

T 628.2  
NAP



Escuela Superior Politécnica  
del Litoral

# MONOGRAFIA DE GRADO

*Previa a la Obtención del Título de  
Tecnólogo en Refinación de Gas  
y Petróleo.*

**Augusto Napoleón León**

*TEMA:  
Tratamiento de Aguas  
" Clarificación "*

*Año Lectivo 1.983 - 1.984*

*Guayaquil*

*Ecuador*



SECRETARIA  
GENERAL



## P R O L O G O

El objetivo en sí de ésta monografía, es el de recopilar, los métodos y la tecnología necesarios hoy en día para el tratamiento de aguas industriales y de usos domésticos.

La contaminación de éstas aguas nos conduce a los diferentes tipos de tratamiento, entre ellos los más importantes son:

- Las aguas naturales que no son puras ya que éstas presentan distintas contaminaciones y mineralizaciones, de acuerdo al roquedo que lavaron en su largo recorrido por la superficie de la tierra.
- Y las aguas contaminadas que tienen su origen en productos de desechos de la actividad humana.

Por otra parte el proceso de clarificación que es el propósito principal de ésta monografía se refiere a el tratamiento del agua procedente del río. En éste proceso se trata de eliminar el color y la turbidez mediante sedimentación y con la inyección de químicos (sulfato de aluminio, sosa cáustica, polielectrolito, etc.), también se eliminará la dureza del agua que es originado por sales de calcio y magnesio, y las producidas por carbonatos y bicarbonatos; en éste proceso se controla también el pH del agua.

**I N D I C E**

- I 1. POLUCION DEL AGUA
  - 1.1. DEFINICIONES DE POLUCION
  - 1.2. TIPOS DE POLUCION
    - 1.2.1 Alteraciones físicas
      - a) Color
      - b) Olor
      - c) Sabor
      - d) Temperatura
      - e) Materia en suspensión
      - f) Radioactividad
      - g) Formación de espumas
    - 1.2.2 Alteraciones químicas
    - 1.2.3 Alteraciones biológicas
  - 1.3. COMPUESTOS CONTAMINANTES
  - 1.4. EL AGUA COMO VEHICULO TRANSMISOR DE ENFERMEDADES
  - 1.5. MEDICION ANALITICA DE LA POLUCION
  - 1.6. DETERMINACION DE MATERIA ORGANICA PUTRESCIBLE
    - 1.6.1 Pérdida de peso al rojo
    - 1.6.2 Demanda química de oxígeno (D.Q.O.)
    - 1.6.3 Demanda bioquímica de oxígeno (D.B.O.)
    - 1.6.4 Carbono organico total
  - 1.7. METODO ANALITICO UTILIZADOS EN CONTAMINACION DE AGUAS
    - 1.7.1 Oxígeno disuelto (O.D.)
    - 1.7.2 Demanda inmediata de oxígeno (D.I.O.)

## II

1.7.3 Demanda bioquímica de oxígeno (D.B.O.)

1.7.4 Demanda química de oxígeno (D.Q.O.)

1.7.5 Carbono orgánico total (C.O.T.)

1.7.6 Cloro residual

1.7.7 Nitrógeno

a) Nitrógeno amoniacal

b) Nitrógeno de nitrato

c) Nitrógeno de nitrito

d) Nitrógeno orgánico total

1.7.8 Sulfuros

1.7.9 Cianuros

1.7.10 Fenoles

1.7.11 Metales tóxicos

a) Arsénico

b) Cinc

c) Cobre

d) Cromo

e) Plomo

f) Selenio

g) Manganeso

h) Hierro

1.7.12 Fluoruros

1.7.13 Sólidos disueltos

1.7.14 Materias en suspensión

## II 1. TRATAMIENTO QUIMICO DEL AGUA

1.1. PH

### III

- 1.1.1 Alcalinidad, acidez
- 1.1.2 Alcalinidad total (M-)
- 1.1.3 Alcalinidad de bicarbonatos
- 1.1.4 Alcalinidad Fenoltalcina (P-)
- 1.1.5 Alcalinidad de hidróxidos (OH)
- 1.1.6 Relaciones de alcalinidad
- 1.2. LA SOLUBILIDAD Y "LA SOLUBILIDAD INVERSA"
- 1.3. GASES DISUELTOS
- 1.4. SATURACION
- 1.5. PRECIPITACION
- 1.6. EL TDS-SS
- 1.7. EVAPORACION
- 1.8. DUREZA TOTAL
- 1.9. CICLOS DE CONCENTRACION
- 2. METODO PARA CALCULAR EL INDICE DE SATURACION (LANGELIER) Y EL INDICE DE ESTABILIDAD (RYZNAR)
- 2.1. TERMINO CORROSION
- 3. FUNDAMENTOS DEL CONTROL DE MICROORGANISMOS
- 3.1. ALGAS
- 3.2. BACTERIAS
- 3.3. HONGOS
- 3.4. CRECIMIENTOS DE BACTERIAS, HONGOS, ALGAS, Y OTROS
- III 1. SISTEMA DE CLARIFICACION
- 1.1. TEORIA SOBRE LA CLARIFICACION
- 1.1.1 Reactor envirex
- 1.1.2 Clarificación

