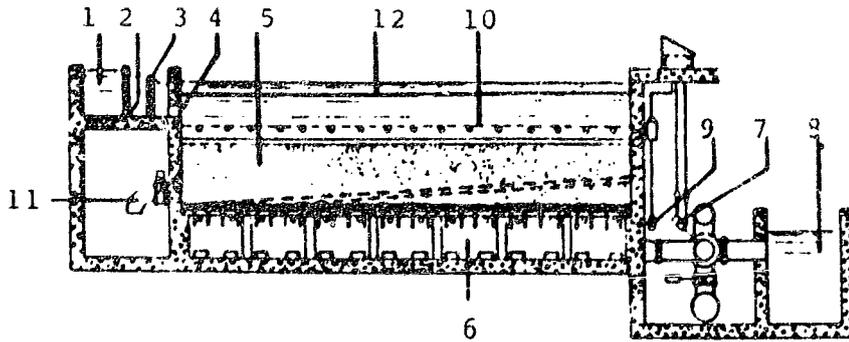


Fig. 4.6.10.- Filtro AQUAZUR.

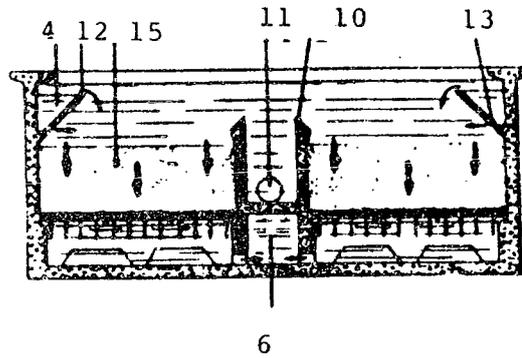


Fig. 4.6.11.- Filtro AQUAZUR, fase filtración.

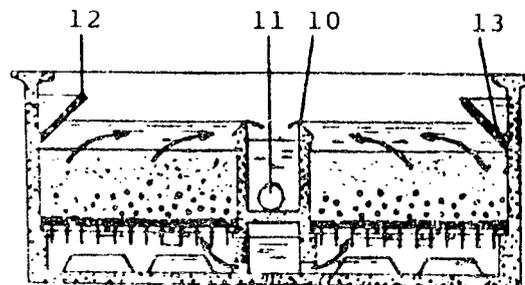


Fig. 4.6.12.- Filtro AQUAZUR, fase lavado aire-agua con barrido de superficie.

Cuando se alcanza el atascamiento máximo compatible con una buena calidad de agua filtrada, se procede al lavado fig. 4.6.12.

La primera fase consiste en hacer descender el plano de agua hasta el nivel de los bordes superiores del canal de lavado (10). Este descenso se hace generalmente, parando la filtración y abriendo la válvula de evacuación de agua de lavado (11), puede hacerse igualmente deteniendo la alimentación, añadiendo obturadores de diafragma en la llegada de agua a filtrar y continuando la filtración.

La segunda fase de lavado consiste en combinar el lavado clásico de un filtro Aquazur, con un barrido de superficie utilizando el agua aún no filtrada. Esta continúa entrada por los orificios (4), circula por los canales en V (12) y penetra en la parte superior del filtro por los orificios (13). Al mismo tiempo se efectúa la inyección de aire con un caudal de retorno de agua filtrada de 13 a 15 m³/h m² lo que se consigue por la forma especial de los vertederos de evacuación de agua de lavado Esta fase dura de 4 a 5 min.

La fase final de lavado consiste en aclarar con un caudal de agua filtrada, a contracorriente igual al anterior manteniendo el barrido de superficie. Esta fase dura de 3 a 4 min.

4.6.3.3.- Filtros sin válvula auto lavables, con sifón automático .

El agua a filtrar penetra en el filtro procedente de un depósito de carga. Después de filtrada a través de un lecho de granulometría pequeña el agua asciende desde el fondo del filtro hacia la reserva de agua filtrada dispuesta a la parte superior. Cuando la reserva está llena, el agua se dirige hacia su utilización.

Al atascarse el lecho filtrante, sube el nivel en la cámara de carga así como la rama alta en la rama alta del sifón, cuyo extremo bajo se encuentra sumergido. Cuando se alcanza la pérdida de carga máxima, que se fija por construcción el aire comprimido, contenido en el sifón escapa bruscamente: el sifón se ceba y produce el paso a través del filtro, a contracorriente del volumen de agua contenido en la reserva de agua filtrada cuya capacidad deberá preverse de forma que se asegure un lavado conveniente del lecho filtrante.

Con este filtro, se tiene la seguridad de que nunca se alcanza un atascamiento anormal del lecho filtrante ya que el lavado se efectúa automáticamente para un valor de la pérdida de carga fijo y regulado previamente, sin intervención de ningún órgano mecánico y sin el empleo de un fluido auxiliar.

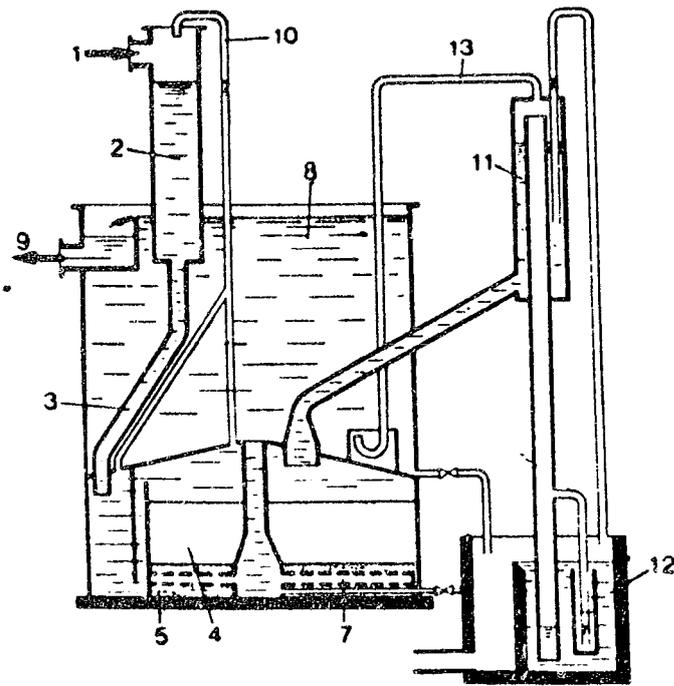


Fig.4.6.13.- Filtro autolavable, sin válvula.

- | | |
|--------------------------------|---|
| 1.- Llegada de agua bruta. | 8.- Reserva de agua filtrada. |
| 2.- Depósito de carga. | 9.- Salida de agua filtrada. |
| 3.- Colector de agua bruta. | 10.- Puesta a la atmósfera. |
| 4.- Capa filtrante. | 11.- Sifón de lavado. |
| 5.- Capa soporte. | 12.- Deposita de restitución de agua de lavado. |
| 7.- Colector de agua filtrada. | 13.- Tubería de desacebado. |

Se suele utilizar este filtro cuando no se dispone de aire comprimido ni de electricidad. Es conveniente su empleo en el caso de aguas poco o medianamente cargadas de materias en suspensión, cuando la red de distribución admite una parada durante el período de renovación del volumen necesario para el lavado. Su velocidad de filtración máxima es generalmente de 10 m/h .

4.6.4.- Filtros de carbón activo .

La filtración con carbón activo en granos de 0.4 a varios mm se utiliza frecuentemente en el tratamiento de aguas industriales .

La acción del carbón puede ser triple:

- **física**, para eliminar las materias en suspensión. Esta acción puede no obstante entorpecer las dos siguientes, debiendo entonces aplicarse con bajas tasas de materias en suspensión.
- **adsorbente** con relación a las materias disueltas, orgánicas. Esta última acción es la más buscada, pero la cinética de adsorción es muy variable según los compuestos y debe estudiarse según curvas características isotermicas de adsorción de cada uno de estos compuestos. Los compuestos en cuestión pueden ser fenoles y detergentes. La carga volúmica será en general baja de 1 a 5 volúmenes de agua por volumen de carbón y hora.
- **catálisis** para la reducción de cloro en exceso, con liberación de HCl y de oxígeno. La cinética de esta reacción es rápida y puede referirse a cargas volúmicas mucho más elevadas que en el caso anterior.

Según la preponderancia o la naturaleza de las tres acciones anteriores el carbón puede utilizarse en capas de 1 a 3 metros de altura y regenerarse por simple contracorriente de agua o por percolación de una solución sodada o incluso por chapoteo de vapor. Diferentes construcciones de filtros son necesarias según los casos, y generalmente conviene concebir el falso fondo filtrante con vistas al envío de vapor expansionado.

4.6.5.- Filtros con precapa .

Esta técnica muy utilizada en las industrias agroalimenticias, para la purificación de zumos o vinos, o en la industria mecánica para el tratamiento de aceites de corte

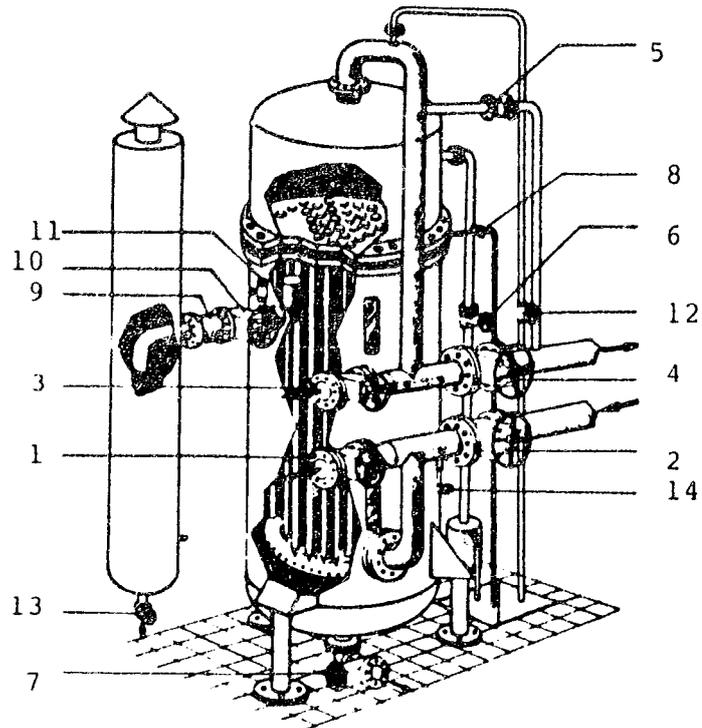


Fig. 4.6.14.- Filtro con precapa.

- 1.- Introducción del producto de empastado.
- 2.- Llegada de agua condensada.
- 3.- Salida de agua de empastado.
- 4.- Salida de agua condensada filtrada.
- 5.- Agua de enjuage.
- 6.- Purga de la cúpula.
- 7.- Vaciado.
- 8.- Purga de aire.
- 9.- Válvula de apertura rápida.
- 10.- Válvula de asentamiento. de seguridad.
- 11.- Introducción de aire de hinchado.
- 12.- Purga de aire.
- 13.- Vaciado.
- 14.- Introducción de aire de mezcla.

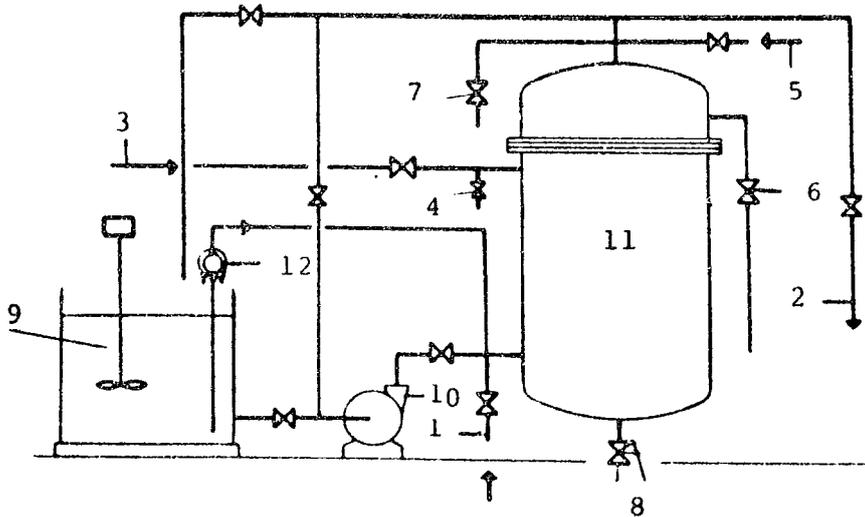


Fig. 4.6.15.- Esquema de instalación de un filtro de precapa, con lavado "canon" empastado con un material inerte.

- | | |
|----------------------------|--|
| 1.- Agua filtrar. | 8.- Vaciado del filtro. |
| 2.- Agua filtrada. | 9.- Preparación de la suspensión del material filtrante. |
| 3.- Aire comprimido. | 10.- Bomba de empastado. |
| 4.- Válvula de expansión. | 11.- Filtro. |
| 5.- Agua de lavado. | 12.- Bomba de dosificación para alimentación. |
| 6.- Vaciado de la campana. | |
| 7.- Purga de aire. | |

puede emplearse de hecho en el tratamiento de aguas y de suspensiones diversas, de modo complementario o concurrente de la filtración con arena:

- **complementariamente**, se trata de una filtración de acabado, que elimina los restos de materia en suspensión o de turbiedad y se deberá estar muy atento a la longevidad de los ciclos entre lavados.

- **concurrentemente**, se trata de filtrar suspensiones cargadas que no tolerarían añadidas de coagulantes minerales solubles o cuya torta puede a veces presentar cierto valor mercantil si se recupera. Se estará entonces muy atentos a la pureza del filtrado y el ciclo entre lavados puede verse acortado.

En ambos casos, el consumo de coadyuvantes de filtración (precapa o alimentación) debe ser mínima y la elección de estos reactivos deberá optimizarse.

4.6.5.1. Principio general,

Los filtros de precapa se caracterizan por el empleo combinado de cierto número de elementos soportes, discos, placas, bujías, que incluyen mallas o perforaciones, o están constituidos por un material poroso, en estas anfractuosidades se aplica una capa de material filtrante pulverulento, de naturaleza y de granulometría apropiadas. Esta materia puede ser filtrante (celulosa), filtrante y adsorbente (diatomeas, carbón activo) o incluso químicamente activa (intercambiadores iónicos). En todas las películas que utilizan soportes con mallas de escaso espesor (tejados metálicos o plásticos, bujías compuestas con hilos metálicos en espiral), la granulometría de la capa es netamente inferior al tamaño de las mallas o a la separación entre hilos en espiral, de tal modo que la capa filtrante forma en los elementos soportes una especie de bóveda y las impurezas que hayan podido atravesar ésta no serán retenidos por los elementos soportes.

Es muy importante subrayar esta particularidad, ya que cierto número de constructores emplean todavía soportes porosos, que siendo filtrantes a su vez están sujetos a atascamientos irreversibles, lo que no debe existir en un filtro con precapa bien diseñado.

En régimen normal, el líquido a tratar se aplica pues en la superficie externa de la precapa, que se mantiene en un sitio por la diferencia de presión entre las dos caras del elemento filtrante.

Los espesores usuales de precapa se elevan a unos pocos milímetros, las impurezas son retenidas en una pequeña fracción de este espesor. Si estas impurezas son atascantes

(coloides floculados, película de aceite), es conveniente alimentar la capa en continuo con una aportación de material de precapa (alimentación), que prolonga la duración de utilización entre dos lavados, evitando la formación de una película continua de impurezas muy poco permeable al agua.

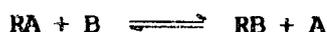
4.7.- INTERCAMBIO IONICO .

Los intercambiadores de iones son sustancias granulares insolubles que tienen en su estructura molecular, radicales ácidos o básicos con iones fijados previamente que se pueden permutar por otros iones positivos o negativos que se encuentran en solución en el líquido con el que se pone en contacto, sin modificación aparente de su aspecto físico y sin alteración alguna o solubilización.

La estructura química de los intercambiadores es generalmente macromolecular que incluya en su molécula uno o varios radicales de función ácida o básica. La presencia de estos radicales puede equiparce un intercambiador de cationes con un ácido de forma H-R y un intercambiador de aniones con una base de forma R-OH. La fuerza de este ácido o de esta base, es función de la naturaleza del núcleo molecular y de los radicales unidos a él, como por ejemplo: HCO_2 , HSO_3 , NH_3OH , etc.

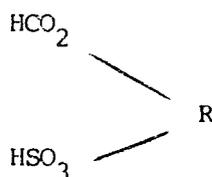
Los primeros intercambiadores de iones utilizados fueron tierras naturales, después se obtuvieron compuestos sintéticos, minerales (sílices, alginatos) y orgánicos, siendo estos últimos los que en la actualidad se emplean casi exclusivamente, bajo el nombre de resinas. Este término se ha generalizado para designar el conjunto de intercambiadores.

Las reacciones básicas del intercambio de iones es como la que a continuación se menciona:



Como todo equilibrio químico, esta regulado por la ley de acción de masas la reacción inversa corresponden a la regeneración del intercambiador.

Se dice que un intercambiador es monofuncional si en su molécula solo existe un tipo de radicales, por ejemplo HCO_2 o HSO_3 , y polifuncional si la molécula posee, simultáneamente, radicales de naturaleza y en consecuencia de fuerza iónica diferente por ejemplo:



El producto debe de ser insoluble en las condiciones normales de empleo.

En la práctica todos los intercambiadores actualmente utilizados responden a esta condición y su solubilidad real a la temperatura ambiente no teniendo en cuenta el período inicial, es indetectable por los métodos normales de análisis en las condiciones de caudal y de temperaturas habituales. Esto no se cumple en el caso de algunos intercambiadores de iones si la temperatura sobrepasa un cierto valor.

El producto debe presentarse en granos de la mayor homogeneidad posible de tales dimensiones que su pérdida de carga en filtración sea aceptable.

La variación de los iones retenidos en el intercambiador no debe producir la degradación de su estructura física.

En el proceso de cambio, el intercambiador puede fijar iones complejos ionizados de dimensiones y pesos muy variables .

En algunos casos, esto da lugar a un aumento de volumen o una contracción no despreciables (hasta el 100 % con algunas resinas carboxílicas (HCO_2R) entre la fase H y la fase NH_4). Esta hinchazón y esta contracción, no deben ser causa de una rotura de los granos, por otra parte, el diseño de los aparatos debe tener en cuenta en los casos extremos la necesidad de permitir esta expansión sin que se produzcan compresiones demasiado fuertes en el seno del lecho intercambiador.

Conviene tener siempre presente que el empleo de intercambiadores de iones está sujeto a cierto número de condiciones que se desconocen con mucha frecuencia:

- Los intercambiadores de iones sólo pueden trabajar en presencia de una fase líquida de concentración limitada y no se resuelve con ellos todo tipo de problemas.
- Los intercambiadores de iones están destinados a fijar iones y no a filtrar materias en suspensión, coloides o emulsiones grasas. La presencia de estas sustancias acorta la duración de la vida de los productos.
- La presencia de gases disueltos en el agua en gran cantidad puede dar lugar a fuertes perturbaciones en la actividad de los cambiadores.
- Los oxidantes enérgicos (Cl_2 y O_3) afectan a ciertas resinas.
- Por último y de una manera general, la aplicación a escala industrial de los resultados de laboratorio o de la información facilitada por los fabricantes de intercambiadores de iones exige mucha prudencia.

4.7.1.- Principales tipos de intercambiadores de iones .

Existen dos grandes grupos de intercambiadores de iones :

1.- intercambiadores de cationes, caracterizados por la presencia en su molécula, de ra-

dicales de función ácida, sulfónica o carboxílica, tipo HSO_3 o HCO_2 , capaces de fijar cationes minerales u orgánicos y de intercambiarlos entre si o por el ion hidrógeno H^+ .

2.-**Intercambiadores de aniones**, cuyas moléculas contienen radicales de función básica, por ejemplo funciones amina terciaria o amonio cuaternario, capaces de fijar aniones minerales u orgánicos y de intercambiarlos entre si o por el ión hidroxilo OH^- .

4.7.1.1.- **Intercambiadores de cationes .**

a).-**Intercambiadores de cationes sintéticos**: Estos productos pueden clasificarse en dos grupos como **intercambiadores fuertemente ácidos**, caracterizados por la presencia de radicales sulfónicos HSO_3 , que tiene una acidez muy próxima al del ácido sulfúrico e **intercambiadores débilmente ácidos**, caracterizados por la presencia de radicales carboxílicos HCO_2 , que pueden equiparse a los ácidos orgánicos del tipo de ácido fórmico o acético.

b).- **Poliestirenos sulfonados**: estos productos constituyen la mayor parte de los intercambiadores de cationes que se utilizan actualmente.

Todos se obtienen según el mismo esquema de preparación:

- Copolimerización del estireno y del divinilbenceno efectuada en forma de emulsión, con el fin de obtener al solidificarse, unas esferas perfectas.
- Sulfonación de las esferas btenidas.

Los productos que resultan de esta preparación son prácticamente monofuncionales, sus propiedades físicas y químicas varían según el porcentaje de divinilbenceno con relación al estireno, denominado grado de reticulación o de cruzamiento, y que oscila generalmente entre el 6 y el 16 %.

c).- **Intercambiadores carboxílicos**: estos productos, de fórmula general $\text{HCO}_2\text{-R}$, son del tipo débilmente ácido. En el tratamiento de aguas puede liberar el ácido carbónico por fijación de los cationes Ca, Mg, Na, etc, correspondiente a los bicarbonatos, pero no puede intercambiar los cationes en equilibrio con aniones sulfato, cloruro o nitrato.

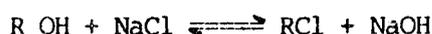
4.7.1.2.- **Intercambiadores de aniones .**

Se dividen en dos grupos claramente diferenciados:

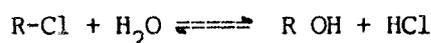
- Cambiadores de aniones débil o medianamente básicos
- Cambiadores de aniones fuertemente básicos.

La diferencia entre los dos grupos se establece prácticamente sobre las bases siguientes:

- Los intercambiadores débilmente básicos no fijan los ácidos muy débiles, como son el ácido carbónico o la sílice, mientras que los fuertemente básicos los fijan totalmente.
- Los intercambiadores fuertemente básicos son los únicos capaces de liberar las bases de sus sales, según la reacción tipo:



- **Los intercambiadores débilmente básicos** son mas o menos sensibles a la hidrólisis, caracterizada en el desplazamiento por el agua pura de los aniones previamente fijados sobre la resina:



mientras que los fuertemente básicos son prácticamente insensibles a este fenómeno.

a).- Intercambiadores débil o medianamente básicos: Todos estos productos poseen una mezcla de aminas primarias, secundarias, terciarias y a veces cuaternarias. El núcleo de la molécula es de naturaleza muy diversa, pudiendo ser alifático, aromático, o heterocíclico.

b).- Intercambiadores fuertemente básicos: la característica de estos productos es la existencia en la molécula de grupos de amonio cuaternario.

Todas las resinas fuertemente básicas utilizadas en desmineralización, pueden incluirse en dos esquemas generales denominados comúnmente tipo I y tipo II.

El primero incluye en su molécula radicales amonio cuaternario simples y el segundo radicales amonio cuaternario alcoholados.

Cada uno de estos tipos tiene su propio campo de aplicación condicionado por la naturaleza del agua a tratar y por las modalidades de regeneración.

Los dos tipos se diferencian por las siguientes propiedades:

- en el tipo I, la basicidad es fuerte y la capacidad débil; el rendimiento de regeneración es mediano.
- en el tipo II, la basicidad es mas débil y la capacidad más elevada; el rendimiento de regeneración es mejor.

Existe actualmente toda una serie de resinas de gran porosidad, denominadas, según

los fabricantes: macroporosas y macrorreticulares, isoporosas, homoporosas, difíciles de definir en función del método de fabricación. La experiencia ha demostrado que sus estructuras presentan ventajas de dos naturalezas:

- Mejor resultado de tratamiento y mayor resistencia al envenenamiento en presencia de aguas cargadas de coloides orgánicos. El porcentaje de materias orgánicas que retienen es mayor que en el caso de las resinas clásicas, pero también es superior al porcentaje de elución en la regeneración.
- Mejor resistencia mecánica, tanto a los esfuerzos físicos (presión, depresión), como a los químicos (cambios de estado de saturación iónica).

4.7.2.- Empleo de intercambiadores de iones .

Conviene señalar que el conjunto de procedimientos descritos en este capítulo corresponde a un intercambio iónico y que sólo deben aplicarse después de un tratamiento previo adaptado a cada calidad de agua bruta y que consista, en la eliminación de las materias en suspensión, materias orgánicas, cloro residual, cloraminas, etc. la naturaleza de este pretratamiento varía según los tipos de intercambiadores de iones utilizados.

4.7.2.1.- Lecho fijo regenerado en equi-corriente.

Se define el ciclo por la capacidad de cambio de la capa de resina, correspondiente a una masa de iones intercambiables y en consecuencia a un cierto volumen de agua tratada entre dos regeneraciones. El ciclo consta de 4 fases:

- **Fijación:** Paso del volumen de agua definido anteriormente, a través de la capa de resina, de arriba abajo.
- **Esponjamiento:** A contracorriente de la capa de resina.
- **Regeneración:** Paso de arriba abajo del reactivo regenerante convenientemente diluido.
- **Aclarado:** Eliminación del regenerante que impregna la resina, mediante un lavado con agua de arriba abajo.

-**Características generales de una unidad de intercambio de iones:** Cualquiera que sea la naturaleza del intercambio ya sea desendurecimiento, descarbonatación o desmineralización cada aparato está constituido normalmente por un recipiente cilíndrico cerrado de eje vertical, que contiene la resina. Esta puede disponerse en contacto directo con el sistema colector del líquido tratado, constituido por boquillas repartidas uniformemente sobre un fondo plano, o bien por una red de tubos en número y de sección conve-

nientes, o puede ir sobre una capa soporte de material granular inerte como: sílex, antracita o granos de plástico con una red colectora de drenaje.

Se prevé por encima de la capa de resina un espacio libre suficiente para permitir su expansión normal (entre el 30 y el 100 % de su volumen asentado según la naturaleza de la resina) en el momento de los esponjamientos a contracorriente.

El agua a tratar y el regenerante se introduce por la parte superior del recipiente, mediante un sistema repartidor, más o menos complicado.

El aparato va provisto de un conjunto extremo de válvulas y tuberías necesarias para realizar las diversas operaciones de fijación, esponjamiento regeneración y aclarado. Las válvulas pueden accionarse manualmente o de forma automática, o también remplazarse por una válvula central de pasos múltiples.

Las tres aplicaciones principales del tratamiento de agua por intercambio de iones son:

- Desendurecimiento.
- Descarbonatación.
- Desmineralización total (denominada a veces, bipermutación).

4.7.2.1.1.- Desendurecimiento .

Se utiliza un intercambiador de cationes que se regenera con una solución de cloruro sódico .

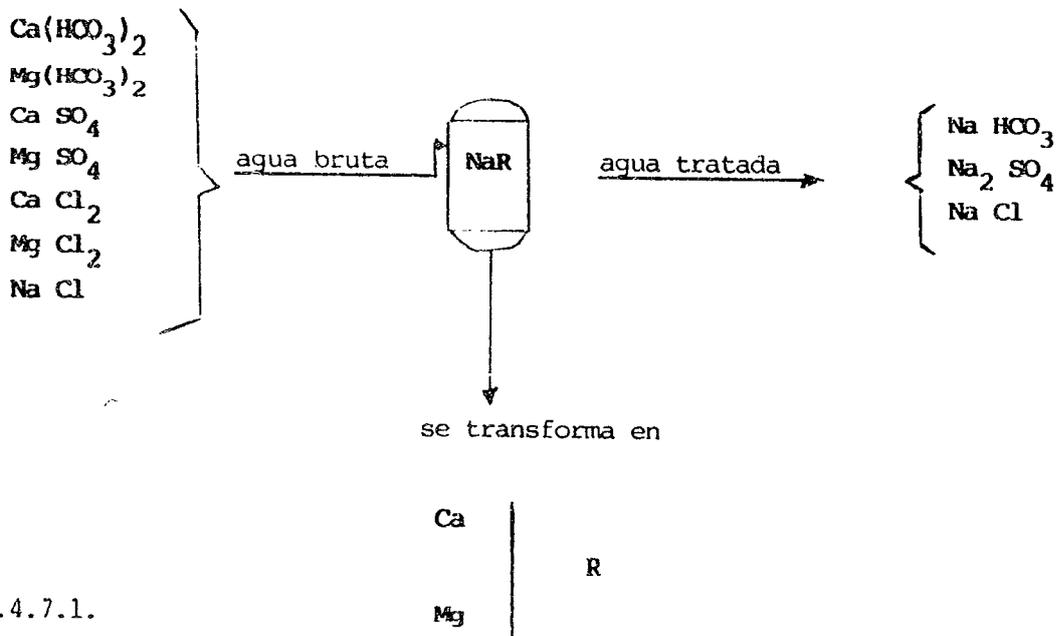


Fig.4.7.1.

Todas las sales del agua tratada se transforman en sales de sodio.

El grado hidrométrico del agua tratada es prácticamente nulo. Su pH y su alcalinidad permanecen invariables.

El desendurecimiento puede efectuarse después de una depuración previa con cal, en la que se eliminan los bicarbonatos y se reduce la alcalinidad al anaranjado de metilo.

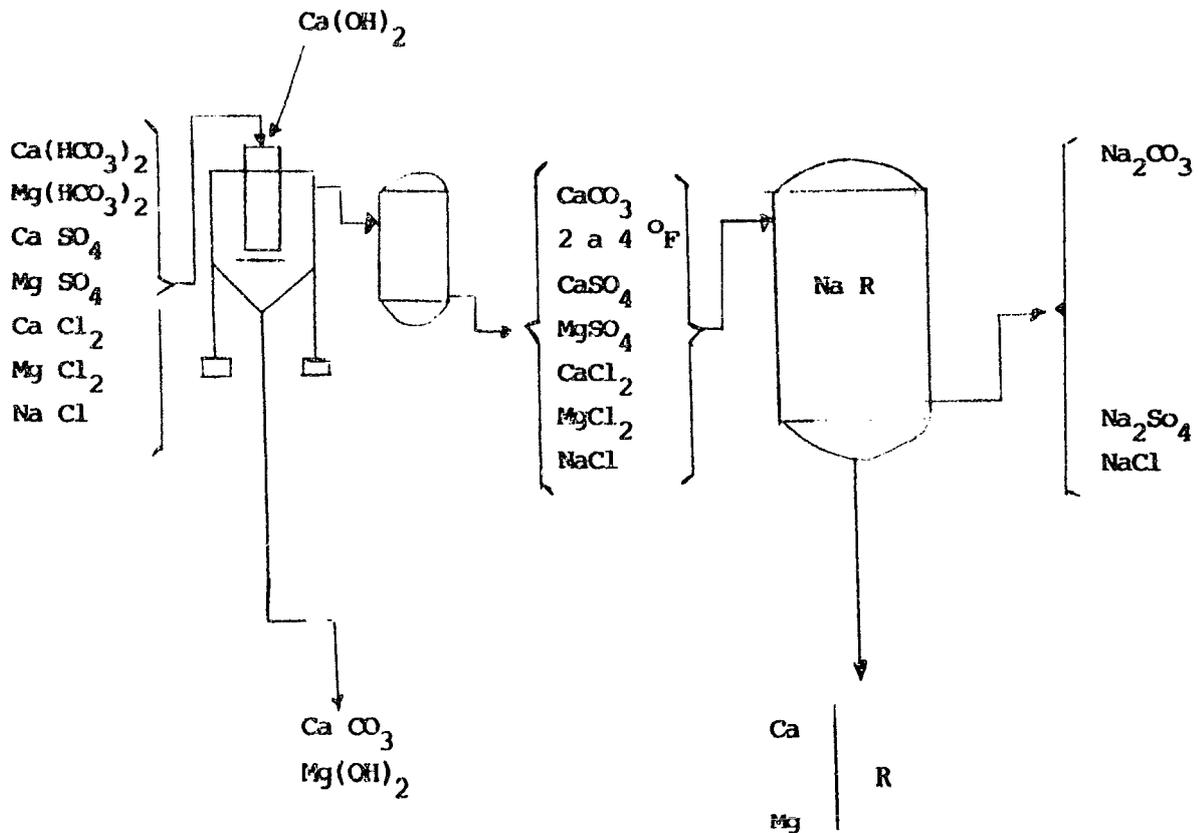


fig.4.7.2.

4.7.2.1.2.- Descarbonatación por resinas.

Se emplea una resina carboxílica previamente regenerada con ácido, para ponerla en forma HR. Esta resina tiene la propiedad de fijar los cationes metálicos y liberar los aniones correspondientes en forma de ácido libre, hasta que el pH del agua tratada alcance un valor comprendido entre 4 y 5, lo cual corresponde a la liberación total del ácido carbónico de los bicarbonatos, no siendo fijados por la resina los cationes ligados a los aniones de ácidos fuertes (cloruros, nitratos, sulfatos).

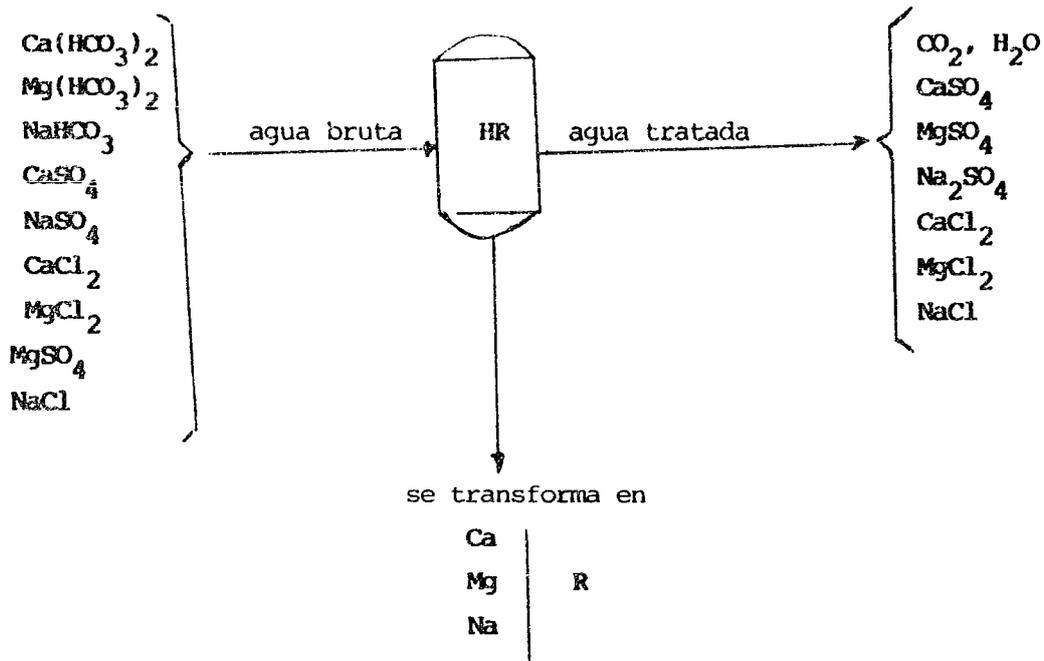


Fig. 4.7.3.

En estas condiciones el agua tratada conserva todas las sales de ácidos iniciales y la cantidad de CO_2 disuelto correspondiente a los bicarbonatos del agua bruta. Esta agua puede presentar una alcalinidad nula y una dureza igual al valor de la diferencia de la dureza de Ca y Mg menos la alcalinidad al anaranjado de metilo ("M") del agua bruta, por lo tanto, la dureza puede ser nula si la dureza de Ca y Mg es inferior o igual a la alcalinidad a la "M", intercambiándose los iones alcalinotérreos, con preferencia a los iones alcalinos.

En caso contrario puede obtenerse una dureza nula combinando en el mismo aparato, una capa de resina carboxílica con una capa de resina sulfónica regeneradas sucesivamente con un ácido fuerte y una solución de cloruro sódico.

En el caso de aguas bicarbonatadas sódicas, empeora el rendimiento de fijación de las resinas carboxílica, por lo que a veces se recurre al método denominado H-Na, que consiste en colocar en paralelo una resina sulfónica puesta en forma H y otra en forma Na, la primera resina fija todos los cationes y libera todos los ácidos correspondiente, en tanto que la segunda produce agua desendurecida.

La mezcla en la proporción conveniente de agua descationizada y de agua desendurecida, conduce a la misma composición de agua tratada que la del esquema anterior. Sin embargo este método tiene el inconveniente de que necesita una estricta proporcionalidad

del agua ácida y del agua bicarbonatada ya que de otro modo la mezcla resultante puede ser ácida y por tanto corrosiva.

En los esquema indicados, generalmente conviene eliminar el CO_2 disuelto producido por el intercambio iónico.

4.7.2.1.3.- Desmineralización total .

Según el esquema más sencillo, el agua atraviesa sucesivamente un intercambiador de cationes en forma H (regenerado con ácido) y un intercambiador de aniones de forma OH (regenerado con sosa).

Al pasar a través del intercambiador de cationes, estos últimos se fijan en la resina y solo subsisten en el agua los ácidos de sales presentes inicialmente.

El intercambiador de aniones destinado a retener estos ácidos puede estar constituido:

- por una resina débilmente básica, que retiene los aniones fuertes pero no los débiles, como son el ácido carbónico o la sílice (Fig. 4.7.4) o por una resina de fuerte basicidad que retiene a la vez los aniones fuertes y los aniones débiles, incluso el anhídrido carbónico y la sílice.

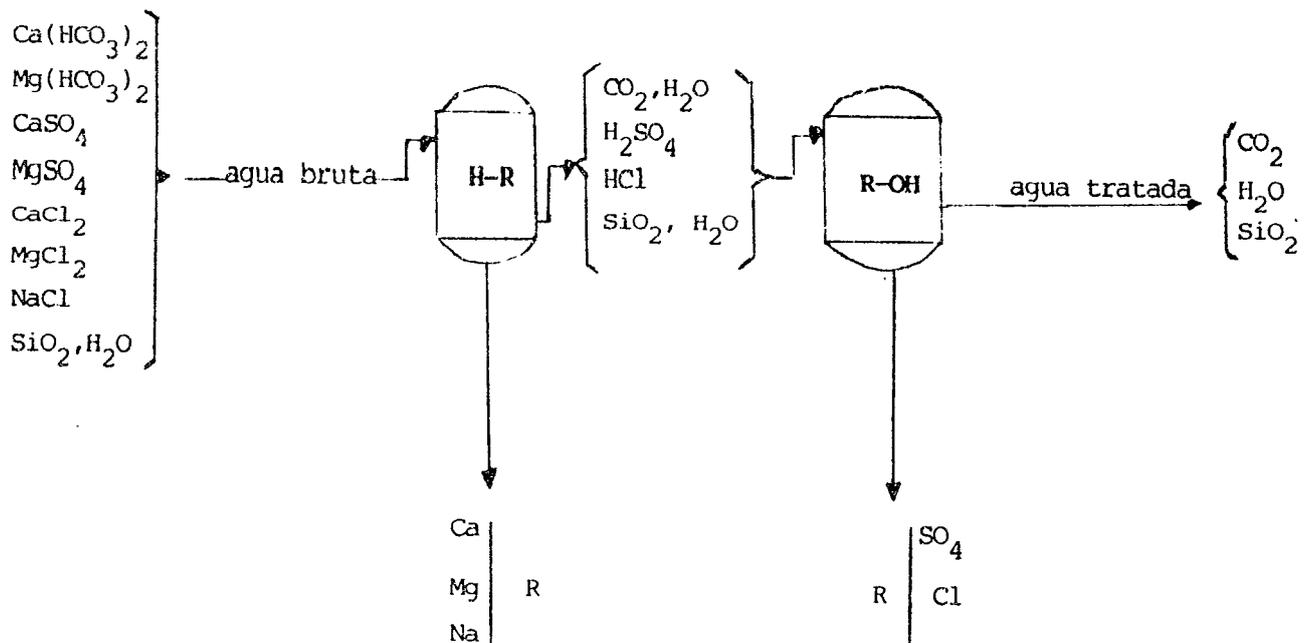


fig. 4.7.4.

Sin embargo, en este caso es aconsejable proceder a una eliminación de CO_2 por procedimientos físicos, con el objeto de reducir el consumo de reactivo regenerante necesario para el intercambiador de aniones (por los menos en los casos en los que el contenido de CO_2 representa una fracción notable de la salinidad).

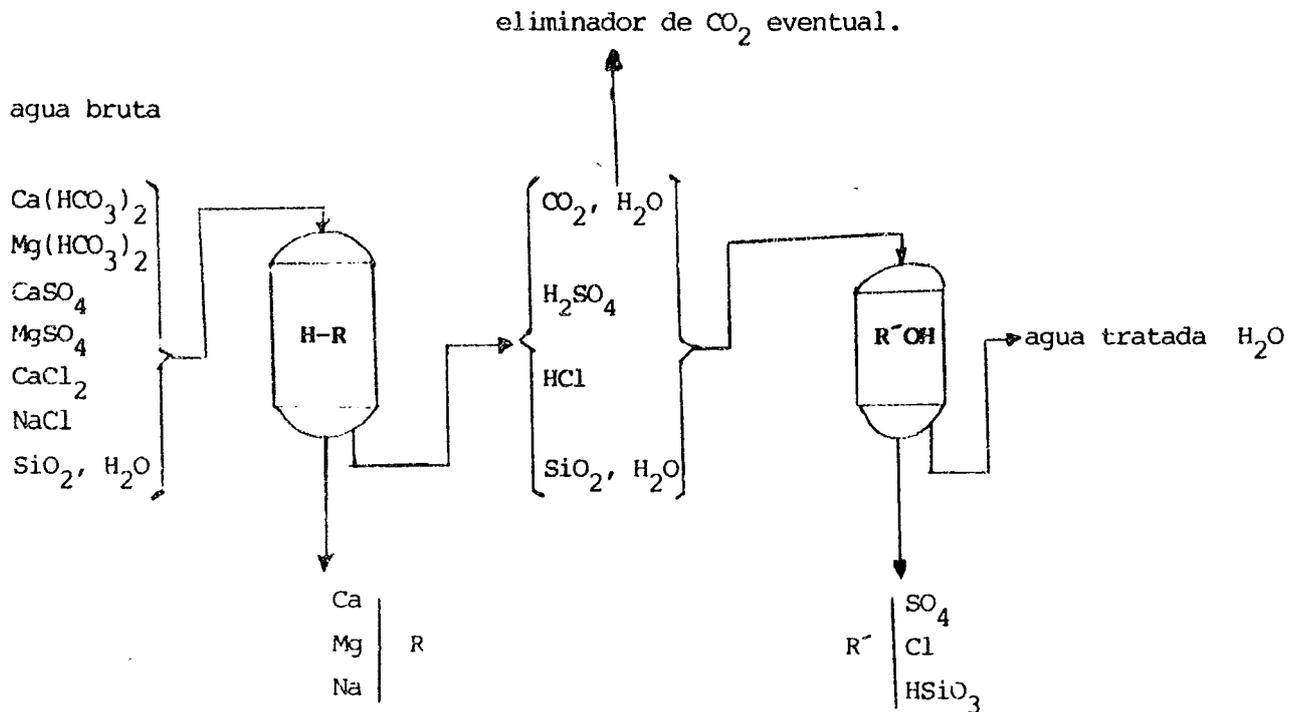


fig. 4.7.5.

A.- Esquemas de desmineralización

La desmineralización completa se realiza según diferentes variantes, debido a que con los esquemas simplificados descritos anteriormente no se obtiene un intercambio completo y por otra parte estos esquemas exigen el empleo de un exceso de reactivos más o menos grande.

Se han estudiado diferentes agrupaciones de intercambiadores con objeto de aumentar la pureza del agua desmineralizada o con el de reducir los consumos de reactivo de regeneración.

En estos esquemas:

- Cf = catión debilmente ácido.
- CF = catión fuertemente ácido.

- Af = anión mediana o débilmente básico.
- AF = anión fuertemente básico.
- CO₂ = eliminación física del anhídrido carbónico.
- IM = lechos simplificados (mixed-bed).

Se indican seguidamente, para cada tipo de instalación, los límites generales de utilización y de los resultados que pueden obtenerse.

A.1.- Cadena de un solo paso a través de intercambiador de cationes:

a) Intercambiador de cationes fuertemente ácido + intercambiador de aniones débilmente básico: Este sistema comprende un aparato cargado con intercambiadores de cationes fuertemente ácidos, regenerados con un ácido fuerte, que funciona en serie con un aparato cargado con intercambiadores de aniones débilmente (o medianamente) básicos, regenerados con sosa o amoniaco. El agua producida se utiliza directamente, si la acidez carbónica no es perjudicial o se desgasifica en un eliminador de CO₂ situado a la entrada o a la salida del intercambiador aniónico.

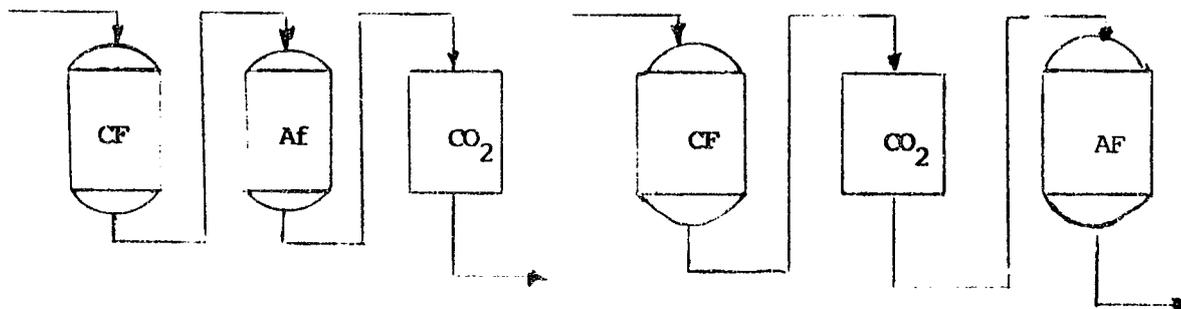


Fig. 4.7.6.

El agua obtenida sólo contiene algunos mg/l de sales ionizadas, pero contiene la totalidad de la sílice presente y si esta desgasificada unos mg/l de ácido carbónico. Según la dosis de regeneración adoptada por el intercambiador de cationes la conductividad puede variar entre 2 y 20 microsiemens por centímetro. El pH es del orden de 6 a 6.5 si la eliminación del dióxido de carbono se efectúa correctamente.

b) Instalación compuesta por un intercambiador de cationes fuertemente ácido y un inter-

cambiador de aniones fuertemente básico: En un agua tratada sucesivamente por un intercambiador de cationes y un intercambiador de aniones fuertemente básico, se eliminan todos los iones, incluida la sílice.

En la mayoría de los casos interesa reducir el flujo de iones que llega al intercambiador de aniones, intercalando entre este último y el intercambiador de cationes un eliminador de CO_2 , que reduce el contenido de éste hasta algunos mg por litro.

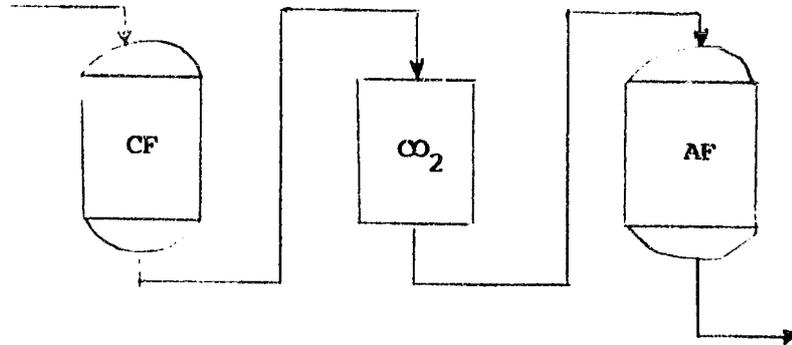


Fig. 4.7.7.

La calidad de agua desmineralizada depende principalmente de la dosis de regeneración del intercambiador de cationes.

La reducción del contenido de sílice es función del contenido en sosa del agua desmineralizada.

En la práctica se obtiene generalmente un agua con una conductividad de 3 a 20 microsiemens por centímetro y un contenido de sílice de 0.05 a 0.5 mg por litro y un pH comprendido entre 7 y 9.

c) Instalación compuesta por un intercambiador de cationes fuertemente ácido, un intercambiador de aniones débilmente básico y un intercambiador de aniones fuertemente básico: Este conjunto es una variante del anterior y con él se obtiene una calidad de agua idéntica, pero presente un interés económico cuando el agua a tratar contiene una gran proporción de aniones fuertes (cloruros, sulfatos). El agua atraviesa sucesivamente el intercambiador de aniones débilmente básico y el intercambiador fuertemente básico. Eventualmente, puede utilizarse un eliminador de CO_2 , que se coloca entre el intercambiador de cationes y el primer intercambiador de aniones, o bien entre los dos intercambiadores de aniones.

La regeneración de los intercambiadores de aniones se efectúa en serie atravesando la solución de sosa, primeramente la resina fuertemente básica y a continuación la dé-

bilmente básica. Con este método se obtiene una economía de sosa considerable con relación al anterior ya que en general el exceso de sosa procedente de la regeneración con dosis normal de la resina fuertemente básica, es suficiente para regenerar por completo la resina debilmente básica.

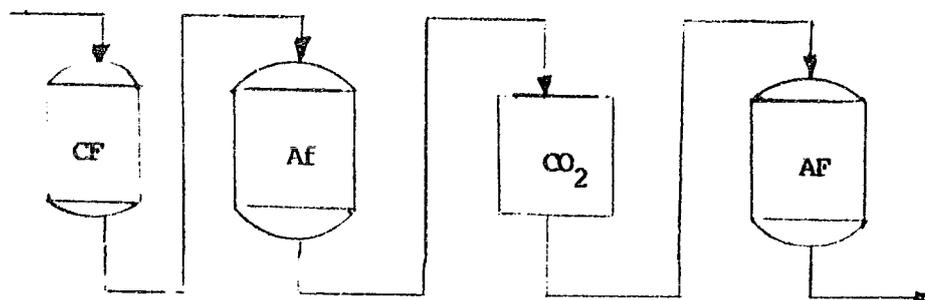


Fig. 4.7.8.

d) Instalación compuesta por un intercambiador de cationes débilmente ácido y un intercambiador de cationes fuertemente ácido en serie: esta instalación es una nueva variante de las anteriores. Es interesante cuando el agua contiene una proporción considerable de bicarbonatos. El agua atraviesa sucesivamente un intercambiador carboxílico y un intercambiador sulfónico.

La regeneración se efectúa en serie, pasando la solución regenerante, primero através de la resina sulfónica y después de la resina carboxílica. Dado que la regeneración de resina carboxílica se efectua prácticamente con la dosis estequiométrica aprovechando el exceso de ácido libre que subsiste después de la regeneración de la resina sulfónica, el consumo total de regenerante se reduce considerablemente. La fig. 4.7.9. representa una de las instalaciones posibles, según este esquema.

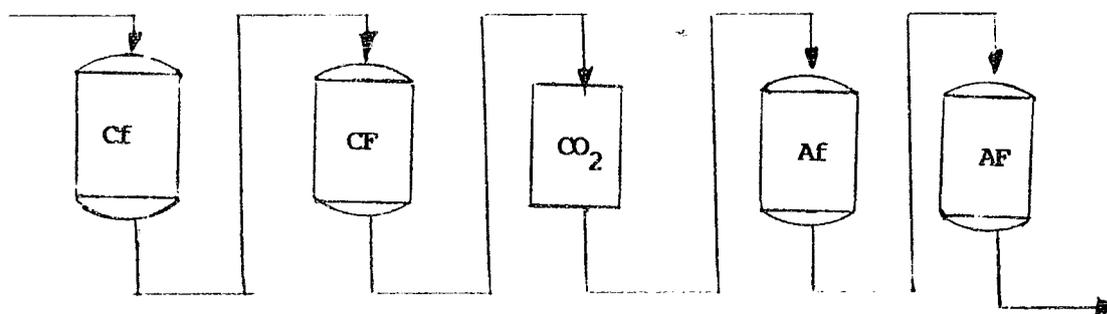


fig. 4.7.9.

A-2.- Cadena de varios pasos sobre intercambiadores catiónicos:

Como ya se ha indicado, la calidad de agua que sale de las cuatro instalaciones descritas viene determinada por la fuga iónica del intercambiador de cationes colocado en cabeza. Esta fuga iónica variable según las características del agua bruta y las dosis de regeneración, no permite obtener una calidad suficiente para algunas aplicaciones del agua desmineralizada, tales como la alimentación de calderas de gran presión y ciertas aplicaciones químicas, nucleares o electrónicas.

Es preciso tratar nuevamente el agua desmineralizada sobre una cadena final. La fuga iónica está constituida normalmente, de forma exclusiva, por bases libres de bicarbonatos alcalinos según que la cadena primaria se termina por una resina fuerte o débilmente básica, en consecuencia si el agua de la cadena primaria se envía a un segundo intercambiador de cationes sale descationada o en un grado extraordinariamente elevado y adquiere una gran pureza.

Sobre la base de este esquema, puede utilizarse en la práctica diferentes combinaciones:

- 1.º - Intercambiador de cationes primario
 - eliminador de CO₂ eventual.
 - intercambiador de aniones débil o medianamente básico.
 - intercambiador de cationes secundario.
 - intercambiador de aniones fuertemente básico.

En este caso el agua que sale del segundo intercambiador de cationes contiene aún sílice y dióxido de carbono que quedan retenidos en el intercambiador de aniones fuertemente básico. La conductividad del agua es muy pequeña y su contenido en sílice está comprendido entre 20 y 100 microgramos/l.

- 2.º - Intercambiador de cationes primario.
 - eliminador de CO₂ eventual.
 - intercambiador de aniones fuertemente básico.
 - intercambiador de cationes secundario.
 - segundo intercambiador de aniones fuertemente básico.

Con esta disposición, el agua tratada por el segundo cambiador de cationes sólo contiene trazas de sosa cáustica, el segundo intercambiador de aniones tiene un trabajo extraordinariamente pequeño y la calidad del agua es excelente (conductividad de 0.05 a 1 microsiemens por centímetro y contenido en sílice comprendido entre 5 y 20 microgra-

mos/1).

Una variante aún más ventajosa, del esquema anterior consiste en reemplazar el intercambiador de aniones fuertemente básico primario por una combinación de un intercambiador débil y un intercambiador fuertemente básico colocados en serie.

Se tiene entonces el esquema el esquema CF-Af-AF-CF-AF. Este esquema se utiliza preferentemente en la alimentación de calderas de muy alta presión y ofrece una gran seguridad. El consumo de sosa es muy pequeño, puesto que la regeneración de las dos resinas anionicas se realiza en serie. Por último la experiencia demuestra que esta combinación es la que conduce a mejores resultados y a la mejor combinación de las resinas cuando el agua bruta está cargada de materias orgánicas.

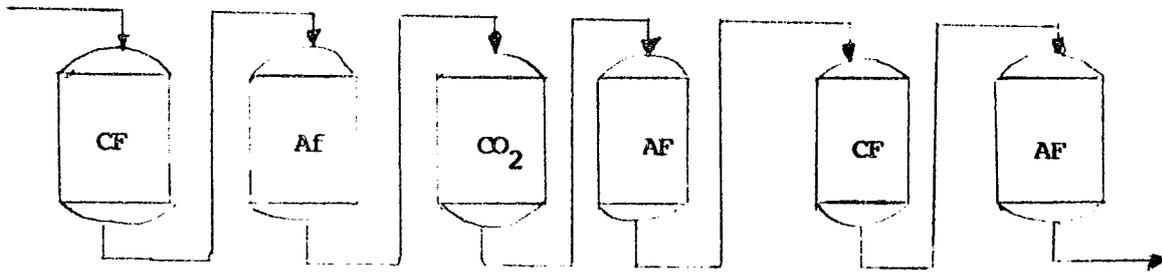


fig. 4.7.10.

Una variante de este esquema es el siguiente: Cf-CF-Af-AF-CF-AF con que se obtiene, con relación al anterior una economía de ácido de regeneración cuando el agua bruta es rica en bicarbonatos.

Para algunas aplicaciones de la industria química puede utilizarse perfectamente un agua descationada con un pH ligeramente ácido. En estas condiciones puede utilizarse el esquema:

- Intercambiador de cationes primario.
- intercambiador de aniones con eliminación de ácido carbónico.
- intercambiador de cationes secundario

El agua que se obtiene presenta un extracto seco extraordinariamente pequeño, una ausencia casi total de cationes sodio y calcio, un pH comprendido entre 6 y 7 y una conductividad superior a 1 microsiemens por centímetro.

4.7.2.2.- Regeneración a contra-corriente, empleo de los lechos superpuestos.

Se ha considerado, desde hace mucho tiempo que la utilización del regenerante en el mismo sentido de filtración que de líquido a depurar era contraria a la lógica. Efectivamente no puede agotarse sistemáticamente el regenerante cuando se pone en contacto, en primer lugar con capas de intercambiador de iones de estado de saturación decreciente.

Sin embargo, la puesta en práctica de la regeneración a contra-corriente ha tropezado con diversas dificultades debidas a la concepción y a la tecnología del tratamiento a través de intercambiadores de iones.

En la regeneración de abajo arriba el regenerante debe inyectarse en la base del recipiente, efectuándose la salida por un dispositivo de recogida situado en la parte superior del lecho de resinas intercambiadoras de iones.

Gracias a los avances tecnológicos, se ha conseguido controlar la expansión del lecho de resinas y realizar un reparto de regenerante lo mas perfecto posible. Los diferentes procedimientos se dividen en tres categorías:

A.- Procedimientos con bloqueo de agua.

La solución de regenerante se inyecta en la base del lecho de resinas intercambiadoras de iones al mismo tiempo que se induce una corriente de agua de bloqueo por la parte superior del aparato, efectuándose la salida de los fluidos por unos puntos de toma situados en la parte superior del lecho de resina.

La experiencia ha demostrado que este procedimiento hace difícil una utilización óptima de regenerante debido a la inestabilidad del sistema hidráulico. sin embargo con relación a la regeneración a equi-corriente, se han obtenido unos resultados en la calidad de agua a tratada muy superiores, especialmente cuando se adopta el método de regeneración pulsada o se limita la velocidad ascensional a un valor comprendido entre 2 y $2.5 \frac{m^3}{m^2 \cdot h}$.

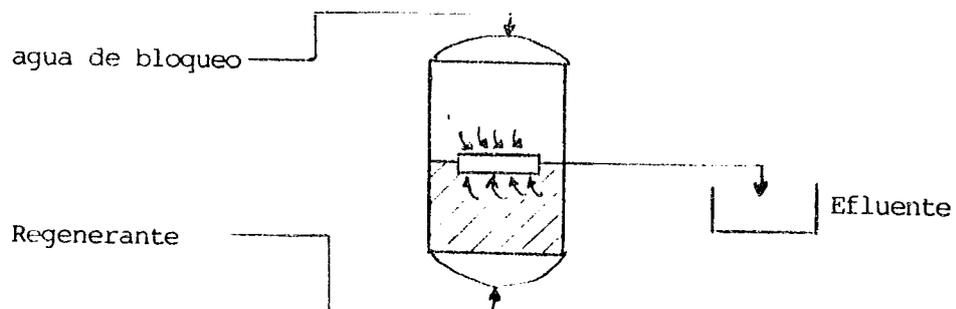


fig. 4.7.11.

B.- Bloqueo mecánico.

Para conseguir el bloqueo mecánico de la resina se utilizan diversos métodos, tales como: expansión de una membrana de goma o de plástico en el momento de la regeneración, relleno del espacio libre por encima del lecho de resina con un material inerte, etc.

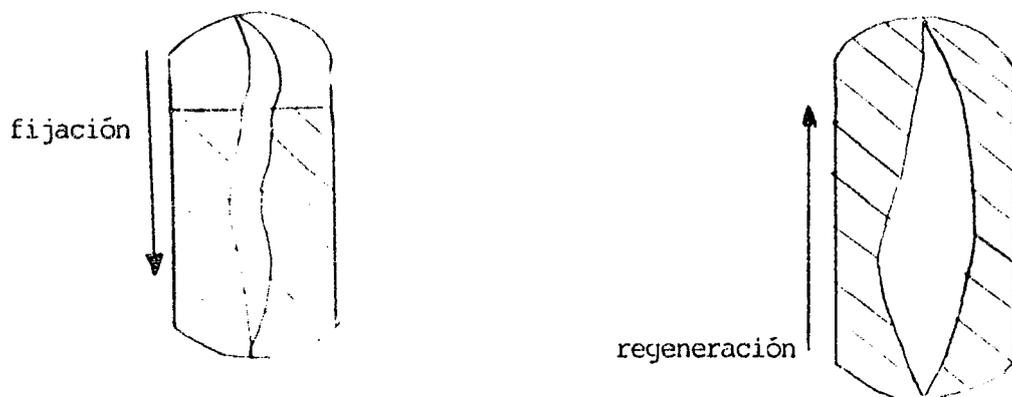


Fig. 4.7.12.

En el procedimiento denominado de "lecho flotante", el tratamiento se efectúa de abajo arriba y la regeneración de arriba abajo.

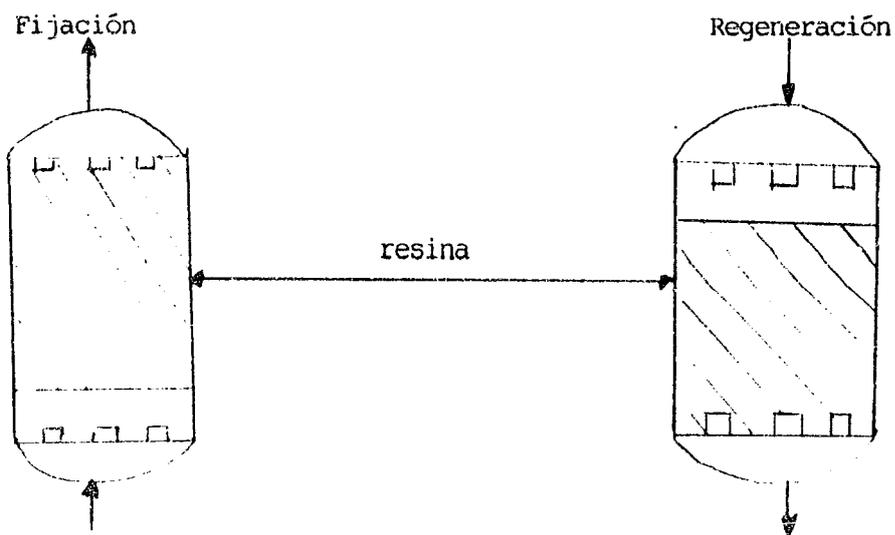


Fig. 4.7.13.

La característica común de estos procedimientos es que necesita un material auxiliar apropiado, con objeto de eliminar los finos de resina y las materias en suspensión adoptadas por el agua bruta y los reactivos.

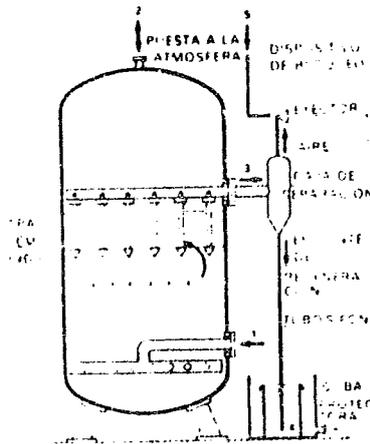


Fig.4.7.14.- Regeneración a contracorriente, bloqueo por aspiración de aire.

- 1.- Entrada de regenerante.
- 2.- Puesta a la atmósfera.
- 3.- Salida de la mezcla efluente de regeneración+aire.
- 4.- Salida del efluente de regeneración.
- 5.- Entrada de agua motriz.

C.- Bloque con aire.

En este procedimiento se efectúa una desecación parcial de la capa de resina intercambiadora de iones mediante la cual el lecho de resina se mantiene bloqueado durante la regeneración.

La primera de las secuencias de la regeneración consiste en vaciar parcialmente el aparato hasta el nivel de los colectores de recogida de efluidos, con lo que se consigue la desecación de la capa superior de resina. Esta secuencia comprende una inyección de aire a presión o bien una aspiración de aire por dispositivo exterior. Se mantiene el caudal de aire durante la inyección y desplazamiento del reactivo regenerante (ver figura 4.7.14.).

Con este sistema se estabiliza el lecho de resina y se evita la expansión: la velocidad de inyección de reactivo alcanza fácilmente $10 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$, siendo muy interesante adoptar una velocidad elevada en el caso de regeneración con ácido sulfúrico.

4.7.2.2.1.- Empleo de los lechos superpuestos .

En algunos casos pueden reunirse en un único aparato intercambiadores de función fuerte y de función débil de la misma polaridad siempre que su diferencia de densidad sea suficiente. En estas condiciones las resinas se clasifican por esponjamiento a contracorriente de forma que en ciclo de fijación, el líquido a tratar atraviese sucesivamente la resina débil y después la resina fuerte, lo que coincide con los diversos esquemas de utilización que se han representado anteriormente.

Naturalmente, para que el rendimiento de este sistema se óptimo, es necesario que la regeneración se haga en el sentido inverso al de fijación, y por consiguiente al, de abajo arriba. Las tecnologías puestas a punto para garantizar una regeneración ascendente correcta permite, permita la utilización racional de lechos superpuestos de acuerdo con el esquema de base siguiente:

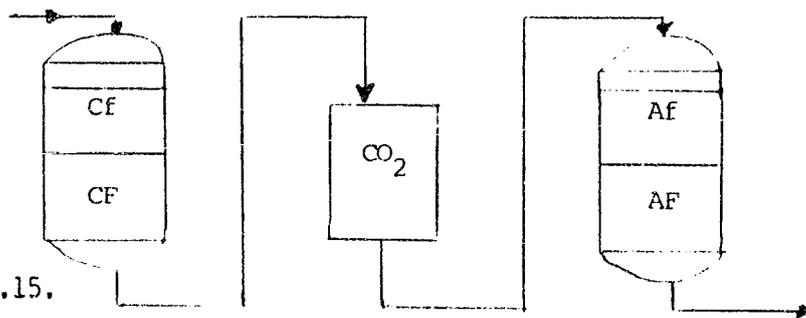


fig. 4.7.15.

Sin embargo debe observarse que la diferencia de densidad entre las resinas carboxílicas

y sulfónicas es menos favorable a la separación que la de las aniónicas mediana y fuertemente básicas razón por la que el lecho superpuesto catiónico sólo se utiliza en raras ocasiones.

4.7.2.2.2.- Rendimientos de los intercambiadores regenerados a contra-corriente.

la calidad del agua tratada varía en función del grado de regeneración adoptado para la regeneración de las resinas intercambiadoras de iones. En aguas de salinidad y contenido en sílice medios, la conductividad a la salida de la cadena primaria está comprendida, generalmente entre 0.5 y 5 microsiemens por centímetro, siendo el contenido de sílice normalmente inferior a 50 microgramos/l. Por lo tanto estas cadenas primarias podrán utilizarse para alimentación de calderas de media presión, sin recurrir a un afino a través catión-anión secundarios.

Si es necesario obtener calidades de agua más puras, se utilizarán cadenas con varios pasos de intercambio ionico (ver fig. 4.7.16).

Una técnica que se utiliza muy frecuentemente para el afino es la del lecho mixto.

Cf - intercambiador de cationes débilmente ácido (carboxílico).

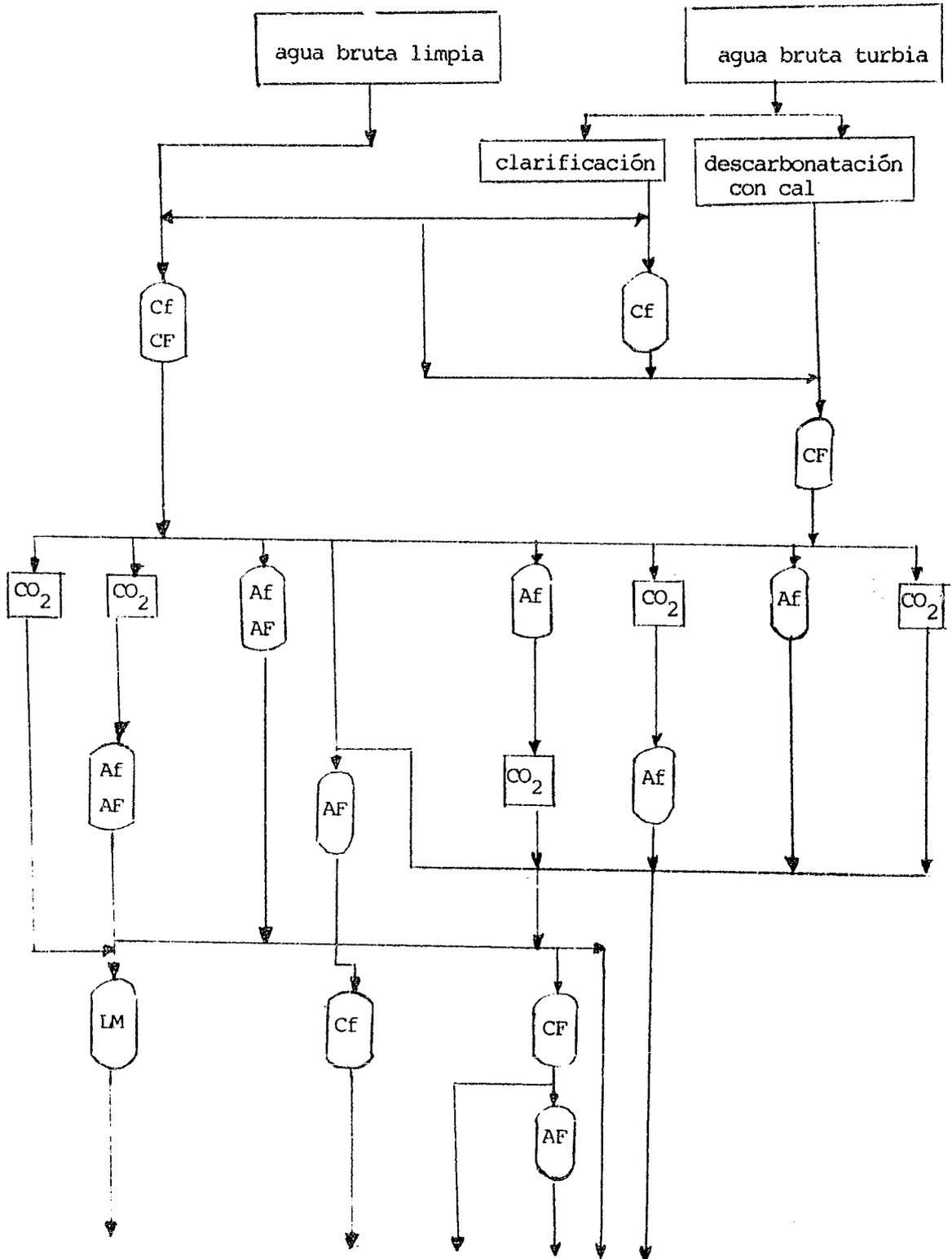
CF - intercambiador de cationes fuertemente ácido.

C₂ - eliminador de CO₂

AF - intercambiador de aniones fuertemente básico (eliminador de sílice).

LM - lecho mezclado.

Fig. 4.7.16.- SINOPTICO DE COMBINACIONES HABITUALES
EN APARATOS DE DESMINERALIZACION.



4.7.2.3.- Instalación de lechos mezclados.

Este procedimiento difiere esencialmente de la desmineralización en lechos separados ya que las dos resinas, catiónica y aniónica se encuentran en un solo aparato en el que se mezclan íntimamente por agitación con aire comprimido. Los granos de resinas se disponen así, unos juntos a otros y el conjunto se comporta con una infinidad de intercambiadores de cationes y de aniones en serie.

Para efectuar la regeneración, se separan hidráulicamente las dos resinas mediante un esponjamiento de agua a contracorriente. La resina aniónica más ligera, se coloca en la parte superior y la catiónica más pesada se deposita en el fondo.

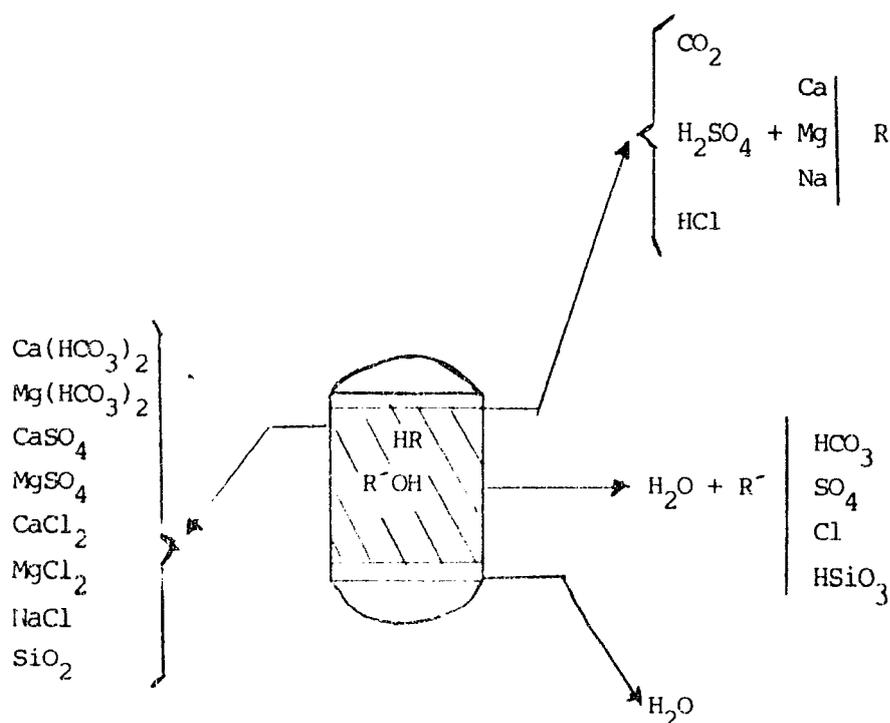


fig. 4.7.17.

Después de su separación se regeneran las resinas con sosa cáustica y un ácido fuerte respectivamente. El exceso de regenerante se elimina mediante un aclarado de cada lecho.

Después de un vaciado parcial del aparato se mezclan de nuevo las resinas con aire comprimido. Se termina el aclarado, y el aparato está dispuesto para un nuevo ciclo.

Las ventajas para la desmineralización por lechos mezclados en relación con la de lechos separados son las siguientes :

- obtención de un agua de gran pureza y de calidad constante a lo largo del ciclo.
- pH aproximadamente neutro.
- consumo muy pequeño de agua de lavado.

Los inconvenientes de los intercambiadores de lechos mezclados son su poder de cambio y su explotación más delicada debido a la necesidad de efectuar la separación y la mezcla de las resinas de forma muy completa para obtener buenos resultados.

Los intercambiadores de lechos mezclados se utilizan generalmente como final de un tratamiento después de una cadena de desmineralización primaria, o cuando el agua bruta esta muy poco cargada de iones (aguas condensadas, aguas de piscinas nucleares desmineralizadas en circuito cerrado, etc.).

En estos últimos casos, un solo cambiador de lechos mezclados puede remplazar a una cadena compleja de intercambiadores de iones.

Se han utilizado igualmente esquemas diversos que constan de :

- intercambiador de cationes eliminador de CO_2 , lecho mezclado.
- desendurecedor lecho mezclado.
- intercambiador de cationes, intercambiador de aniones débilmente básico, lecho mezclado (esquema interesante en el caso de un agua rica en aniones fuertes).

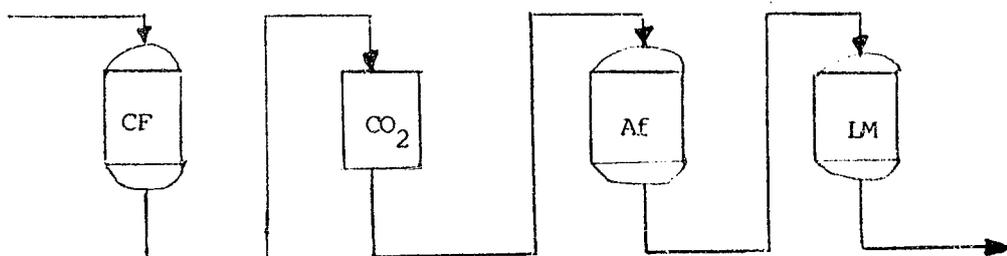


fig.4.7.18.

Cuando el agua es rica en sílice o si se desea un eliminador de sílice muy completa puede utilizarse uno de los esquema siguientes:

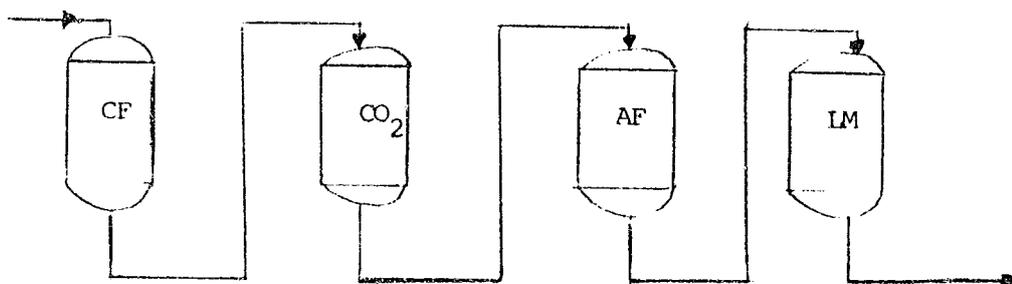


fig.4.7.19.

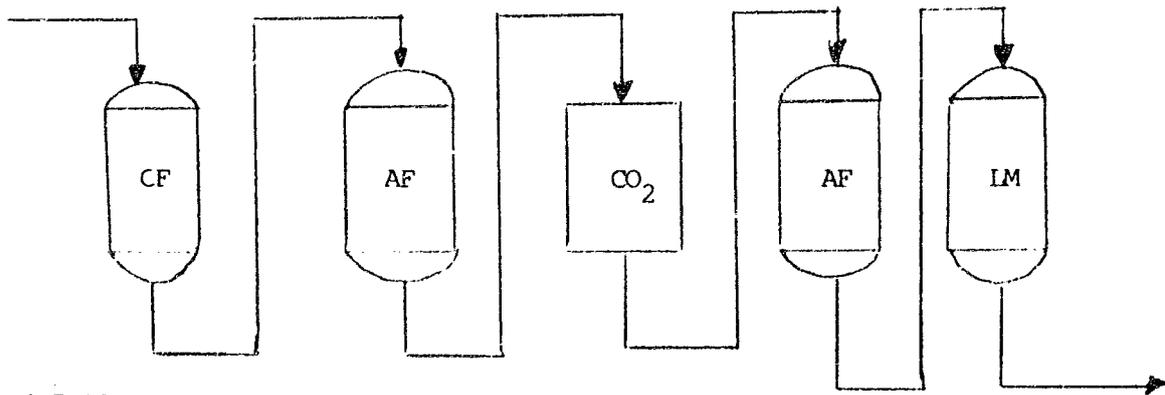


fig. 4.7.20.

4.7.2.4.- Intercambio de iones con lechos móviles.

Todos los procedimientos descritos hasta ahora, emplean capas de resinas fijas con funcionamiento cíclico discontinuo, contenidos en aparatos cilíndricos verticales.

En esas instalaciones cada unidad se caracteriza por un ciclo de fijación, de esponjamiento, de regeneración y de lavado, al final del cual el intercambiador de iones se encuentra en el estado inicial, listo para comenzar un nuevo ciclo.

Esta forma de utilización presenta una serie de inconvenientes:

- empleo de masas de resinas calculadas generalmente en función no del caudal horario, sino de la autonomía deseada entre dos regeneraciones lo que da lugar, en el caso de aguas con gran salinidad a la inmovilización de enormes volúmenes de intercambiadores.
- interrupción de la producción del líquido tratado durante toda la duración de la regeneración, lo que exige duplicar las cadenas de tratamiento o prever grandes almacenes de líquido tratado.
- maniobras complejas de regeneración.
- consumo importante de agua de esponjamiento y de aclarado.

Por otra parte es necesario detener el ciclo en el momento en el que aparece una fuga iónica en la parte inferior de la capa, es decir, mucho antes de que toda la resina se encuentre saturada de los iones a fijar, la resina trabaja con rendimientos de fijación y regeneración muy inferiores a los teóricos.

Por ello los especialistas de cambio de iones, se han interesado, desde hace mucho tiempo, por la idea de sustituir el modo clásico de empleo de los intercambiadores por un procedimiento continuo a contracorriente.

Las dificultades que debían vencerse se referían especialmente a:

- la circulación regular y controlada de la resina.

- la separación de la resina agotada de los líquidos tratados.
- el reparto correcto de los fluidos en un lecho de resina móvil
- el empleo de una forma de transporte del intercambiador sin esfuerzos mecánicos sobre los granos de resina.

Todas estas dificultades se han superado con la intervención de un conjunto de intercambio de iones que consta de (ver fig. 4.7.2 l.) :

- una columna de fijación provista de una tolva de lavado-eliminación de finos.
- una columna de separación resina-líquido bruto (opcional).
- una columna de regeneración.

Estas columnas son generalmente del tipo de lechos compactos. sin embargo la columna de fijación o la de regeneración puede ser del tipo de lecho fluidificado, por ejemplo en el caso de tratamiento de fluidos con gran contenido de materias en suspensión. La resina circula de forma semi-continua a intervalos programados pasando desde la parte inferior de la columna de fijación, a la columna de regeneración y después a la tolva de lavado antes de su introducción en la columna de fijación. Debido a que todos los líquidos circulan a contracorriente de las resinas, los diversos intercambios, fijación, regeneración, lavado, se efectúan en condiciones óptimas: se reducen los volúmenes de resina o los rendimientos de regeneración aumentan considerablemente.

Se regulan previamente los caudales del líquido bruto, de regenerante de agua de dilución y de agua de lavado y la circulación de las resinas se predeterminan mediante la regulación de la frecuencia de las transferencias afectadas a partir del compartimiento dosificador situado en la parte superior de la columna de regeneración. En el caso de alteraciones en la composición del líquido bruto, se hace variar la dosis de inyección de regenerante y la velocidad de circulación de la resina.

La descripción anterior se refiere a un intercambiador de iones simple, es decir, a un problema:

- de desendurecimiento (resina catiónica regenerada con cloruro sódico).
- de descationización (resina catiónica regenerada con ácido).

Si se prevé la desmineralización del tipo clásico, con dos columnas: catión + anión basta asociar dos sistemas, idénticos cada una de ellos con tres columnas colocados en serie y en los que se utilice en uno de ellos una resina catiónica regenerada con ácido y en el otro con una resina aniónica regenerada con sosa o amoníaco.

La calidad del agua obtenida depende de la fuga iónica del intercambiador de cationes

(fuga iónica es la relación expresada en % entre las concentraciones del ionen el líquido después y antes del tratamiento) estando condicionada ésta por la dosis de regenera-

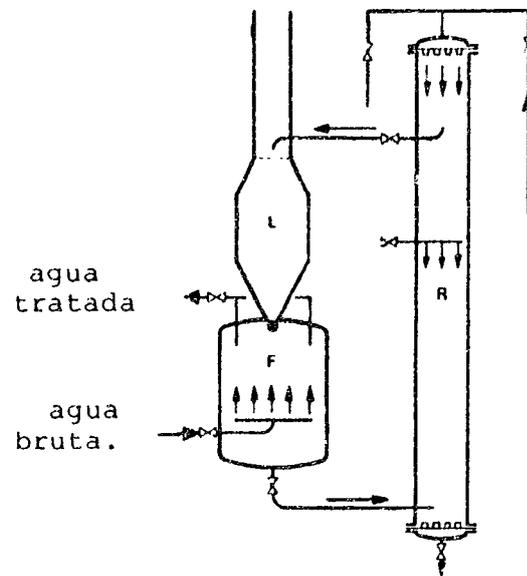


Fig. 4.7.21.

- F.- Columna de fijación.
- R.- Columna de regeneración.
- L.- Tolva de lavada-eliminación de finos.

ción y por la salinidad del fluido a tratar. Si se desea conseguir un agua de gran calidad (conductividad inferior a 1 microsiemens por centímetro, contenido de sílice menor de 50 microgramos por litro)

un progreso interesante consiste en utilizar un lecho mezclado continuo catión-anión, cuyo esquema y fases esenciales de utilización se exponen seguidamente.

La instalación comprende (fig. 4.7.22.):

-una columna de fijación de lecho mezclado.

-una columna de división de las resinas.

-dos columnas de regeneración, una para el intercambiador de cationes y la otra para el intercambiador de aniones.

Puesto que en un lecho mezclado no es necesario que se eliminen en el lavado hasta las últimas trazas de sales, pueden utilizarse tolvas de alimentación de tamaño reducido con relación a las tolvas de lavado-eliminación de finos.

Las fases correspondientes a la columna principal son la fijación y la descarga.

La columna de división se alimenta de resinas mezcladas por transferencia hidráulica desde la parte inferior de la columna de fijación y garantiza una perfecta separación entre las resinas catiónicas y las resinas aniónicas, recojiéndose las primeras en la parte baja y las segundas a un nivel convenientemente elegido en una zona superior de la columna.

Un detector de nivel actúa sobre una válvula automática, que pone en marcha o para la alimentación de resinas según las transferencias efectuadas hacia las columnas de regeneración, las cuales funcionan como se ha indicado anteriormente.

Las resinas regeneradas lavadas pasan por vía hidráulica, a una tolva de mezcla que alimenta a las columnas de fijación.

El caudal de circulación de resina se determina de forma muy simple multiplicando el volumen de cada compartimento dosificado por el número horario de transferencias.

Este tipo de instalación se adapta a aguas que no contienen una proporción muy fuerte de bicarbonatos. En efecto la propia concepción del lecho mezclado impide que se elimine por vía física el CO_2 de los bicarbonatos. El intercambiador de aniones, debe fijar la totalidad de este CO_2 , lo que da lugar a fuertes inversiones en resinas y a un consumo innecesario de reactivos.

El esquema más económico para tratar un agua bicarbonatada, obteniendo un agua de gran pureza, consiste en una descarbonatación continua sobre resina carboxílica en un cambiador simple, como ya se ha descrito, una eliminación física del ácido carbónico y un lecho mezclado continuo, según se acaba de exponer.

Se obtiene un economía de ácido efectuando una regeneración en serie de la columna

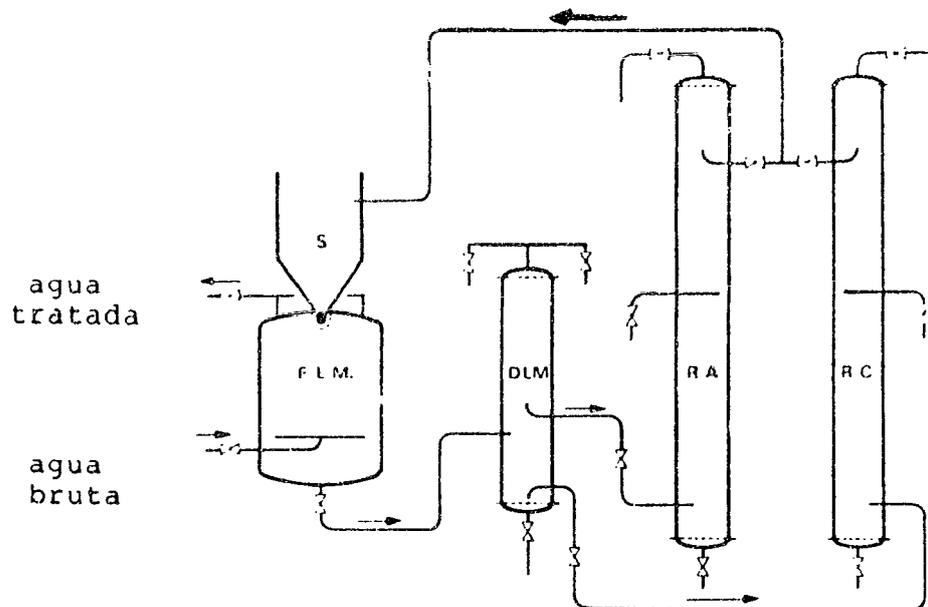


Fig. 4.7.22.- Desmineralización en continuo a través de lecho mezclado.

- F.L.m.- Columna de fijación.
- D.L.M.- Columna de división.
- R.A.- Columna de regeneración aniónica.
- R.C.- Columna de regeneración catiónica.
- s.- Almacenamiento de resinas.

de resina sulfónica y de la columna de resina carboxílica. Para ello, el sistema va equipado con un depósito intermedio que permite efectuar una dilución secundaria cuando el agua bruta es rica en calcio y se quiere evitar una concentración demasiado grande de sales de calcio en el efluente de la regeneración carboxílica.

Con este procedimiento se reduce por tanto el consumo ácido mediante la regeneración combinada descrita anteriormente y el consumo de sosa, por la eliminación física del ácido carbónico de los bicarbonatos y por la regeneración sistemática a contracorriente.

Se han indicado anteriormente las dificultades superadas por los procesos continuos en el empleo de los intercambiadores de iones. Con relación a otros procedimientos los cuales se encuentran en su mayoría en fases de ensayos en plantas piloto, el procedimiento que acaba de describirse presenta las ventajas específicas siguientes:

- 1.- Las resinas y los fluidos circulan siempre a contracorriente y en sentido más racional, debido a que las soluciones regenerantes se inyectan siempre en resinas perfectamente compactas.
- 2.- El transporte de las resinas se efectúa hidráulicamente y sin ningún empuje mecánico.
- 3.- Las columnas de fijación, regeneración, o lavado se calculan independientemente unas de otras y pueden adaptarse a cada caso particular de caudal, salinidad y rendimiento de regeneración.
- 4.- Se han estudiado cuidadosamente los dispositivos de reparto y de compactación, con el fin de aproximarse lo más posible a los rendimientos deducidos de las curvas de equilibrio.

Además otra ventaja común a todos los procesos continuos, consiste el hecho de que los efluentes de regeneración, ácidos y alcalinos se vierten a caudales constantes y pequeños, por tanto su neutralización es mucho más fácil de realizar en el caso de un proceso discontinuo y no necesita la instalación de grandes fosas de neutralización.

4.8.- OSMOSIS INVERSA .

La ósmosis inversa tiene su origen en la comprobación de la reversibilidad del fenómeno de ósmosis directa o natural.

La figura 4.8.1. representa una solución acuosa de sales minerales (compartimento A) y agua pura (compartimento B). La ósmosis natural o directa se traduce por una transferencia de agua pura del compartimento B hacia el compartimento A hasta que la presión engendrada por la columna del líquido anula el flujo de agua pura alcanzándose el equilibrio ósmótico, el valor de esta presión hidrostática se le denomina presión ósmótica de la solución A.

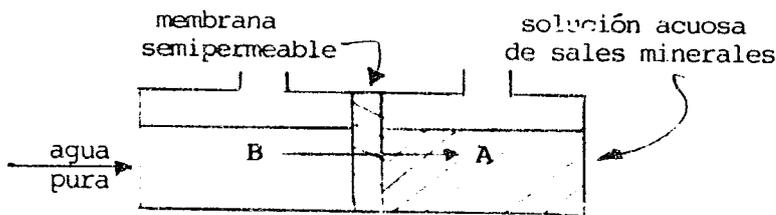


fig. 4.8.1.

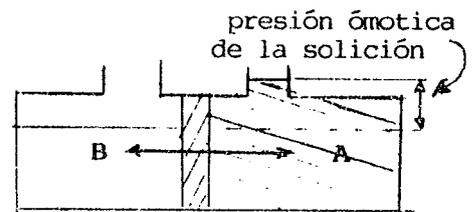


fig.4.8.2.

Si se aplica ahora por encima de la solución salina, una presión hidrostática superior a la presión asmótica fig.4.8.3. se observa un flujo de agua pura en sentido inverso al anterior, quedando las sales retenidas por la membrana, este fenómeno recibe el nombre de ósmosis inversa.

Para la ósmosis inversa se utilizan unas membranas llamadas semipermeables que dejan pasar el agua en tanto que retienen del 90 al 99 % de todos los elementos minerales disueltos del 95 al 99 % de la mayoría de los elementos orgánicos y el 100 % de las materias coloidales más finas (bacterias virus, sílice coloidal).

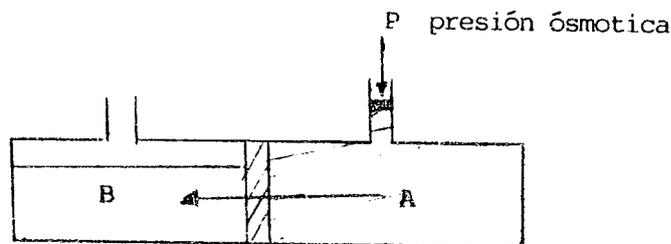


Fig. 4.8.3. Osmosis inversa .

- 1.- agua bruta.
- 2.- agua depurada.
- 3.- vertido concentrado.
- 4.- bomba de alta presión.
- 5.- módulo de ósmosis inversa.
- 6.- membrana semipermeable.
- 7.- válvula de expansión.

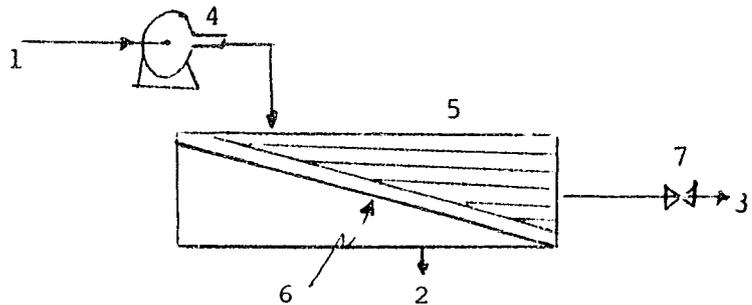


Fig. 4.8.4.- Esquema simplificado de funcionamiento de una unidad de ósmosis inversa.

Las membranas que reúnen a unos elementos denominados módulos y el esquema de aplicación más sencillo consiste en poner en serie una bomba de alta presión y un módulo, en el cual el agua pura atraviesa la membrana bajo el efecto de la presión, en tanto que un efluente concentrado (rechazo) se evacua en continuo por medio de una válvula de expansión (fig. 4.8.4.). La relación entre el caudal de agua depurada y el caudal de alimentación se denomina conversión Y expresada en %.

Por último el caudal de una membrana de ósmosis inversa es directamente proporcional a la presión eficaz (diferencia entre la presión aplicada y la presión ósmótica), teniendo en cuenta que en el mismo módulo, la concentración a lo largo de la membrana varía de la concentración de entrada C_e a la concentración máxima $C_r \times \psi$ (C_r concentración en el rechazo y ψ coeficiente de polarización). Por lo tanto, para seguir un flujo de agua depurada conviene disponer de una presión muy superior a la presión ósmótica del rechazo (vease cuadro 4.8.1.).

En la práctica las presiones utilizadas varían entre 25 y 80 bar (por lo menos, en grandes instalaciones).

- 1.- agua bruta.
- 2.- agua depurada.
- 3.- vertido concentrado.
- 4.- bomba de alta presión.
- 5.- módulo de ósmosis inversa.
- 6.- membrana semipermeable.
- 7.- válvula de expansión.

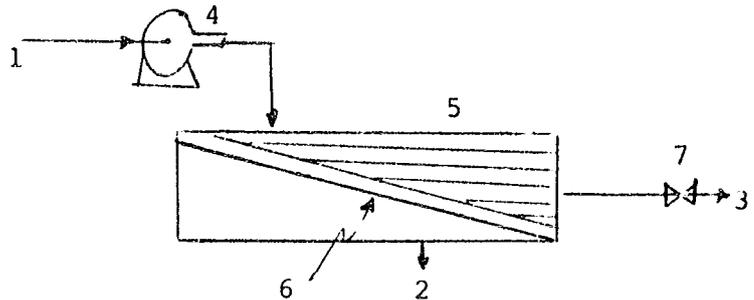


Fig. 4.8.4.- Esquema simplificado de funcionamiento de una unidad de ósmosis inversa.

Las membranas que reúnen a unos elementos denominados módulos y el esquema de aplicación más sencillo consiste en poner en serie una bomba de alta presión y un módulo, en el cual el agua pura atraviesa la membrana bajo el efecto de la presión, en tanto que un efluente concentrado (rechazo) se evacua en continuo por medio de una válvula de expansión (fig. 4.8.4.). La relación entre el caudal de agua depurada y el caudal de alimentación se denomina conversión Y expresada en %.

Por último el caudal de una membrana de ósmosis inversa es directamente proporcional a la presión eficaz (diferencia entre la presión aplicada y la presión ósmótica), teniendo en cuenta que en el mismo módulo, la concentración a lo largo de la membrana varía de la concentración de entrada C_e a la concentración máxima $C_r \times \psi$ (C_r concentración en el rechazo y ψ coeficiente de polarización). Por lo tanto, para seguir un flujo de agua depurada conviene disponer de una presión muy superior a la presión ósmótica del rechazo (vease cuadro 4.8.1.).

En la práctica las presiones utilizadas varían entre 25 y 80 bar (por lo menos, en grandes instalaciones).

Cuadro 4.8.1.
Presion osmótica de diferentes sales en solución.

Naturaleza de la sal	concentración mg/l	presión ómotica bar.
NaCl	35000	27.86
NaCl	1000	0.79
Na ₂ SO ₄	1000	0.42
MgSO ₄	1000	0.25
CaCl ₂	1000	0.58
NaHCO ₃	1000	0.89
MgCl ₂	1000	0.67

4.8.1.- Membranas de ósmosis inversa.

Cuando se realizan membranas en laboratorio normalmente de forma plana se plantean pocas dudas respecto a la elección de los materiales.

Por el contrario a escala industrial, la economía del proceso tiene una importancia extraordinaria, economía que depende ante todo de la configuración de la membrana y de la estabilidad en el tiempo del material elegido.

En la actualidad, se comercializan dos tipos de membranas:

- membranas de acetato de celulosa (mezcla mono, di, triáacetato).
- membranas de poliamidas aromáticas.

Las membranas de acetato de celulosa se adaptan a un fuerte caudal por unidad de superficie y se utilizan en forma tubular, forma plana enrolladas en espiral y mas recientemente, en forma de fibras huecas.

Por el contrario, las membranas de poliamidas tienen menor caudal específico. Estas se fabrican en forma de fibras huecas para obtener un máximo de superficie por unidad de volumen, aproximadamente 15 veces más que las membranas enrolladas en espiral (ver figuras 4.8.5 y 4.8.6).

Conviene resaltar la excelente resistencia a los agentes químicos y biológicos de las membranas de poliamidas que les confiere una duración mucho mayor que la de las membranas de acetato cuya hidrólisis no puede evitarse (sin embargo puede reducirse al mínimo

esta hidrólisis respetando unas condiciones de explotación muy rigurosas por lo que se refiere al pH y a la temperatura).

En el cuadro 4.8.2 se resumen las diferentes características de dos tipos de membranas de diacetato de celulosa y de poliamida.

Cuadro 4.8.2.
Membranas de acetato espirales
y membranas de poliamida de fibras huecas.

Membranas	Tratamiento de aguas de salinidad 15 g/l.	
1. Naturaleza	poliamidas aromática	acetato de celulosa
2. Configuración	fibras huecas	espiral o fibras huecas
3. Resistencia física:		
- Presión normal de funcionamiento	28 bar	30 a 42 bar
- Contrapresión máxima del agua producida	3.5 bar	
- Temperatura máx. de funcionamiento	35 °C	30 °C
- Temperatura máx. de almacenamiento	40 °C	30 °C
4. Resistencia química:		
- PH tolerados	4 a 11	4.5 a 6.5
- Hidrólisis	insensible	muy sensible
- Ataque bacteriano	insensible	muy sensible
- Cloro libre-dosis máxima admisible en continuo	pH 8 : 0.1 mg/l pH 8 : 0.25 mg/l	0.5-1 mg/l
- Otros agentes oxidantes	buena reistencia	resistencia mediana
5. Duración	3 a 5 años	2 a 3 años
6. Paso de sal (NaCl)	5 a 10 %	5 a 10 %

También existen unas membranas llamadas "agua de mar" las cuales partiendo de polímeros de base tienen una estructura más "apretada" por lo que puede desalinizar, en una sola fase, soluciones de varias decenas de gramos de sal por litro como el agua de mar.

4.8.1.1.- Módulos de enrollamiento en espiral. (fig. 4.8.5)

Las membranas se enrollan en pares sobre un tubo central en que se recoge el permeado. La solución que debe desmineralizarse circula paralelamente al tubo central, dentro de los espacios acondicionados entre las dos caras activas de las membranas por medio de unos espaciadores (generalmente rejillas de plástico).

El permeado atraviesa un material poroso y llega al tubo central.

Con esta técnica puede constituirse, partiendo de membranas planas, módulos mucho más compactos que los que se introdujeron en primer lugar en el mercado (membranas planas sobre placas porosas o membranas apoyadas sobre tubos).

4.8.1.2.- Módulos de fibras huecas . (fig. 4.8.6)

Una fibra hueca puede asimilarse a un cilindro poroso de pared gruesa, cuya resistencia es función de la relación diámetro exterior-diámetro interior. Si esta relación permanece constante en tanto que decrece los dos diámetros, el cilindro conserva sus propiedades de resistencia aun cuando disminuya el espesor de la pared (con lo que aumenta el caudal del agua que la atraviesa). Se consigue así una membrana de superficie máxima por unidad de volumen, capaz de resistir sin soporte mecánico, presiones elevadas.

Por efecto de la presión exterior a las fibras, el agua pura atraviesa su pared, pasa al interior de su canal central, atraviesa la capa epoxy de estanquidad, que soporta sus extremos libres y sale del módulo después de haberse recogido en un disco poroso.

El rechazo concentrado se recoge en el exterior del paquete de fibras, antes de ser evacuado por un orificio situado por la parte de la entrada de agua este tipo de módulos se fabrica en diversos tamaños y tiene diferentes producciones.

Instalaciones de ósmosis inversa .- El esquema de montaje más sencillo consiste en el montaje en paralelo. Todos los módulos trabajan en las mismas condiciones de presión y de conversión. Este sistema (fig. 4.8.7.) se emplea en la mayoría de las unidades de pequeña capacidad. Mediante un filtro de cartuchos que protege a la vez a la bomba de alta presión y a las membranas, se evita la entrada de materias en suspensión. Dos manóme-

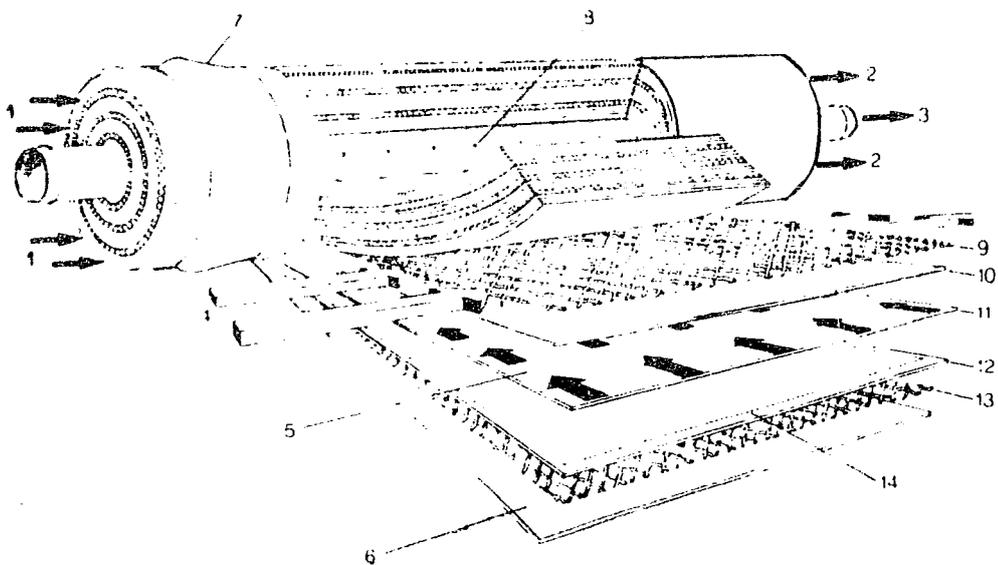


Fig. 4.8.5.- Módulo de arrollamiento en espiral.

- | | |
|--|--|
| 1.- Agua bruta. | 10.- Membrana. |
| 2.- Rechazo. | 11.- Colector de permeado. |
| 3.- Salida de permeado. | 12.- Membrana. |
| 4.- Sentido del flujo de agua bruta. | 13.- Espaciador. |
| 5.- Sentido de flujo de permeado. | 14.- Línea de soldadura de las
dós membranas. |
| 6.- Material de protección. | |
| 7.- Junta de estanquidad entre módulo
y envoltente. | |
| 8.- Perforaciones de recogida de per-
meado. | |
| 9.- Espaciador. | |

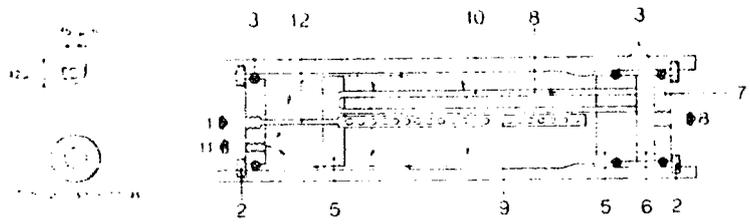


Fig. 4.8.6.- Esquema de principio de un módulo de fibras huecas.

- | | |
|-------------------------------|----------------------|
| 1.- Agua bruta. | 10.- Fibra hueca. |
| 2.- Fijación. | 11.- Rechazo. |
| 3.- juntas tóricas . | 12.- Tubo no poroso. |
| 5.- Placa epoxy. | |
| 6.- Disco poroso. | |
| 7.- Placa de cabeza. | |
| 8.- Agua pura. | |
| 9.- Tubo poroso distribuidor. | |

tros, a la entrada y a la salida de los módulos, permite controlar permanentemente la pérdida de carga en el interior del sistema. Dos caudalímetros (M), en el agua tratada y en efluente indican la conversión, la cual se ajusta por medio de dos válvulas de regulación de regulación, del tipo que aparece en la figura 4.8.7.

En muchos casos, se eligen otras configuraciones. Por ejemplo, para aumentar el grado de conversión, se utiliza una disposición de módulos en serie (fig.4.8.8.): el rechazo de la primera alimenta a los módulos de la segunda etapa. No se necesita bomba intermedia puesto que la presión disponible en el rechazo de la primera etapa difiere muy poco de la presión de alimentación de la segunda (2 a 3 bar de pérdida de carga). Un sistema de este tipo, al que generalmente se le denomina montaje en "serie-rechazo" alcanza fácilmente conversiones del 70 al 90 % (serie de dos o tres etapas) sin que aumente el coeficiente de polarización.

Para otras aplicaciones como producción de agua de elevada calidad puede utilizarse un tratamiento en dos etapas "serie producción". La producción de la primera etapa es recogida por un grupo de bombeo y tratada nuevamente. El rechazo de la segunda etapa poco concentrado se recircula a la entrada de la instalación, por lo que realiza una ligera dilución del agua de alimentación.

— **Condiciones de funcionamiento de una instalación.**— La ósmosis inversa es un proceso de concentración, por lo tanto es necesario asegurarse de que ningún de los solutos precipita en el rechazo, puesto que, de ser así podrían producirse fenómenos de incrustaciones rápidas del sistema. Ahora bien, las concentraciones en el rechazo esta directamente ligada en la conversión (Y) elegida. Si se desprecian las sales que pasan a través de la membrana, la concentración en el vertido C_r viene dada por la fórmula:

$$C_r = \frac{100 C_e}{100 - Y}$$

Así, si $Y = 75\%$, se tiene, $C_r = 4 C_e$.

Si se desea aplica conversiones superiores al 20 ó 30 %, es necesario, efectuar un pretratamiento de agua bruta. La conversión óptima sólo puede definirse mediante un análisis completo del agua bruta (cuanto mayor sea "Y" mas completo habrá de ser el pretratamiento, pero se precisará menos energía para producir un metro cubico de agua tratada).

Los pretratamientos consisten en eliminar o en secuestrar ya sea el anión o el catión del compuesto cuya precipitación ha de evitarse. se utilizará para ello uno de los siguientes procedimientos: vacunación ácida, descarbonatación, desendurecimiento a tra-

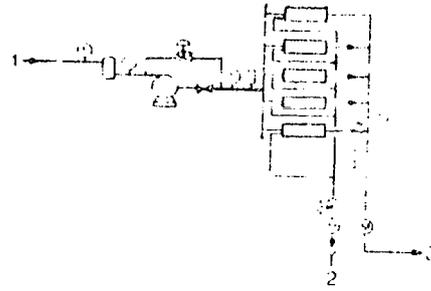


Fig. 4.8.7.- Montaje en paralelo.

- 1.- Agua bruta.
- 2.- Efluente.
- 3.- Agua producida.

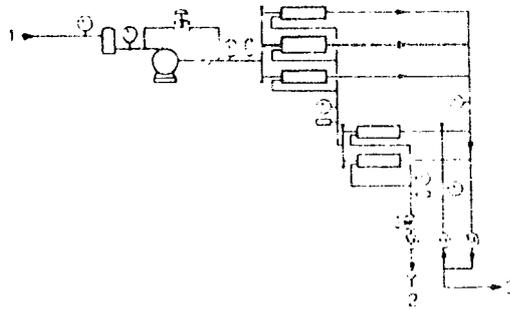


Fig. 4.8.8.- Montaje serie-rechazo.

- 1.- Agua bruta.
- 2.- Efluente.
- 3.- Agua producida.

vés de una resina, eliminación de sílice, eliminación de hierro, etc.

Todas las partículas en suspensión desechadas por la membrana de ósmosis inversa pueden acumularse en su superficie, si la conversión resulta excesiva (barrido, insuficiente de la membrana). En caso de aguas muy cargadas en coloides, es necesario efectuar tratamientos de clarificación y filtración para evitar un ensuciamiento demasiado rápido de la membrana.

De todas formas, debe preverse asimismo una limpieza periódica de las membranas, con el fin de eliminar hasta las últimas trazas de sedimentos sobre las mismas.

4.8.1.3.- Aplicación de la ósmosis inversa.

La ósmosis inversa es aplicable a todos los casos en los que se pretende una desmineralización o una concentración de iones o de moléculas orgánicas, sin embargo actualmente existen dos aplicaciones esenciales:

- a) Abastecimiento de agua potable o de aguas industriales en el que la desmineralización es el objetivo principal.
- b) Producción de agua de elevada calidad, como las aguas de calderas, aguas ultrapuras de la industria electrónica, farmacéutica, nuclear, así como la de laboratorios u hospitales.

En este caso se utilizan las propiedades de las membranas para eliminar no solo las sales disueltas, sino también las moléculas orgánicas de masa superior a 70 g/mol aproximadamente, y con mayor motivo los elementos más finos como los virus.

En casos frecuentes de tratamiento de aguas de superficie, la ósmosis inversa retiene gran número de contaminantes que escapan a la auto-depuración de los ríos y puede obtenerse con ella aguas de gran calidad completando la cadena con un intercambio de iones en lechos mezclados, que eliminan las últimas trazas de sales que hallan atravesado la membrana.

Como se ha indicado anteriormente, algunas membranas garantizan una eliminación de más del 98.5 % de los iones monovalentes, por lo tanto se obtiene un agua potable en un solo paso de desalinización, con lo cual la ósmosis inversa puede competir con los procedimientos de destilación y por otra parte las instalaciones de ósmosis son mucho más sencillas y ofrecen mayor facilidad de explotación.

La ósmosis inversa resulta interesante cuando pueden revalorizarse ciertos residuos al quedar mas concentrados:

- recuperación de metales en los aclarados de los baños de galvanización (niquelado, cobreado, latonado, cadmiado).
- recuperación de nitrato amónico de condensados de industrias productoras de abonos nitrogenados.

Evidentemente, no puede preverse una recuperación de este tipo, en los vertidos de los colectores generales de toda una fábrica, sino que el tratamiento por ósmosis inversa debe situarse a la salida del taller que produce los efluentes ricos en iones recuperables, con el fin de evitar mezclas perjudiciales para la revalorización de los productos que interesan.

La ósmosis inversa también hace posible la eliminación de las últimas trazas de productos orgánicos disueltos y de sales que subsisten después de los tratamientos clásicos (físico-químico, biológico, adsorción). Es importante que el agua se someta a un pretratamiento físico muy riguroso y viable.

4.9.- ELECTRODIALISIS .

En la electrodiálisis la fuerza impulsora es de carácter eléctrico. Membranas semipermeables, que tienen propiedades de intercambio de anión y de catión son apiladas en forma alternada en una prensa con pasillos angostos de agua entre ellas (fig 4.9.1).

Cuando se aplica una corriente directa a los electrodos colocados en cada lado de las membranas apiladas, los aniones se desplazan hacia el ánodo y los cationes hacia el cátodo. Ya que la membrana de intercambio de cationes solo permite el paso de los cationes y la membrana de intercambio de aniones el paso de aniones, la alternancia de membranas genera concentración y dilución en los compartimientos alternados del apilamiento como se muestra en la figura. La velocidad de flujo através de estos compartimientos pequeños o canales, el número de pilas empleadas y la magnitud de la fuerza impulsora o de la corriente eléctrica aplicada, determina la cantidad de sal (cationes más aniones) removidos del agua.

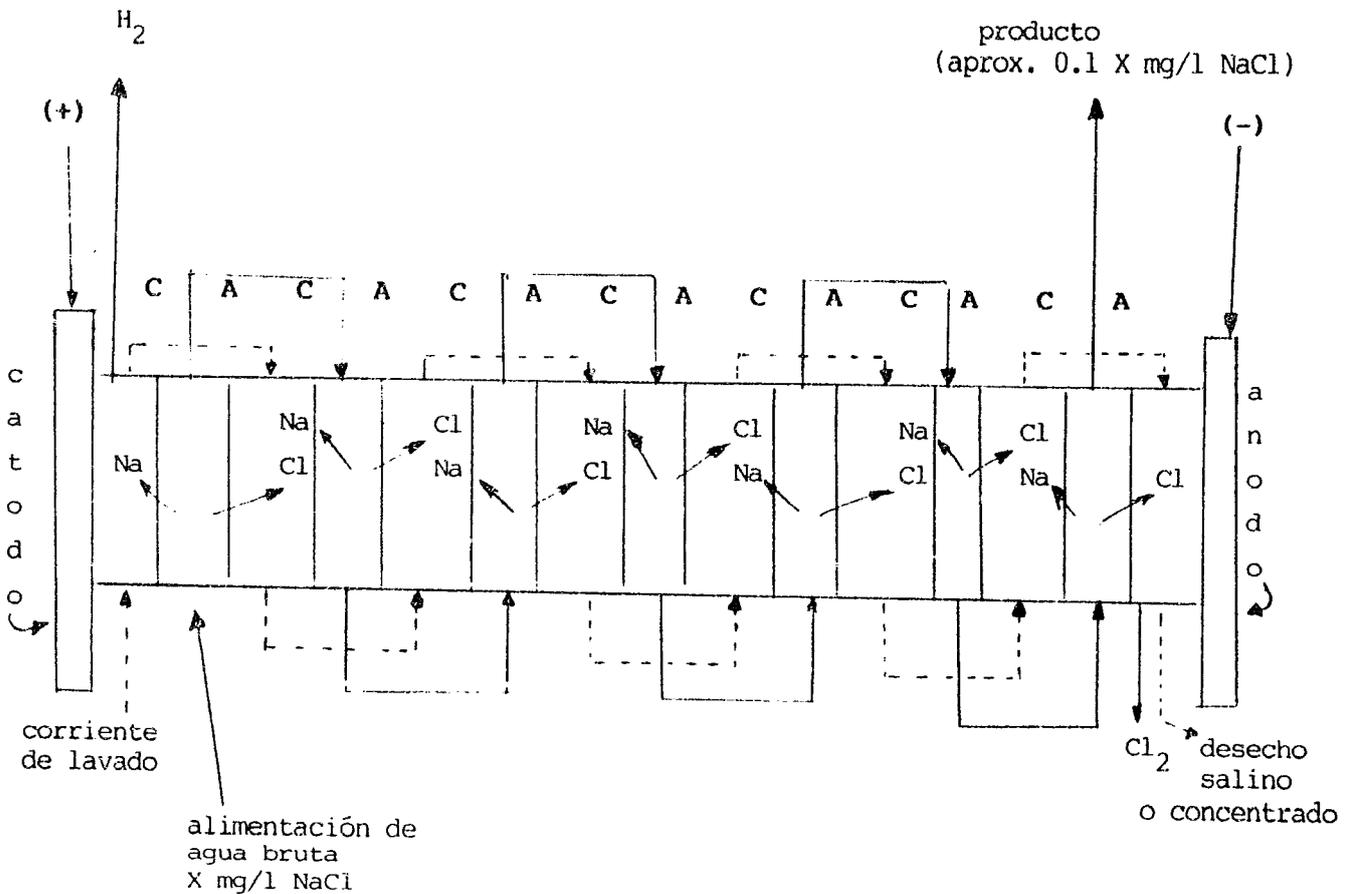
Para reducir a un mínimo los requerimientos de corriente, se hace que estos canales sean lo mas estrechos posible. A medida que la concentración de la sal disminuye en los pasillos del agua producto, disminuye su conductividad eléctrica y aumenta la energía eléctrica necesaria para remover la sal adicional. Si se aplica una corriente demasiado grande, se producira cierta electrólisis (formación de H_2 y O_2) y se reducirá la eficiencia global.

La polarización de la concentración es aun más limitante en la electrodiálisis que en cualquier otro proceso de separación por membrana. La polarización de la concentración provoca el desarrollo de un potencial de membrana que se opone al potencial aplicado. La polarización de la concentración y la separación de agua, mencionada antes, aumenta la tendencia a la formación de incrustaciones a medida que las concentraciones de calcio en los canales de salmuera exceden la solubilidad del carbonato de calcio o del sulfato de calcio, por ejemplo.

Es mas probable que se formen precipitados de carbonato de calcio o de hidróxido de magnesio en la entrecera del concentrado y la membrana de intercambio de aniones debido a que ahí se tiene un pH (iones OH) mayor. El desarrollo de incrustaciones o de depositos en la superficie de la membrana reduce la transferencia de iones y aumenta a los requerimientos de corriente.

Las mejoras en los diseños de las membranas y de los apilamientos han ayudado a reducir a un mínimo los efectos de la polarización de la concentración. Se han diseñado mé-

todos para estabilizar las tendencias a la formación de incrustaciones y para la limpieza sobre la marcha de los apilamientos con objeto de posponer la paralización. Se han diseñado celdas especiales para aplicaciones individuales al intentar un aumento en la seguridad y una reducción en los costos.



A = membrana permeable a los cationes. Permite pasar todos los cationes, pero rechaza los aniones.

B = membrana permeable a los aniones. Permite pasar todos los aniones, pero rechaza los cationes.

Fig. 4.9.1. Apilamiento de membranas selectivamente permeables ensambladas como una unidad de electrodiálisis.

4.10.- TRATAMIENTO BIOLÓGICO .

Los fenómenos biológicos tienen un interés sumamente general, especialmente bajo el aspecto del tratamiento de aguas contaminadas por materias orgánicas. En estos tratamientos se producen fermentaciones, es decir reacciones químicas causadas por ciertos microorganismos entre los cuales las bacterias desempeñan un papel importante.

Las bacterias actúan sobre la contaminación, la cual hace su alimento o sustrato.

El conjunto de las reacciones químicas se cataliza por las enzimas segregadas por las bacterias, las cuales por otra parte, les sirven de soporte. La evolución del fenómeno podrá caracterizarse siguiendo la evolución del cultivo bacteriano depurador.

Los compuestos orgánicos están formados normalmente de una combinación de carbono, hidrógeno, y oxígeno. También están presentes nitrógeno, azufre, fósforo, y hierro. Los grupos principales de compuestos orgánicos que se encuentran en las aguas residuales son tres:

Proteínas	40 - 60 %
Carbohidratos	25 - 50 %
grasas y aceites	10 %

La urea es otro compuesto orgánico importante en las aguas residuales. Este compuesto sólo se encuentra en desechos muy recientes.

Además de los compuestos indicados, las aguas residuales tienen cantidades pequeñas de moléculas orgánicas sintéticas, que varían desde estructuras simples a muy complejas como son: fenoles, detergentes, insecticidas, etc. La presencia de estas sustancias en cantidades cada vez mayores, en los últimos años ha complicado el tratamiento de las aguas residuales ya que muchas de ellas se degradan muy lentamente por medios biológicos, o simplemente no se degradan.

Las proteínas son los constituyentes principales del organismo animal. Todos los alimentos crudos, animales o vegetales contienen proteínas. Su estructura química es compleja e inestable y está sujeta a muchas formas de descomposición. Todas las proteínas contienen carbono, oxígeno, e hidrógeno. Además como característica distintiva, contiene

una proporción elevada y aproximadamente constante de nitrógeno, 16 % . En muchos casos están presentes también azufre fosforo y hierro. Las proteínas junto con la urea son las principales fuentes de nitrógeno en las aguas residuales.

Los carbohidratos, incluyen azúcares, almidones, celulosa y fibras de madera. Contienen carbono, oxígeno e hidrógeno. Algunos carbohidratos, como los azúcares, son solubles en el agua y otros como el almidón no lo son.

Las grasas y aceites, constituyen el tercer componente principal de los alimentos. El término "grasa" se aplica en una amplia variedad de sustancias orgánicas (hidrocarburos ceras, aceites minerales, etc.) que son extraídos de soluciones acuosas o suspensiones por medio de hexano (la grasa es soluble en el hexano). Los sebos y los aceites son compuestos de alcohol de ácidos grasos. Los glicéridos de los ácidos grasos que son líquidos a temperaturas ordinarias se llaman aceites y las que son sólidas, grasas.

Las grasas y aceites de las aguas residuales provienen principalmente de la manteca de cerdo, los rastros, las áreas de germinación de los cereales, de las semillas, etc.

Las grasas son compuestos sumamente estables y de difícil descomposición por las bacterias. Los ácidos minerales las atacan para formar glicerina y ácidos grasos. En presencia de alcalis (NaOH), la glicerina se libera para formar sales alcalinas de los ácidos grasos que se conocen como jabones.

Si las grasas no son removidas antes de verterlas en las aguas receptoras, pueden interferir con la actividad biológica de las aguas superficiales y crear cumulos de material flotante y formar partículas de aspecto desagradable. Algunas normas de control demandan concentraciones inferiores a 15 a 20 mg/l de grasas y aceites en aguas residuales que se descargan en aguas naturales y la ausencia de películas iridescentes de aceites.

4.10.1.- Determinación del contenido orgánico.

Los métodos de aplicación común para determinar el contenido de materia orgánica en las aguas residuales son los siguientes: demanda bioquímica de oxígeno (DBO), demanda química de oxígeno (DQO) y carbón orgánico total (COT). Recientemente se ha desarrollado otra prueba, la demanda total de oxígeno (DTO). La demanda teórica de oxígeno (DT_{teó}) complementa estas pruebas, que se determina a partir de la fórmula química de la materia orgánica.

La DBO es el parámetro de calidad del agua más ampliamente utilizado para describir la contaminación orgánica. Se aplica tanto a las aguas residuales como a las superficiales.

En definición la DBO es la cantidad de oxígeno requerido para estabilizar la materia orgánica biodegradable de un agua residual, por una población heterogénea de microorganismos, principalmente bacterias, en condiciones aeróbicas.

La prueba estándar implica la siembra con aguas residuales domésticas, agua de río o agua de descargas industriales, su incubación a 20 °C durante un período de 5 días.

Esta determinación involucra la medición de oxígeno disuelto utilizado por los microorganismos durante la oxidación biológica de la materia orgánica. La medición de la DBO es de especial significado en el tratamiento de las aguas residuales y en la administración de la calidad del agua ya que se utiliza para determinar la cantidad aproximada de oxígeno que se requiera para estabilizar biológicamente la materia orgánica presente. Los datos de DBO se utilizan para dimensionar las instalaciones de tratamiento y para medir la eficiencia de ciertos procesos. También sirve para calcular la tasa a la que se deberá de suministrar oxígeno.

4.10.1.1.- Curva de demanda de oxígeno.

Si se colocan en una incubadora a temperatura controlada un número suficiente de muestras de agua que contenga materia orgánica biodegradable, y se diluye con agua que contenga el oxígeno adecuado para mantener condiciones aerobias a lo largo del proceso de degradación; y si además, cada día se analiza un número estadísticamente significativo para determinar la disminución en el contenido de oxígeno disuelto la gráfica resultante sería parecida a la que se muestra en la figura 4.10.1. EL análisis de esta curva típica de demanda de oxígeno indica que la DBO se ejerce en dos etapas.

a) Una curva típica de reacción unimolecular durante el período en el que se observa energía de la oxidación de los carbohidratos fácilmente disponibles, y la división de proteínas y otras moléculas con liberación de amonio.

b) Una línea casi recta durante la etapa de "nitrificación", cuando el amonio se oxida a nitritos y nitratos.

Únicamente la primera de estas dos etapas se ha explorado bien tanto desde el punto de vista experimental como del matemático, debido a que :

D.B.O. en mg/l de O₂

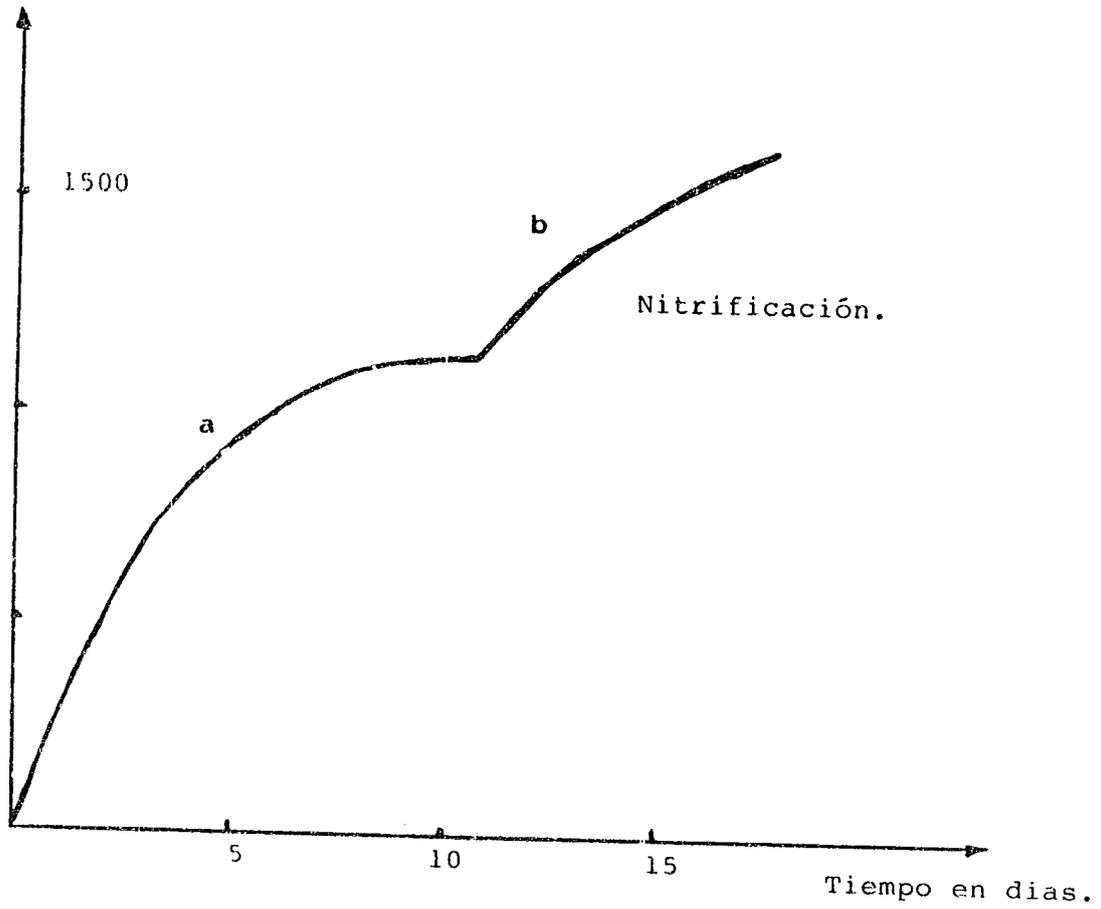


Fig. 4.10.1. Primera y segunda etapa de la D.B.O.

a) la tasa de demanda de oxígeno durante la primera etapa (10 a 20 días) es elevada, y por lo tanto crítica en las aguas receptoras.

b) La demanda de oxígeno durante la segunda etapa (3 a 6 meses) es menor que el proceso normal de reareación en la naturaleza.

4.10.2.-Demanda química de oxígeno (DQO) .

Esta prueba se usa extensamente para determinar la capacidad de polución de las aguas negras residuales municipales y sobre todo, de los desechos industriales. Se basan en el hecho de que prácticamente todos los compuestos orgánicos se oxidan para producir CO_2 y H_2O por la acción de oxidantes fuertes, bajo condiciones ácidas.

Se ha encontrado que el dicromato de potasio es el agente más efectivo en la oxidación de la materia orgánica. La solución tiene que ser altamente ácida y la prueba debe efectuarse a elevada temperatura para que la oxidación sea completa. Debe usarse condensadores de reflujo para evitar pérdida de materia orgánica volátil. Algunos compuestos orgánicos, entre ellos, el ácido acético y los ácidos grasos, se oxidan por el dicromato sólo en presencia de un catalizador (iones de plata). Los compuestos aromáticos y la piridina no se oxidan en ninguna circunstancia.

La prueba de DQO es también utilizada para medir el contenido orgánico en aguas residuales industriales que contienen compuestos tóxicos para la vida biológica. En general la DQO es mayor que la DBO, debido a que hay un número mayor de compuestos que pueden ser químicamente oxidados que los que pueden ser oxidados biológicamente. Para muchos tipos de desechos, es posible correlacionar la DQO con la DBO. Esto puede ser muy útil puesto que la DQO puede determinarse en tres horas, mientras que la DBO requiere cinco días. Una vez que se ha establecido la correlación, puede utilizarse la DQO para fines de operación y control en plantas de tratamiento.

4.10.3.- Carbón orgánico total .

Hay varios métodos para determinar el contenido de carbono orgánico en una muestra acuosa. Estas pruebas implican la oxidación de la materia orgánica a dióxido de carbono y agua, la medición es por medio de una titulación del gas generado y atrapado en una solución cáustica estandar.

Recientemente se ha desarrollado el analizador de carbono, que utiliza el concepto de la combustión de toda la materia orgánica a dióxido de carbono y el vapor generados en el tubo de combustión, se transporta por medio de una corriente de gas a través de un condensador que remueve el vapor, y el CO_2 pasa por un analizador infrarojo sensibilizado para detectar dióxido de carbono. Como la cantidad de dióxido de carbono es proporcional a la concentración inicial en la muestra, la respuesta puede compararse con una curva de calibración para determinar el carbono orgánico total. El carbono inorgánico debe removerse acidulando antes de proceder al análisis.

4.10.4.- Relación entre DBO, DQO Y COT .

Cuando se trata de programas de investigación y de control rutinario, la DBO no es una prueba muy útil debido al tiempo que toma su determinación, es importante desarrollar correlaciones entre DBO y DQO. Por ejemplo, si consideramos una sustancia completamente biodegradable como la glucosa, la DBO medirá aproximadamente el 90 % de la demanda teórica de oxígeno. La DQO medirá la demanda teórica de oxígeno, por lo tanto, tendremos:

$$(DQO) \times 0.9 = DBO$$

Para aguas residuales domésticas típicas, las relaciones DBO/DQO y DBO/COT varían de 0.4 a 0.8 y de 0.8 a 1.0 respectivamente.

4.10.5.- Lechos bacterianos .

La depuración biológica aerobia de las aguas residuales consiste en una primera fase, de provocar el desarrollo de bacterias que se reúnen en películas o floculos y que por acción física o fisicoquímica, retienen la contaminación orgánica alimentándose de ella. En una segunda fase, generalmente se separan por sedimentación los fangos producidos.

El principio de funcionamiento de un lecho bacteriano, denominado también filtro bacteriano, consiste en hacer caer el agua a tratar previamente decantada, en forma de lluvia, sobre una masa de material de gran superficie que sirve de soporte a los microorganismos depuradores, los cuales forman en la misma un fieltro o película de mayor o menor espesor. Según la naturaleza del material utilizado puede distinguirse:

- lechos bacterianos de relleno tradicional. En este caso se utiliza, como material de relleno, puzolana, coque metalúrgico, o piedras silíceas trituradas.

- lechos bacterianos con relleno plástico.

Cualquiera que sea el material, todos los lechos bacterianos funcionan según los mismos principios.

Se efectúa una aereación, generalmente por tiro natural y a veces por ventilación forzada. Esta aereación tiene por objeto aportar a la masa del lecho, el oxígeno necesario para mantener la microflora en un medio aerobio.

Las sustancias contaminantes del agua y el oxígeno del aire se difunden a través de la película biológica, hasta los microorganismos asimiladores, al mismo tiempo que se eliminan en los fluidos líquidos y gaseosos los subproductos y el gas carbónico (fig. 4.10.2).

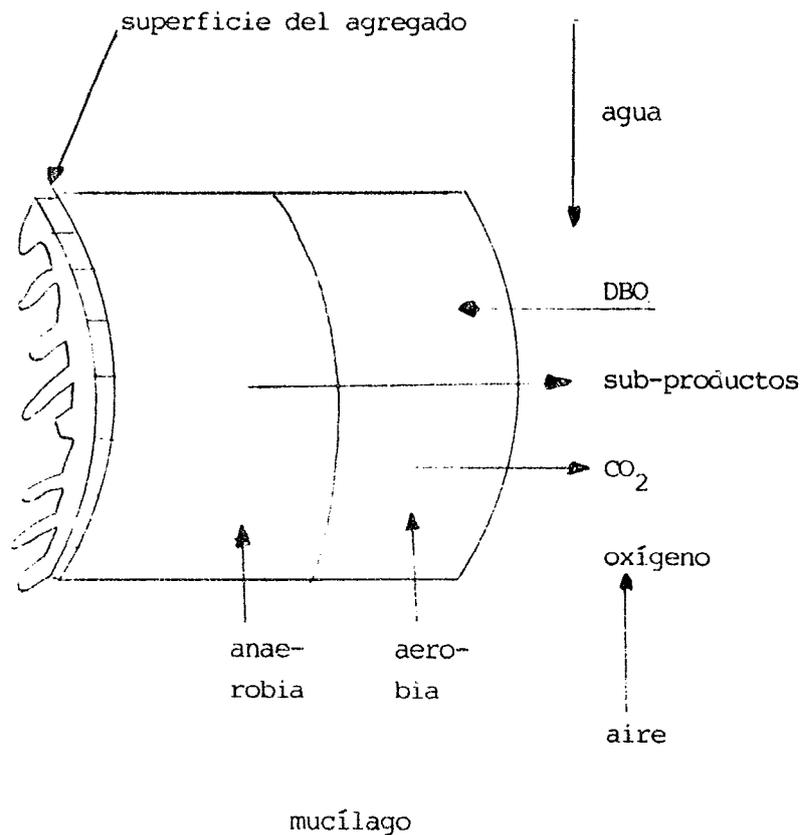


fig.- 4.10.2

Según el espesor de la película, puede desarrollarse bajo la capa aerobia una capa anaerobia.

Esta película biológica o mucílago, contiene bacterias heterótrofas, generalmente pró-

ximas a la superficie y autótrofas (bacterias nitrificantes) cerca del fondo. Se observa frecuentemente la presencia de hongos (fusarium, Oosporas, Geotricium) en las capas superiores y de algas verdes en la superficie.

La fauna predatora es generalmente abundante: protozoos y animales más evolucionados, como gusanos larvas de insectos, arácnidos, caracoles y limacos.

4.10.6.- Lechos bacterianos con relleno tradicional.

Según la carga volumica aplicada, existen lechos de pequeña y de fuerte carga, cuyas características de funcionamiento, para las aguas residuales, son las siguientes:

	pequeña	fuerte
DBO(kg/m ³)d	0.08 a 0.15	0.7 a 0.8
Carga hidráulica, m ³ /(m ³ h)	< 0.4	> 0.7

En los lechos de fuerte carga, los cuales necesitan generalmente una recirculación, la carga hidráulica es tal, que con ella se obtiene la homogeneización de la flora bacteriana en los distintos niveles.

La autolimpieza del material, sobre el cual subsiste únicamente una película activa, permite cambios rápidos y exime el lecho bacteriano de la tarea de degradar por sí mismo la materia celular formada. Este trabajo de mineralización (estabilización) se realiza en otros elementos de la instalación, como por ejemplo en un digestor anaerobio, lo que exige necesariamente el empleo de un clarificador a la salida del lecho, para recoger las materias depositadas, con el fin de enviarlas al tratamiento de fangos.

En un lecho de fuerte carga, la acción de los organismos predadores es pequeña.

En un lecho de pequeña carga, por el contrario, no hay lavado permanente del fango, el cual tiende a acumularse en el seno de la masa del lecho. La acción de los predadores es esencial y es la que con la respiración endógena de las bacterias, limita la proliferación excesiva de la película.

Los fangos de un lecho de pequeña carga, se mineralizan suficientemente y puede verterse al emisario sin clarificación final, si se admiten salidas periódicas de fangos en el efluente. Debido al peligro de atascamientos frecuentes, los lechos de pequeña

carga, poco económicos, se emplean cada vez menos, a pesar de su buen rendimiento (95%), siendo reemplazados por lechos de fuerte carga, con recirculación.

La recirculación tiene varias ventajas:

- realiza la autolimpieza del lecho bacteriano.
- siembra las aguas decantadas.
- diluye las aguas residuales de fuerte concentración en DBO.

Puede realizarse de diversas formas (fig. 4.10.3.)

El sistema de recirculación (1) es el más comúnmente empleado. Los fangos secundarios se recirculan en continuo: el caudal de recirculación se toma del fondo del clarificador y éste puede tener una superficie calculada para una velocidad ascensional correspondiente únicamente al caudal a tratar Q . Por lo contrario, el decantador primario debe calcularse para recibir $Q(1 + R)$.

En el caso de lechos bacterianos con relleno tradicional, el material está constituido por puzolana, coque metalúrgico, o simplemente piedras silíceas trituradas. Debe ser limpio y no friable. Su granulometría debe ser regular y estar comprendida entre 40 y 80 mm.

Cualesquiera que sea el material tradicional que se emplee, los riesgos de atascamiento por materias gruesas en suspensión en el agua bruta exige la construcción de un decantador primario aguas arriba del lecho.

4.10.7.- lechos bacterianos con relleno de material plástico.

Durante mucho tiempo, la depuración biológica de las aguas residuales que presentan una fuerte DBO, por ejemplo de las industrias agro-alimentarias se han realizado por procedimientos de fangos activados. Los lechos bacterianos con relleno tradicional apenas se empleaban, por los riesgos de atascamiento debido a proliferaciones excesivas de películas biológicas filamentosas. Sin embargo los lechos bacterianos presentan cierto número de ventajas con relación a los fangos activados a media y fuerte carga, entre las cuales puede citarse:

- menor sensibilidad a las variaciones bruscas de carga.
- mayor facilidad de explotación.
- notable economía de energía, suministrándose generalmente el aire por tiro natural a través del lecho.

Teniendo en cuenta estas ventajas en las cuales se reduzcan riesgos de obstrucciones,

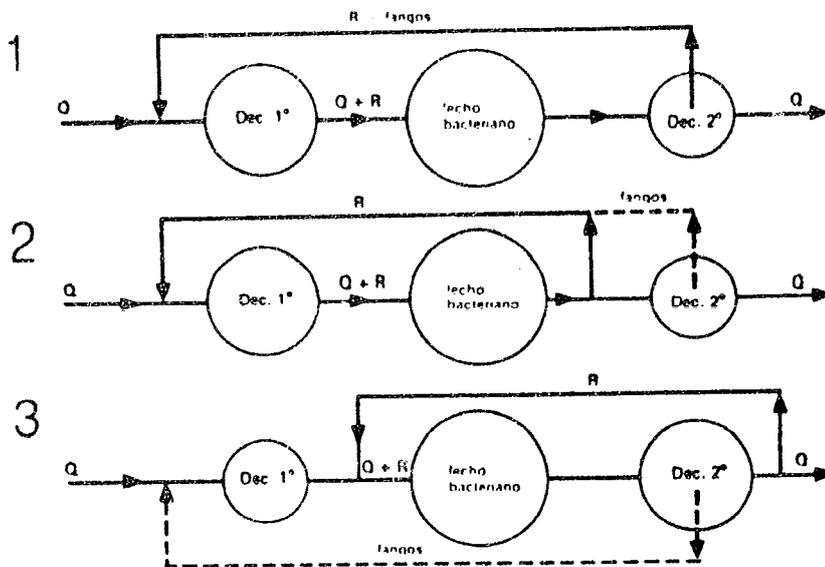
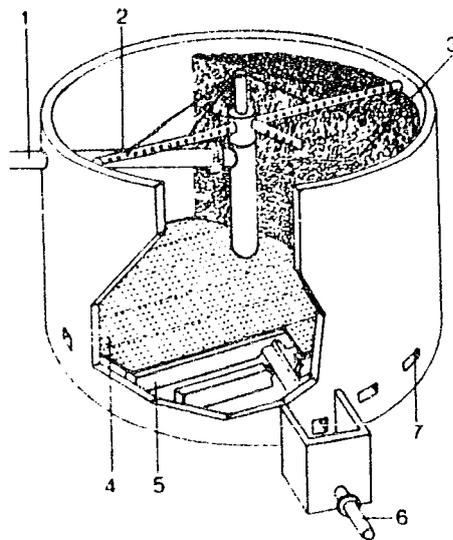


Fig. 4.10.3.



- 1.- Llegada de agua a tratar.
- 2.- Distribuidor rotatorio.
- 3.- Material.
- 4.- Placa perforada.
- 5.- Soporte de las placas.
- 6.- Salida de agua tratada.
- 7.- Alimentación de aire.

Fig. 4.10.4.- Sección de un lecho bacteriano.

aparecieron en los años 60, los lechos con relleno de material plástico.

Los lechos con relleno de material plástico suelen ser:

- poco sensibles al atascamiento, pueden trabajar a cargas volúmicas elevadas comprendidas entre 1 y 5 kg de DBO_5/m^3 de material por día.
- el precio de coste del material es más elevado que el de los rellenos tradicionales, por lo que tratara de conseguirse el valor óptimo de la relación:

DBO eliminada diariamente

volumen de relleno

Por estas dos razones, los lechos bacterianos con relleno de material plástico se utilizan generalmente, a fuerte carga. En estas condiciones el rendimiento de eliminación de la DBO_5 no es suficiente para producir un efluente conforme a las normas habitualmente en vigor, puesto que oscila entre 30 y 70 %, según el tipo de agua tratada carga volúmica adoptada. En caso de necesidad, después del lecho bacteriano con relleno de material plástico se prevé una etapa de depuración tradicional, generalmente por fangos activados.

Teniendo en cuenta que los lechos de relleno plástico se utilizan generalmente para tratar vertidos concentrados, siempre es necesario prever la recirculación de una parte del caudal a la entrada del lecho con el fin de mantener una carga hidráulica mínima por debajo de la cual existiría el riesgo de que no se consiguiera la auto-limpieza necesaria. Según el tipo de materia utilizado, esta carga hidráulica se encuentra comprendida entre 1.5 y 3 $m^3/(m^2h)$. Contrariamente a lo que se ha comprobado en el caso de los lechos con relleno tradicional, la recirculación no mejora aquí el rendimiento de eliminación de la DBO_5 .

Esta recirculación puede efectuarse, directamente partiendo de la base del lecho bacteriano, o partiendo de la salida del clarificador dispuesto a continuación. La primera solución es más ventajosa, puesto que con ella se evita el tener que dimensionar del clarificador en función del caudal nominal aumentado en el caudal de recirculación. La recirculación a través del lecho, de una parte de los fangos en exceso que produce el mismo no entraña una baja de rendimiento ni problema especial de atascamiento alguno.

Los lechos bacterianos con relleno de material plástico se utilizan frecuentemente sin decantador primario. Debido a que producen una cierta floculación de las materias solubles contenidas en el agua bruta, puede depositarse una importante cantidad de fangos en el decantador intermedio. De este decantador se extraen los fangos en exceso, muy fermentables y no mineralizados, producidos cíclicamente por el lecho bacteriano,

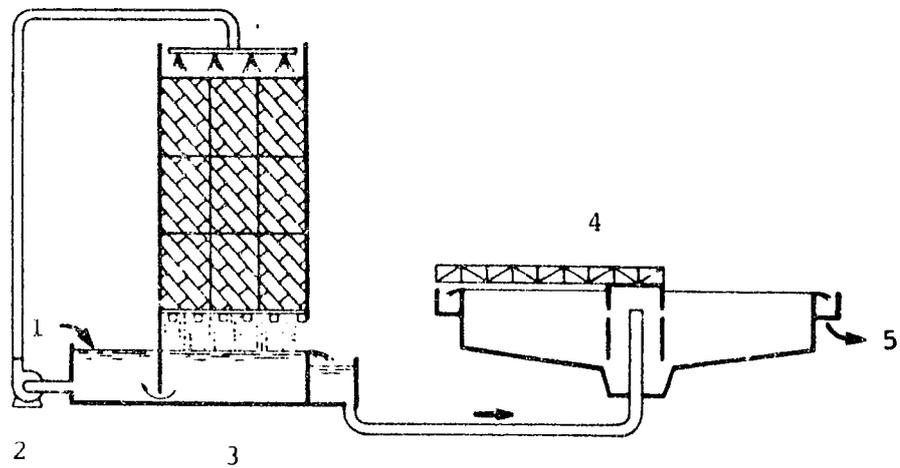


Fig. 4.10.5.-Lecho bacteriano(con recirculación) y decantador.

- 1.- Llegada de agua bruta.
- 2.- Bomba.
- 3.- Lecho bacteriano.
- 4.- Decantador.
- 5.- Agua tratada.

lo que evita que aumente la demanda de oxígeno en la etapa subsiguiente de tratamiento por fangos activados.

Los materiales plásticos se caracterizan por una superficie elevada que oscila generalmente entre 90 y 300 m²/m³, y por un porcentaje de vacío importante del orden del 95 %. se distinguen dos categorías : rellenos a "granel" y rellenos "ordenados".

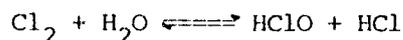
Los rellenos "a granel" parecen ser más sensibles al atascamiento que los materiales del tipo "ordenado" y su empleo generalmente se limita a aguas poco contaminadas y exentas de materias en suspensión.

4 . 1 1 . - O X I D A C I O N D E S I N F E C C I O N .

4.11.1.- Acción del cloro .

El cloro es el reactivo mas utilizado para la desinfección del agua. Posee un poder oxidante remanente muy elevado que favorece la destrucción de las materias orgánicas. Su acción bactericida puede explicarse por la destrucción de las enzimas indispensables para la vida de los agentes patógenos.

El cloro disuelto en el agua reacciona con su disolvente según la reacción :



que va acompañado con la reacción secundaria:



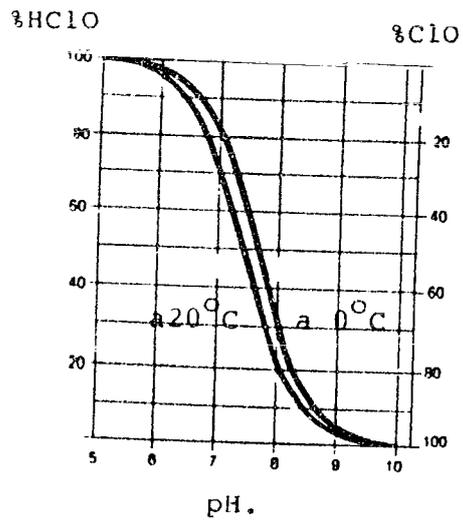
El sentido de desplazamiento de estas reacciones de equilibrio depende del pH del medio. Si el pH es inferior a 2, todo el cloro se encuentra en forma moléculas. A pH 5, el cloro moléculas ha desaparecido totalmente encontrándose de nuevo en forma de ácido hipocloroso (HClO). A pH 10, el cloro se encuentra combinado en forma de iones hipoclorito (ClO^-).

Si el pH está comprendido entre 5 y 10, lo que generalmente sucede en aguas tratadas con cloro, se tiene una mezcla de ácido hipocloroso y de iones hipoclorito en proporción variable con el pH con forme a la curva de la figura 4.11.1.

El cloro es más eficaz en medio ácido que en medio alcalino puesto que su efecto bactericida es mayor que cuando se encuentra en forma HClO. Su acción aumenta con el tiempo de contacto entre el agua y el reactivo, un tiempo de contacto pequeño puede compensarse con el empleo de una dosis mayor de reactivo.

En el campo de tratamiento de agua, el cloro y sus derivados se utilizan principalmente para la precloración, la desinfección de aguas destinada al consumo, el tratamiento anti-algas y antimoluscos de las aguas de circuitos de refrigeración y el tratamiento de afino de aguas residuales .

Si se introducen en el agua dosis crecientes de cloro y se determina al cabo de una hora, el cloro total residual, se observa que a veces este valor, en lugar de aumentar



pH.
Fig.- 4.11.1.

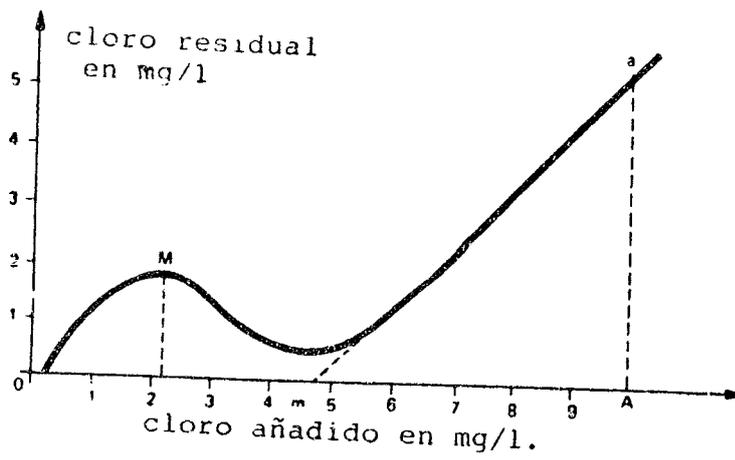


Fig. 4.11.2.

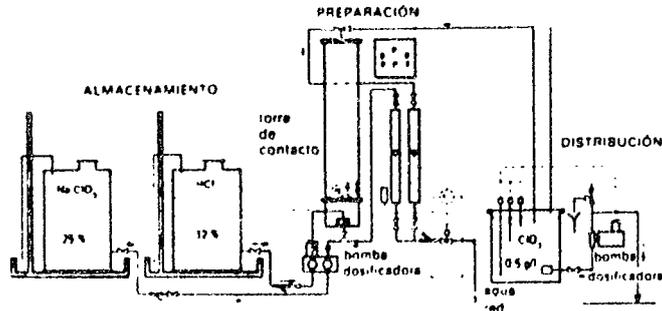


Fig.-4.11.3.- Preparación de dióxido de cloro a partir de ácido clorhídrico.

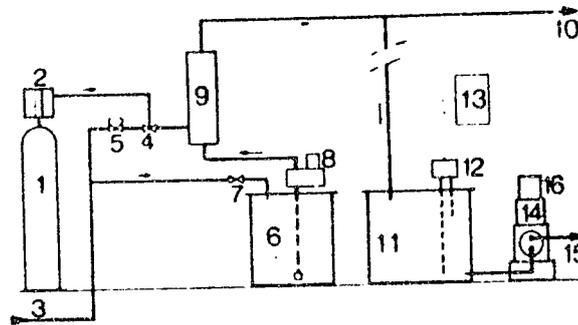


Fig. 4.11.4.- Preparación de dióxido de cloro a partir de cloro.

- | | |
|-----------------------------|---------------------------------------|
| 1.- Botella de cloro | 12.- Detección de nivel. |
| 2.- Clorómetro. | 13.- Armario eléctrico de ac- |
| 3.- Agua de servicio. | cionamiento del clorómetro |
| 4.- Eyector. | y de la bomba dosificadora 8. |
| 5.- Electroválvula. | 14.- Bomba de recogida de solución. |
| 6.- Cube de preparavción | 15.- Distribución a caudal constante. |
| de clorito. | 16.- Mando sincopado o de velocidad |
| 7.- Agua de dilución. | variable de la bomba. |
| 8.- Bomba dosificadora. | |
| 9.- Cámara de reacción. | |
| 10.- Distribución a caudal | |
| constante | |
| 11.- Cuba de almacenamiento | |
| de solución. | |

de forma regular pasa por un máximo, después decrece pasando por un mínimo y crece por último regularmente, según la curva de la figura 4.11.2.

Esto se debe a que el cloro, en una primera fase se combina con las materias orgánicas del agua y con el amoníaco libre o combinado en forma de aminas, formando compuestos clorados (cloraminas), los cuales en una segunda fase se eliminan mediante un aumento de la dosis de cloro. El punto crítico o "break point" es la dosis de cloro correspondiente al mínimo "m" de la curva para la cual sólo queda en el agua cloro libre y trazas de cloraminas.

Como la causa de sabores desagradables son, sobre todo, los compuestos de adición clorados el punto crítico es la dosis de cloro para la cual es menor el sabor y mas completa la eliminación de color.

Debe observarse, sin embargo que algunas aguas no presentan punto crítico.

Cuando se utilizan derivados del cloro, como por ejemplo las cloraminas, son antisépticos muy estables, cuya acción es menos rápida que la del cloro, pero que subsisten en el agua durante un tiempo mayor.

Se preparan generalmente a partir de cloro y amoníaco (dosis de amoníaco a comprendida entre 1/4 y 1/2 de la dosis de cloro) o sales amoniacaes, se utiliza poco actualmente.

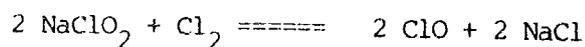
El dióxido de cloro es un gas amarillento de olor penetrante, muy oxidante, de gran poder decolorante y desodorizante. Su acción sobre los elementos patógenos, es por lo menos igual a la del cloro. Debe utilizarse con preferencia al cloro, cuando el agua a tratar tiene trazas de fenoles que pueden combinarse con el cloro y comunicar al agua un sabor desagradable a clorofenol. Oxida rápidamente las sales de hierro, que transforma en hidrato férrico insoluble. De igual forma utilizado en exceso en dosis variables con el pH del agua precipita las sales de manganeso en forma de dióxido de manganeso. Por lo tanto, utilizado en precloración, permite la eliminación de estos metales.

El dióxido de cloro siempre se produce "in situ" por reacción en solución del cloro o del ácido clorhídrico, sobre el clorito sódico. La reacción de producción es compleja pudiendose resumirse globalmente como sigue:



ver fig. 4.11.3

y la reacción de la preparación a partir de cloro la reacción se describe así:



ver fig. 4.11.4.

Las soluciones de hipoclorito sódico, comúnmente denominado agua de Javel (o lejía) se caracterizan por su contenido en cloro activo, que se valua en grados clorométricos (Gay-Lussac). Es la cantidad de cloro libre en litros, en las condiciones normales (0 °C, 760 mm de mercurio) que tiene el mismo poder oxidante de 1 kg de producto:

$$1 \text{ grado clorométrico} = 3.17 \text{ g de Cl}_2 \text{ por kg.}$$

La solución de hipoclorito de sódico se añade al agua a tratar en forma comercial concentrada o en caso de caudales muy pequeños en forma diluida.

En este caso la cantidad de hipoclorito sódico precipita la dureza del agua de dilución en los depósitos de preparación como consecuencia de ello, pueden producirse incrustaciones en las tuberías y en los dosificadores.

Esto se evita preparando la solución 24 h antes de su empleo, para que los precipitados formados tengan tiempo suficiente para sedimentar o introduciendo en el depósito unos 50 g de hexametáfosfato sódico por cada 100 l de agua. En caso de aguas muy duras, puede ser necesario un desendurecimiento previo.

4.11.2.- Oxidación y desinfección por ozono .

El ozono es una variedad alotrópica del oxígeno, de fórmula O_3 . Es un gas de color azul, cuyas principales características físicas son:

- masa molar: 48 g/mol.
- densidad con relación al aire: 1.657.
- masa volúmica a 0 °C y a 760 mm de Hg: 2.143 kg/m³.
- calor de formación de un mol en volumen constante: 143 kJ (34.2 kcal)

El ozono es un gas inestable que se obtiene por la acción ionizante, sobre el oxígeno, de un campo eléctrico creado por un potencial elevado el fenómeno se manifiesta por la aparición de un efluvio violeta.

En la práctica el ozono se obtiene industrialmente haciendo pasar una corriente de aire, o de oxígeno entre dos electrodos sometidos a una diferencia de potencial alterna. Con el fin de evitar la formación de un arco eléctrico se recubre uno de los electrodos o a veces los dos con un dieléctrico de espesor uniforme, que crea una superficie equipotencial. En la práctica la diferencia de potencial a la que se someten los electrodos es entre 10000 y 20000 v.

Para una diferencia de potencial dada, la producción de ozono depende esencialmente de la forma geométrica de los elementos del aparato productor de ozono, de las carac-

terísticas dieléctricas del aislante, de la frecuencia de la corriente de alimentación, del grado de sequedad del aire, de la presión y de la concentración deseada de ozono en el aire o en el oxígeno. Depende así mismo de la temperatura del agua de refrigeración del aparato de producción.

Existen, actualmente dos tipos de ozonizadores, como son los ozonizadores de placas y los ozonizadores tubulares.

Los **ozonizadores de placas** están constituidos por dieléctricos y electrodos metálicos metálicos planos el conjunto se instala generalmente en un recinto estanco, provisto de un sistema de refrigeración.

El **ozonizador tubular** está constituido por dos electrodos concéntricos y un tubo dieléctrico.

Los **ozonizadores tubulares** se diferencian por la posición vertical u horizontal de los electrodos, así como la posición del dieléctrico con relación al agua de refrigeración.

Los **ozonizadores tubulares verticales** se componen generalmente, de elementos constituidos por dos tubos concéntricos: en el interior, un cilindro metálico hueco, en el exterior, un dieléctrico tubular cerrado en su extremo inferior. El electrodo metálico por el cual se lleva el gas a ionizar, va conectado a la borna de alta tensión, de un transformador. El tubo dieléctrico se sumerge directamente en el agua de refrigeración, la cual puesta al potencial de tierra constituye el segundo electrodo. La formación de ozono tiene lugar en el espacio anular existente entre el exterior del electrodo metálico y en el interior del tubo dieléctrico.

En los **ozonizadores tubulares horizontales** cada elemento comprende un tubo de acero inoxidable, sumergido en el agua de refrigeración y puesto a tierra, el otro electrodo está constituido por un revestimiento metálico, aplicado en el interior de un tubo dieléctrico cerrado en un extremo. Este electrodo va conectado a la borna de alta tensión de un transformador. La disposición es por tanto, inversa con relación a la de los aparatos verticales, ya que una de las caras del dieléctrico en lugar de estar conectadas a tierra está sometida a una alta tensión. La formación del ozono tiene lugar en el espacio anular dispuesto entre el exterior del tubo dieléctrico y el interior del tubo metálico que constituye el electrodo de masa.

El centrado de los tubos dieléctricos en sus tubos metálicos se efectúa por resortes de acero inoxidable. No existen juntas por lo que el dieléctrico no está sometido a esfuerzo mecánico alguno debido a variaciones de temperatura.

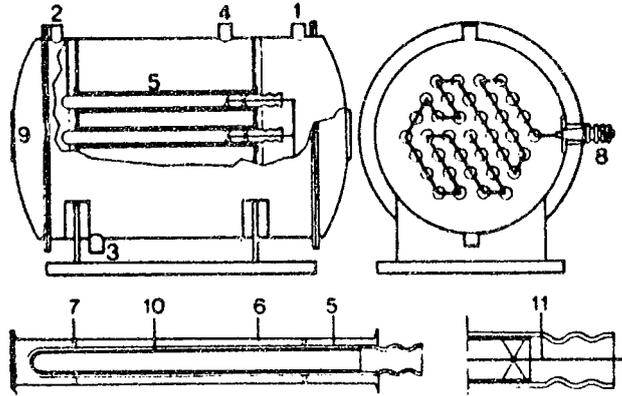


Fig. 4.11.5.- Ozonizador tubular horizontal.

- | | |
|---------------------------------------|-----------------------------|
| 1.- Entrada de aire. | 9.- Mirilla. |
| 2.- Salida de aire ozonizado. | 10.- Metalización. |
| 3.- Entrada de agua de refrigeración. | 11.- Escobilla de contacto. |
| 4.- Salida de agua de refrigeración. | |
| 5.- Tubo dieléctrico. | |
| 6.- Zona de efluvio. | |
| 7.- Soporte de tubo. | |
| 8.- Borna de alta tensión. | |

Los aparatos funcionan indistintamente con ligero vacío o a presión, y la producción específica varía poco con la presión, en tanto que permanescan pequeñas las concentraciones de ozono.

Los ozonizadores pueden alimentarse con aire o con oxígeno, la elección depende de la aplicación considerada y la posibilidad de disponer de oxígeno puro.

En un ozonizador determinado, y a igualdad de potencia aplicada, se obtiene aproximadamente dos veces más ozono partiendo de oxígeno que partiendo de aire. Por lo tanto con oxígeno, se reduce notablemente el costo de los equipos y el consumo eléctrico, sin embargo, en la mayoría de los casos, el ozono se prepara a partir de aire.

El aire de alimentación de los ozonizadores debe acondicionarse y secarse adecuadamente, por varias razones:

- el polvo contenido en el aire contribuye, por transporte de cargas eléctricas, a la formación de arcos eléctricos perjudiciales para la producción de ozono, que consumen energía y que van en contra de la buena conservación de los materiales.
- el vapor de agua contenido favorece igualmente la formación de arcos eléctricos por la reducción de la rigidez dieléctrica del medio gaseoso. Además, una parte de la energía se consume para ionizar el vapor de agua, lo que produce una degradación del rendimiento de producción de ozono. Por último, los óxidos de nitrógeno producidos por la descarga en el aire dan lugar, en presencia de agua, a derivados nitrados, que obstruyen los aparatos, perjudican a la producción y son indeseables en el agua potable.

La desecación del aire comprimido puede ser en una o dos fases. La desecación en una fase por secadores "sin calor", el aire comprimido previamente refrigerado en un intercambiador de circulación de agua, se envía a un secador que contiene un material absorbente, tal como la alúmina activada, este aparato tiene dos capacidades de secado una, una de las cuales se emplea por la regeneración y la otra por el secado de aire.

Para la regeneración de un secado "sin calor" no se necesita aportación exterior de calorías. Como la absorción es un fenómeno exotérmico, se utilizan las calorías disponibles en el aire seco para garantizar la desorción del agua fijada en la columna durante la regeneración, la cantidad de aire seco consumida por la regeneración es igual al 12 a 25 % del caudal total que entra en el secador, esta cantidad varía con el tamaño del aparato y la presión de alimentación.

La desecación en dos fases a baja presión se utiliza preferentemente en grandes instalaciones. En este caso, el aire pasa en primer lugar a un aparato refrigerante en el que se condensa una gran parte de vapor de agua que contiene (1ra fase).

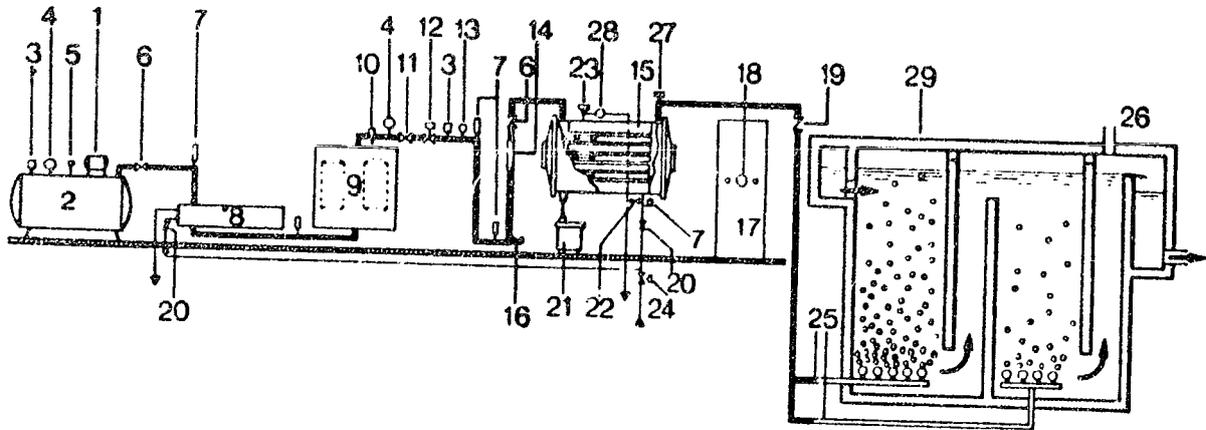


Fig. 4.11.6.- Desinfección por ozono. Funcionamiento a fuerte presión. Deseccación en una fase.

- | | |
|------------------------------------|-------------------------------------|
| 1.- grupo compresor. | 17.- Armario eléctrico. |
| 2.- Balón de aire. | 18.- Conmutador de tensión. |
| 3.- Válvula. | 19.- Válvula. |
| 4.- Manómetro. | 20.- Válvula de regulación de agua. |
| 5.- Monostato. | 21.- Transformador. |
| 6.- Válvula de regulación de aire. | 22.- Válvula de vaciado. |
| 7.- Termómetro. | 23.- Termómetro termostato. |
| 8.- Cambiador refrigerador. | 24.- Válvula automática. |
| 9.- Secador automático. | 25.- Alimentación de los difusores. |
| 10.- Expansionador. | 26.- Puesta a la atmósfera. |
| 11.- Válvula de parada. | 27.- Toma de aire ozonizado. |
| 12.- Electroválvula. | 28.- Controlador del caudal. |
| 13.- Higrometro. | 29.- Cámaras de contacto. |
| 14.- Caudalimetro de aire. | |
| 15.- Ozonizador. | |
| 16 Toma de muestra de aire. | |

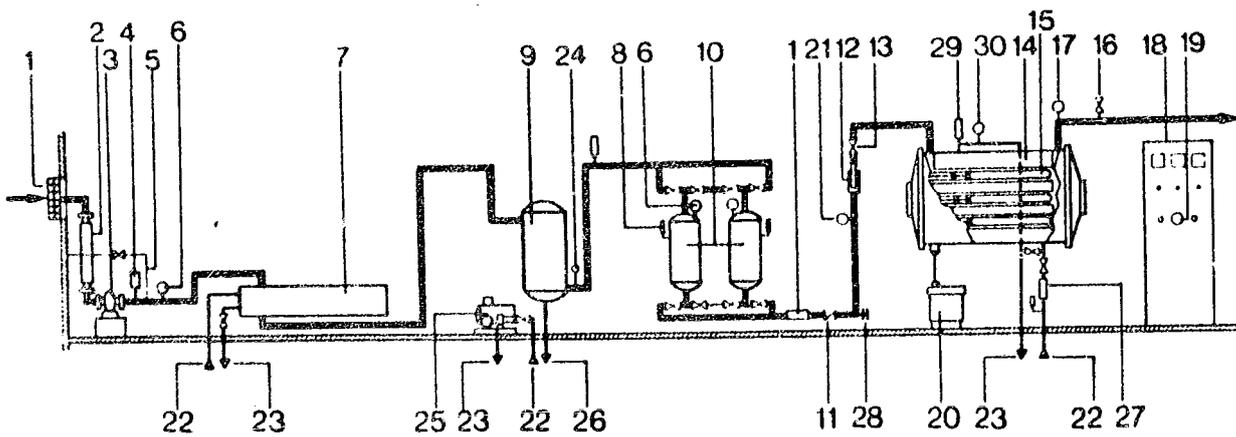


Fig. 4.11.7.- Desinfección por ozono. Funcionamiento a baja presión. Deseccación en dos fases.

- | | |
|---|---|
| 1.- Filtro de aire. | 23.- Evacuación del agua de refrigeración. |
| 2.- Silenciador. | 24.- Termostato. |
| 3.- Compresor. | 25.- Compresor de fluido frigorífico. |
| 4.- Válvula de descarga. | 26.- Salida de agua de condensación. |
| 5.- Tubería de fuga de aire. | 27.- Caudalímetro de agua de refrigeración. |
| 6.- Manómetro. | 28.- Toma de muestra de aire seco. |
| 7.- Cambiador refrigerador. | 29.- Termómetro-Termostato. |
| 8.- Termómetro. | 30.- Controlador de caudal. |
| 9.- Grupo frigorífico. | |
| 10.- Deseccadores con producto adsorbente. | |
| 11.- Válvula. | |
| 12.- Caudalímetro de aire con contacto eléctrico. | |
| 13.- Válvula de regulación. | |
| 14.- Ozonizador. | |
| 15.- Tubos generadores de ozono. | |
| 16.- Toma de muestra de aire ozonizado. | |
| 17.- Monostato. | |
| 18.- Armario eléctrico. | |
| 19.- Conmutador de tensión. | |
| 20.- Transformador elevador de tensión. | |
| 21.- Higrómetro. | |
| 22.- Alimentación de agua de refrigeración. | |

El aire sale del aparato refrigerante a una temperatura comprendida entre 2 y 5 grados centígrados, encontrándose próximo a la saturación, seguidamente atraviesa un secador que como en el caso anterior, contiene un material absorbente, tal como la alumina activada (2da fase). Este secador que comprende igualmente dos capacidades de secado, trabaja a baja presión. Su material absorbente se regenera por paso de aire caliente.

En tratamiento de aguas residuales industriales pueden disponerse en serie varias unidades de puesta en contacto realizando en caso necesario, un sistema a contracorriente para utilizar al máximo el ozono residual.

En el tratamiento de agua residual (industrial o urbana), si el agua a tratar contiene materias floculadas, y se desea realizar una desinfección, es conveniente utilizar un sistema de puesta en contacto por turbina ya que, las burbujas producidas por un sistema de difusores porosos no pueden crear una turbulencia suficiente para disgregar las materias aglomeradas y permitir al ozono una oxidación completa de las bacterias y virus. Las dosis de tratamiento pueden aumentarse hasta 10-20 g/m³. En el caso de vertidos muy contaminados, siempre es indispensable efectuar un ensayo previo en laboratorio.

Cuando se dispone de una carga hidráulica mínima de dos metros de columna de agua, puede utilizarse un inyector recorrido por la totalidad del caudal a tratar, que aspire el aire ozonizado y alimente por el fondo la columna de contacto (fig. 4.11.11.). Con este dispositivo no se alcanzan altos rendimientos de disolución.

El contacto por difusores porosos, en la base de la torre de contacto, se disponen unos difusores porosos con los que se obtiene una división de aire ozonizado en burbujas muy finas. El agua a tratar se introduce en la torre por su parte superior (fig.4.11.8) obteniéndose así un contacto íntimo a contracorriente de los dos fluidos. Pueden construirse torres de contacto de varios compartimientos, con inyecciones parciales de aire ozonizado efectuadas preferentemente, a contracorriente. Los difusores porosos son del tipo tubular o de disco.

En el contacto por turbina, el agua a tratar se introduce en la zona de aspiración de una turbina que la impulsa hacia abajo al encuentro de un flujo de aire ozonizado inyectado por debajo de la misma. Una emulsión muy fina (aire ozonizado-agua) se difunde en la totalidad de la parte anterior a la torre de contacto y es recogida por la turbina, cuyo caudal de recirculación representa varias veces el caudal de agua a tratar fig. 4.11.12.

Una turbina provoca el cizallamiento de las burbujas de aire ozonizado, garantizando

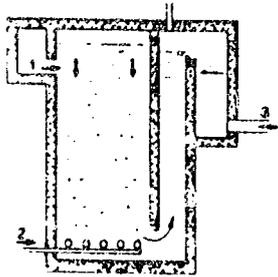


Fig. 4.11.8.- Torre de contacto
(cámara única).

- 1.- Entrada de agua.
- 2.- Llegada de aire ozonizado.
- 3.- Salida de agua ozonizada.

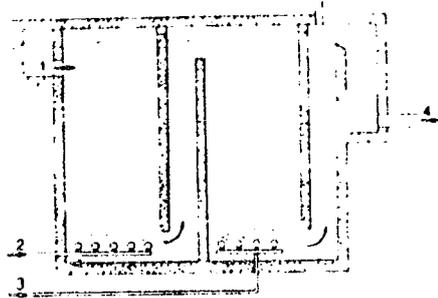


Fig. 4.11.9.- Torre de contacto
con 2 compartimentos.

- 1.- Entrada de agua.
- 2-3.- Llegada de aire ozonizado.
- 4.- Salida de agua ozonizada.

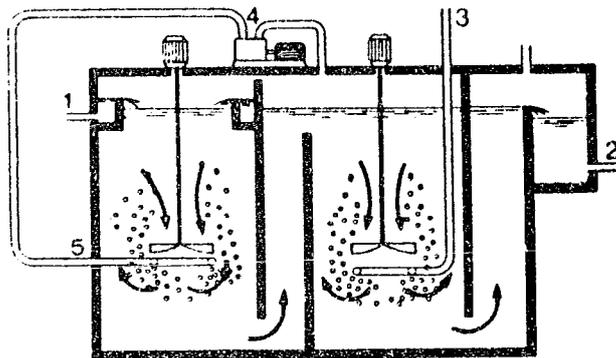


Fig. 4.11.10.- Torres de contacto en serie, con recirculación
del aire ozonizado residual.

- 1.- Entrada de agua.
- 2.- Salida de agua ozonizada.
- 3.- Entrada de aire ozonizado recuperado.
- 4.- Compresor de aire recuperado.
- 5.- Entrada de aire ozonizado recirculado.

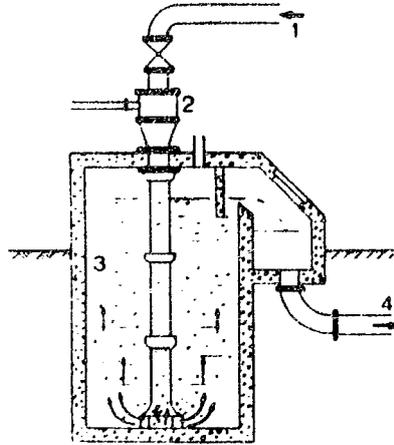


Fig. 4.11.11.- Esquema de principio con inyector de aire.

- 1.- Llegada de agua a desinfectar.
- 2.- Inyector de mezcla de aire ozonizado.
- 3.- Torre de contacto.
- 4.- Salida de agua desinfectada.

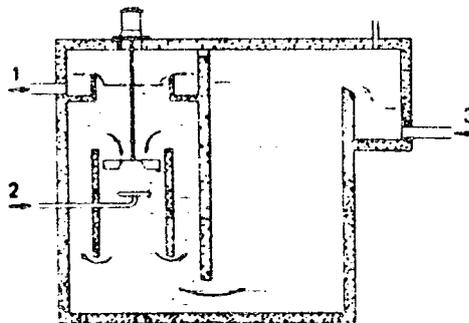


Fig. 4.11.12.- Torre de contacto con turbina.

- 1.- Llegada de agua.
- 2.- Llegada de aire ozonizado.
- 3.- Salida de agua ozonizada.

así una buena difusión de la mezcla gaseosa en la masa líquida.

Después de haber estado en contacto con el agua a tratar, el aire que sale de la torre de contacto, conviene evitar que salga demasiado rico en ozono, generalmente se elimina de forma sistemática el ozono en exceso por método térmico, químico o catalítico.

4.11.3 .- Desinfección por rayos ultravioleta.

Los rayos ultravioleta se producen por lámparas de vapor de mercurio a muy baja presión, cuya potencia puede alcanzar 200 vatios y cuya duración media de vida es de 2000 a 4000 horas. Las longitudes de onda están comprendidas entre 200 y 300 nm (2000 y 3000 angstroms) correspondiendo la máxima acción microbicida a unos 250 nm.

El agua a tratar debe circular por las proximidades de la lámpara, en una corriente de menor espesor posible, ya que los rayos ultravioletas son absorbidos rápidamente por el agua, la cual deberá ser completamente clara.

Una lámpara de 36 vatios puede desinfectar $3 \text{ m}^3/\text{h}$ con un espesor de lámina de agua de 15 a 20 cm. En la práctica, para que la desinfección sea lo suficientemente rápida se calcula que el consumo de energía debe ser de $40 \text{ Wh}/\text{m}^3$.

El agua a tratar está generalmente a presión: se le hace pasar por el interior de un tubo en cuyo centro se encuentra otro tubo de cuarzo que envuelve la lámpara emisora. De esta forma, el agua que debe desinfectarse se encuentra expuesta a las radiaciones germicidas en las condiciones indicadas de paso en lámina delgada.

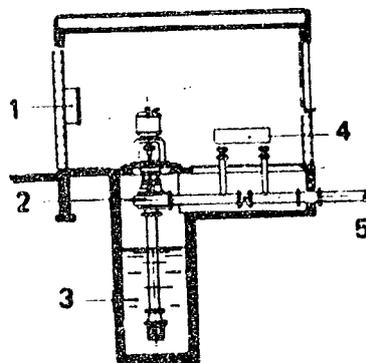


Fig.4.11.13.- Desinfección por rayos ultravioleta.

- 1.- Armario eléctrico.
- 2.- Bomba.
- 3.- Pozo.
- 4.- Esterilizador..
- 5.- Hacia distribución.

4. 12 .- A D S O R C I O N .

La adsorción define la propiedad de ciertos materiales de fijar en su superficie moléculas extraídas de la fase líquida o gaseosa en la que se encuentran sumergidos. Se trata por tanto, de una **transferencia de masa** de la fase líquida o gaseosa hacia la superficie sólida en la que un compuesto orgánico tienda a unirse con una energía de ligazón.

Como todos los demás problemas de transferencia de masa, la capacidad de adsorción de un adsorbente frente a un cuerpo determinado depende de:

- de la superficie desarrollada del material, los adsorbentes naturales (arcillas zeolitas) tienen pequeñas superficies, 50 a 200 m²/g, por lo que su capacidad es pequeña, si bien desempeña un importante papel en el medio natural. Los adsorbentes industriales tienen una superficie mínima de 300 m²/g y los carbones activos de buena calidad llegan hasta de 1000 a 1500 m²/g.
- de la concentración de la sustancia orgánica en solución: en el límite, se establece un equilibrio entre la concentración de la solución y la masa de contaminante adsorbida por unidad de superficie (o de masa) del adsorbente.
- de las características hidrodinámicas del intercambio, de la velocidad relativa de las dos fases, y en especial del tiempo de contacto de las fases sólida y líquida.
- de la energía de ligazón, es decir, de la afinidad de superficie por la sustancia orgánica considerada, y por la tanto, de la naturaleza de los productos que han de adsorberse, esta afinidad es función del pH, en que la mayoría de los casos, un pH ácido facilita la adsorción sobre carbón activo.

Como se ha indicado anteriormente, la superficie específica es una de las características determinantes de la calidad de un adsorbente. Ahora bien se sabe que mediante la aplicación de técnicas apropiadas (activación química o térmica), y un costo razonable pueden conferirse a diversos substratos carbonados superficies específicas muy elevadas (700 a 1500 m²/g) lo que explica que los carbones activos sigan siendo los adsorbentes que mas se utilizan.

Para la preparación de los carbones activos de uso frecuente, se emplean principalmente antracita, carbones grasos o botuminosos, coque de petróleo, turba, madera y coco.

la experiencia demuestra que los carbones activos son de amplio espectro: la mayoría de la moléculas orgánicas se fijan en su superficie, siendo las moléculas mas cortas las que peor se fijan (especialmente las que contienen menos de tres átomos de carbono:

alcoholes simples, primeros ácidos orgánicos), y las menos polares. Por el contrario, se fijan bien las moléculas más pesadas, los compuestos aromáticos, los hidrocarburos sustituidos, etc.

Como puede observarse, los cuerpos que peor se fijan, citados anteriormente, son los más fácilmente biodegradables, lo que confiere al tratamiento de adsorción un carácter de complementariedad apreciable, con relación al tratamiento biológico.

Por ello la adsorción se utiliza:

- en tratamiento de afino de aguas potables o de aguas industriales de gran pureza, especialmente cuando se obtienen de aguas superficiales, en el que el carbón activo fija los compuestos orgánicos disueltos que hayan podido escapar de la degradación biológica natural (autodepuración de los cursos de agua), microcontaminantes, sustancias que determinan el sabor del agua, igualmente adsorbe ciertos metales pesados en estados de trazas.

- en tratamiento "terciario" de aguas residuales o industriales, el carbón fija los compuestos orgánicos disueltos refractarios al tratamiento biológico, situado a la entrada con lo que se elimina una gran porción de la DQO residual.

- en tratamiento de aguas residuales industriales, cuando el efluente no es biodegradable o contiene elementos tóxicos orgánicos que impiden la puesta en práctica de técnicas biológicas. Se observa, que en este caso, el empleo del carbón activo puede efectuar una retención selectiva de los elementos tóxicos y por consiguiente, obtener un efluente normalmente biodegradable.

Por último otra propiedad muy utilizada de los carbones activos es su **acción catalítica** y más concretamente, la que ejerce sobre la reacción de oxidación del agua con cloro libre:



Se realiza así la **eliminación de cloro** de un agua que haya sufrido un tratamiento de cloración en exceso. Esta acción eliminadora de cloro se caracteriza por la **longitud de semi-decloración** que es la altura de lecho filtrante que en una velocidad dada provoca una reducción de la mitad de la dosis de cloro en el agua.

Se produce una acción catalítica del mismo tipo frente a las cloraminas, que se descomponen en nitrógeno y ácido clorhídrico. Sin embargo, su cinética es más lenta que en el caso de cloro libre (longitud de semi-decloración mucho más elevada).

El poder de eliminación de cloro de un carbón se ve afectado por todo lo que se opone al contacto entre el carbón y el agua a tratar: sedimentos de carbonato cálcico, satura-

ción de la superficie por adsorción de contaminantes diversos, etc.

Se pueden mencionar otros adsorbentes como por ejemplo:

- adsorbentes minerales como la alúmina y otros óxidos minerales activados que pueden presentar una gran superficie específica pero únicamente algunas sustancias tienen buena afinidad hacia ellos, por lo tanto son adsorbentes muy específicos.

también existen los adsorbentes orgánicos, como las resinas macromoleculares de superficies específicas comprendidas entre 300 y 500 m²/g, sus capacidades son muy mediocres con relación a la de los carbones activos, por el contrario, estas resinas tienen mejor cinética de adsorción y generalmente son más fáciles de regenerar (pequeña energía de unión).

Su utilización puede recomendarse en algunos casos como protección de cadenas de intercambio iónico en tratamiento de superficies, en presencia de detergentes no iónicos o fijación de compuestos fenolados con vistas a su recuperación.

En resumen el carbón activo se utiliza principalmente, cuando se desea eliminar contaminantes orgánicos disueltos, tales como:

- detergentes.
- colorantes de síntesis solubles.
- disolventes clorados.
- fenoles y derivados hidroxilados.
- derivados aromáticos, sustituidos o no, especialmente derivados clorados o nitrados.
- sabores, olores.

4.12.1.- Carbones activos.

Los carbones activos se presentan en dos formas, como carbón en polvo y carbón en grano:

- **Carbón en polvo:** el carbón en polvo se presenta en forma de partículas comprendidas entre 10 y 50 μ m, y generalmente se utiliza en combinación con los tratamientos de clarificación. Inyectado de forma continua en el agua con reactivos de floculación, se introduce en los flóculos y seguidamente se extrae del agua con ellos. Para esta extracción se recomienda a veces recurrir a una filtración directa, si bien es preferible utilizar un decantador de recirculación de fangos (Turbocirculator), o mejor aún de lecho de fangos (Pulsator). Con estos aparatos se aumenta notablemente el tiempo de contacto

entre el agua y el carbón, por lo tanto se consigue una mayor aproximación al equilibrio.

El carbón en polvo puede utilizarse, en forma de precapa de filtro de bujías para afino de aguas industriales de elevada pureza (tratamiento de condensados, agua de aclarado en la industria electrónica, etc.)

Las ventajas que puede presentar un carbón activo en polvo son:

- aproximadamente de dos a tres veces mas económicos que los carbones en grano.
- para utilizarlo, sólo se necesita realizar una inversión reducida, cuando el tratamiento lleva únicamente una etapa de floculación-decantación (basta prever un simple equipo de dosificación de carbón activo).
- su cinética de adsorción es rápida, puesto que su superficie es directamente accesible.
- el carbón activo favorece la decantación, al espesar el flóculo.

Los inconvenientes que puede tener son los siguientes:

- el carbón activo no puede regenerarse cuando se recupera en mezcla con fangos de hidróxidos, por lo que puede preverse la pérdida de este material, después de su utilización. Cuando sólo se utiliza carbón activo (en ausencia de coagulantes minerales) puede recurrirse a una de las recientes técnicas de regeneración en lechos fluidificados, que conducen a pérdidas muy elevadas.
- resulta difícil eliminar las últimas trazas de impurezas, sin añadir un exceso de carbón activo.

- **Carbón activo en grano:** el carbón activo en grano se utiliza en forma de lecho filtrante atravesado por el agua a tratar, cuyas impurezas se someten así a una extracción. también puede utilizarse como soporte bacteriano, por lo que el carbón ofrece condiciones ideales para la colonización bacteriana, este fenómeno puede contribuir a la depuración, pero si no se realiza de forma perfecta, puede resultar peligroso (fermentación anaerobia causante de olores, atascamientos del lecho).

3.12.2.- Regeneración

El carbón activo (lo mismo que los adsorbentes artificiales) es un producto caro. En la mayoría de los casos, resultaría prohibitivo sustituir al carbón saturado, el cual

debe de regenerarse, para ello se han desarrollado tres metodos:

a) **Regeneración con vapor:** este método se limita a la regeneración de carbón que sólo haya adsorbido algunos productos muy volátiles, sin embargo la aplicación de vapor desobstruye la superficie de los granos y esteriliza el carbón.

b) **Regeneración térmica:** por pirólisis y combustión de sustancias orgánicas adsorbidas. El calentamiento hasta unos 800 °C, en atmósfera controlada, evita que se inflame el carbón. Con este método se consigue una buena regeneración del carbón activo, este método presenta dos inconvenientes: requiere fuertes inversiones y conduce a pérdidas de carbón elevadas por regeneración

c) **Regeneración química:** en este método se utilizan reactivos químicos alcalinos y disolventes para la eliminación de las impurezas que contaminan el carbón, este método genera efluentes en el que el solvente debe de recuperarse por destilación y los contaminantes a menos que puedan recuperarse, se eliminan por incineración.

Este procedimiento esta menos generalizado que la regeneración térmica.

COMENTARIOS.

La realización del presente trabajo fue de descripción bibliografica de acuerdo al planteamiento inicial de los objetivos del mismo, el cual cubre los lineamientos de sus alcances descritos al inicio de su desarrollo.

El trabajo contiene la información básica de los procesos de tratamiento de agua de uso industrial, que cuando dicha información se le quiera dar un uso práctico a la realidad de los problemas en esta rama, simplemente se requerira de plantear algún problema en particular para obtener agua de una determinada calidad, y de este modo, se plantearían varias opciones tan complejas o sencillas se requieran. Si este trabajo ejemplificara un uso práctico de su información contenida, mencionaría cientos de problemas y opciones que existen dentro de la industria, lo cual esta fuera del alcance del presente, pero como se menciona en el desarrollo del trabajo, cuando surge un problema relacionado al agua industrial solo se necesita saber el uso y la calidad del agua requerida, para deslindar opciones y tener un modelo de proceso mas optimo que satisfaga todas las necesidades del problema que se presente en determinada industria. Normalmente lo que se busca en esta optimización es llegar a un modelo que sea eficiente, de operación no muy compleja, de costos accesibles, costos de mantenimiento que justifiquen el resultado del uso del equipo.

Para ejemplificar uno de tantos problemas dentro de la industria a continuación se menciona de manera particular una situación de tratamiento de agua:

En cierta planta productora de cerveza ubicada en la ciudad de México, se presenta un problema de tipo ecológico, el cual las autoridades de ecología de la localidad, detectan un problema de contaminación de tipo orgánico que da una coloración de 300 en la escala Pt-Co al agua residual de vertido al drenaje público, y pide sea tratado este efluente para poder seguir usando dicho drenaje.

El planteamiento del problema es el siguiente:

Para que el agua pueda ser vertida al drenaje las autoridades exigen un determinado límite de valor de color en la escala Pt-Co de 60 como máximo, producida por la materia orgánica del afluente.

Los encargados de tratamiento de agua proponen que para disminuir el contenido orgánico, debe de someterse a una oxidación fuerte dicho efluente, planteando dos opciones: una oxidación con Cl_2 + Hipoclorito de sodio o una oxidación con Ozono.

Estas dos opciones se plantearon por las siguientes razones:

Como se sabe la aplicación del ozono como oxidante en el tratamiento de agua tiene el mismo objetivo que la aplicación del cloro.

Los colores presentes en algunas son derivados de la descomposición de materiales orgánicos naturales, y se debe a la presencia de compuestos que contienen grupos conjugados de orgánicos insaturados, el ozono es muy reactivo con estos grupos. esto no significa que todos los colores causados por los compuestos orgánicos pueden ser convertidos a dióxido de carbono y agua, sino que simplemente los grupos insaturados responsables del color son destruidos. El cloro actúa de manera semejante al ozono en esta situación.

Para decidir que tecnica utilizar se analizaron las siguientes ventajas y desventajas:

Ventajas de usa Cl_2 e hipoclorito de sodio.

- 1.- Mantiene un efecto persistente.
- 2.- Los costos de tratamiento son bajos en relación al del ozono.

Desventajas:

- 1.- La disminución de color es mas lenta que con la ozonación.
- 2.- La cloración se afecta considerablemente con los cambios de temperatura y pH.
- 3.- Se pueden producir compuestos tóxicos.
- 4.- Representa un peligro potencial para el personal.
- 5.- Existen problemas asociados con la transportación y el almacenamiento del Cl_2 y sus derivados.
- 6.- Tiene menos capacidad de destrucción de materia orgánica que el ozono.
- 7.- Se utilizan altas concentraciones de cloración (4-10 ppm.).

Ventajas del uso de ozono.

- 1.- El ozono es un agente oxidante muy potente, que destruye toda clase de microorganismos y en el caso de nuestro problema elimina los colores en un periodo de contacto relativamente corto, de 300 hasta menos de 60 en la escala Pt-Co.
- 2.- Su acción oxidante es eficaz a través de una gama muy amplia de temperatura y pH.
- 3.- No se requieren concentraciones muy altas (2-4 ppm.).
- 4.- Evita problemas asociados con la transportación y el almacenamiento de químicos peligrosos.

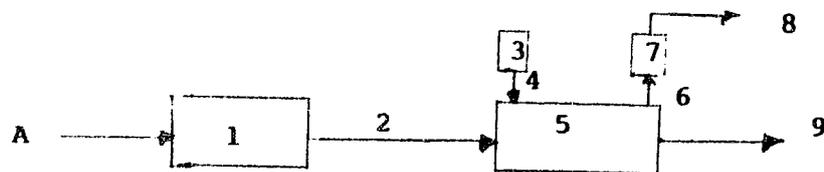
Desventajas:

- 1.- Alto costo de capital de operación y de mantenimiento.

- 2.- Requiere una alta cantidad de energía eléctrica.
- 3.- El ozono residual no puede mantenerse en un periodo largo de tiempo.
- 4.- Al igual que el cloro produce tóxicos.

De acuerdo al objetivo de eliminar color a un valor de menos de 60 en la escala Pt-Co de manera eficiente y rápida, se decidió por usar la ozonación, aunque los costos de operación y mantenimiento sean mayores que la cloración, situación que se compensa a largo plazo, porque el ozono se produce en la misma planta y se descarta la compra de cloro e hipoclorito a los productores que pueden aumentar sus precios en cualquier momento.

El diagrama de tratamiento aprobado es el siguiente:

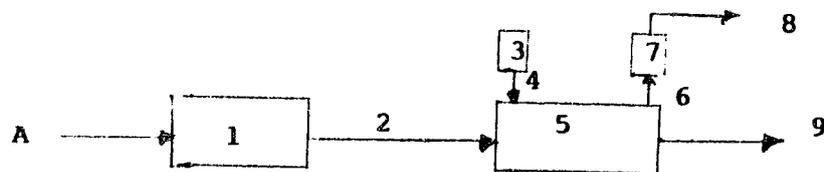


- A.- Entrada de agua a proceso.
- 1.- Proceso.
- 2.- Efluente contaminado.
- 3.- Ozonador.
- 4.- Ozono.
- 5.- Cuba de ozonación (oxidación de materia orgánica).
- 6.- Ozono remanente.
- 7.- Destructor de ozono.
- 8.- A la atmósfera.
- 9.- Vertido con materia orgánica dentro de lo permitido

- 2.- Requiere una alta cantidad de energía eléctrica.
- 3.- El ozono residual no puede mantenerse en un periodo largo de tiempo.
- 4.- Al igual que el cloro produce tóxicos.

De acuerdo al objetivo de eliminar color a un valor de menos de 60 en la escala Pt-Co de manera eficiente y rápida, se decidió por usar la ozonación, aunque los costos de operación y mantenimiento sean mayores que la cloración, situación que se compensa a largo plazo, porque el ozono se produce en la misma planta y se descarta la compra de cloro e hipoclorito a los productores que pueden aumentar sus precios en cualquier momento.

El diagrama de tratamiento aprobado es el siguiente:



- A.- Entrada de agua a proceso.
- 1.- Proceso.
- 2.- Efluente contaminado.
- 3.- Ozonador.
- 4.- Ozono.
- 5.- Cuba de ozonación (oxidación de materia orgánica).
- 6.- Ozono remanente.
- 7.- Destructor de ozono.
- 8.- A la atmósfera.
- 9.- Vertido con materia orgánica dentro de lo permitido

CONCLUSIONES .

De acuerdo al planteamiento de los objetivos y con base al desarrollo del contenido del trabajo se argumentan las siguientes conclusiones:

- En cualquier tipo de industria ya sea nueva, en ampliación o en operación, es esencial el conocimiento de la disponibilidad de una fuente de abastecimiento, así como de un adecuado estudio sobre la naturaleza de las características físicas, químicas y biológicas de la fuente de agua, para obtener información de suma importancia que oriente en decidir adecuadamente la aplicación de un método de tratamiento y obtener un agua de calidad requerida.
- Una vez analizado el estudio del agua y las necesidades de esta en una planta industrial, se deben de fijar parámetros y normas de calidad que se van a manejar en el uso de agua dentro de la planta y dependiendo de esto se elegirán las técnicas adecuadas y la secuencia del tratamiento a seguir de acuerdo al grado de pureza necesaria en algún proceso en particular. También es de suma importancia tomar en cuenta la normatividad de los vertidos de aguas residuales que tienen un efecto perjudicial a la ecología y que actualmente resulta prohibitivo desecharlas sin ser tratadas.
- Para lograr obtener un agua de calidad determinada se emplean muchos métodos y combinaciones de tratamientos, cuyas bases pueden ser físicas, químicas, y biológicas en la que su objetivo es eliminar primeramente materia en suspensión, después sustancias coloidales y a continuación sustancias disueltas y por último corregir ciertas características de acuerdo a la calidad requerida, y en este sentido se modifiquen todas las características indeseables del agua que causarían problemáticas de efecto químico, electroquímico y de contaminación, como la corrosión y las molestas incrustaciones dando como resultado una mayor durabilidad del equipo y accesorios de proceso, mejor operación y eficiencia e indudablemente costos mas bajos de operación y mantenimiento de los mismos, y también ayudaría de manera muy importante en la preservación del medio ambiente.

BIBLIOGRAFIA .

Libros.

- Eskel Nordell. " TRATAMIENTO DE AGUA PARA LA INDUSTRIA Y OTROS USOS ". CECSA, Méx.-
- Geo. Clifffort White. " DESINFECTION OF WASTEWATER AND WATER FOR REUSE ". Vand Nostrand Reinhold Co.-
- Gordon Maskew Fair. " ABASTECIMIENTO DE AGUA Y REMOCION DE AGUAS RESIDUALES ". Limusa, Méx. 1982.
- James W. Macoy. " THE CHEMICAL TREATMENT OF COOLING WATER ". Chemical Publishing Co. New York. 1988.
- Larry W. Canter, Robert Knox. " GROUND WATER QUALITY PROTECTION ". Lewis Publishing, Inc. 1988.
- N.Irving Sax. " INDUSTRIAL POLLUTION ". Van Nostrand Reinhold Company. 1980.
- Shepard T. Powel " ACONDICIONAMIENTO DE AGUA PARA LA INDUSTRIA", Mex. 1981.

Manuales

- Degrémont "MANUAL TECNICO DEL AGUA" . Degrémont, 1979.
- Frank N Kemer. " THE NALCO WATER HANDBOOK. 2da. ed." Mc. Graw Hill Book Co. 1987.
- Hermand E. Hilliboe " MANUAL DE TRATAMIENTO DE AGUAS NEGRAS". Public Dep. de sanidad Deny. 1980.
- Robert H Perry & Chilton. " MANUAL DEL INGENIERO QIMICO ". Mc. Graw Hill, 5a. ed. 1982.

Revistas

- Bipin. S Parekh. " GET YOUR PROCESS WATER TO COME CLEAN ". Chemical Engineering. January, 1991, pp. 70- 85 .
- Borradores de cursos abiertos: TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES, MUNICIPALES, Y REUSO. Impartido por la Facultad de Ingeniería, UNAM, marzo de 1992.
- Dow Chemical Company (ASTM). "MANUAL ON WATER". C.E. Hamilton.
- Revistas: AGUAS RESIDUALES.- CLORACION, COAGULACION, DESINFECCION, FILTRACION, FLOCULACION, SEDIMENTACION, Ingenieria Ambiental. Jorge Molina Riquel
- The American Water Works Assc. Inc. " CONTROL DE CALIDAD Y TRATAMIENTO DE AGUA".