- 1.1.3 Permanencia
  - 1.1.4 Coagulación
  - 1.1.5 Control de pH
  - 1.1.6 Operación del reactor
  - 1.1.7 Retrolavado automáticamente controlado
  - 1.1.8 Operación inicial
  - 1.1.9 Prueba de jarra
  - 1.1.10 Panel de controles del reactor
- 2. CARACTERISTICAS DEL SISTEMA DE AGUA DE REFINERIA
    - 2.1. CONDICIONES DE AGUA PARA REFINERIA
    - 2.2. AGUA DE REFINERIA (agua clarificada)
- 3. PROCEDIMIENTO PARA CALIBRAR LAS MAQUINAS DOSIFICADORAS DE SULFATO DE ALUMINIO

LISTAS DE TABLAS Y FIGURAS

I. POLUCION DEL AGUA

TABLA 1.3 a COMPUESTOS CONTAMINANTES

TABLA 1.3 b PRINCIPALES CONTAMINANTES DEL MEDIO Y SUS  
POSIBLES EFECTOS (O.M.S.)

TABLA 1.5 DETERMINACION A REALIZAR PARA EL ESTUDIO  
DE UN RIO

II. TRATAMIENTO QUIMICO DEL AGUA

TABLA 2 DATOS PARA CALCULAR LOS INDICES DE SATURACION Y ESTABILIDAD

I. POLUCION DEL AGUA

FIGURA 1.7 DIAGRAMA DE UN ANALIZADOR DE CARBONO

## I P O L U C I O N D E L A G U A

1 Se dice que el agua es una combinación de hidrógeno y oxígeno de fórmula  $H_2O$ . Ahora bien, con el descubrimiento de los isótopos de hidrógeno y del oxígeno se vió que lo que se llamó agua es una mezcla de 18 cuerpos posibles, aunque en la práctica sea una mezcla de agua ligera ( $H_2O$ ) y de muy pequeñas cantidades de agua pesada y de agua hiperpesada.

Este agua, que es la que se encuentra en la naturaleza lleva disueltas y en suspensión determinadas sustancias que adquirió a lo largo del recorrido de parte de su ciclo. En efecto al caer en forma de lluvia se encuentra en contacto con el aire. Luego, sobre la tierra, una parte discurre sobre la superficie de la misma, constituyendo la llamada agua de escurrentía y otra se infiltra para circular por su interior formando las aguas subterráneas. Se han encontrado en el agua de lluvia los iones siguientes:  $Na^+$ ,  $Ca^{++}$ ,  $Mg^{++}$ ,  $HCO_3^-$ ,  $Cl^-$ ,  $I^-$ ,  $SO_4^{=}$ ,  $PO_4^{=}$ , además de  $CH_4$ ,  $CO_2$ ,  $H_2$ ,  $O_2$ ,  $N_2$ , He, Ar, Ne, etc.

Cuando discurre por la tierra el agua puede disolver a diversas sales. Las más importantes, de las contenidas en las rocas solubles, son las calizas, las dolomías o calizas dolomíticas, el yeso, la anhidrita, el cloruro sódico, el cloruro potásico, etc., mientras

oligoelementos. Como es lógico las aguas subterráneas tendrán, en general, más sustancias disueltas y estarán más mineralizadas que las superficiales; además de estas sustancias disueltas en el agua que tienen su origen natural, existen otras que tienen su origen en productos de desecho de la actividad humana, bien arraigados a ella directamente, como cuando se la usa como vehículo para eliminar sustancias molestas, bien que lleguen a ella indirectamente como consecuencia del lavado de zonas que lo contenían.

El agua natural según lo anterior, no es pura si no que contiene en su seno determinadas sustancias, en mayor o menor cantidad, que la hace totalmente distinta en sus propiedades, del agua pura. Por eso, no extrañará que debido a la complejidad tan grande que presentan, deba ser estudiada en cada caso antes de ser aplicada a cada proceso industrial y que por lo que se refiere a las aguas residuales, sean distintas las producidas por las fábricas que fabriquen el mismo producto y apliquen el mismo proceso si están situadas en sitios distintos.

Las aguas naturales presentan, pues, distinta mineralización según el roquedo que lavaron, en su deambular por la superficie o el interior de la tierra. Esta mineralización va desde algunos miligramos por litro, que presentan las aguas procedentes de terrenos

graníticos, a muchos gramos por litro, que presentan las aguas del mar y más aun las aguas procedentes de yacimientos petrolíferos.

#### 1.1 DEFINICIONES DE POLUCION

Es difícil escoger una definición entre las muchas que se han dado, debido a la complejidad que presentan. En efecto la polución ha sido definida indirecta y directamente. Indirectamente, la anunció la ley Suiza en 1955 cuando dice "Se tomarán las medidas necesarias para controlar la polución, o cualquier otro deterioro de las aguas superficiales y subterráneas, a fin de conseguir la protección sanitaria de hombres y animales, la posibilidad de utilizar para fines de bebida los manantiales y las aguas subterráneas, el tratamiento del agua superficial para hacerla apta para el consumo industrial y doméstico, los usos recreativos, la pesca, la protección de las construcciones fluviales e impedir la desfiguración del paisaje". Las definiciones directas son varias. Así la legislación francesa de 1964 la define diciendo que: "La polución del agua persiste en el vertido de residuos sólidos o líquidos, el depósito de materiales o cualquier otra acción susceptible de causar deterioro o incrementar el grado del mismo, en la calidad de las aguas, modificando sus características físicas, químicas y biológicas del agua como consecuencia de la in-

aguas, modificando sus características físicas, químicas y biológicas del agua como consecuencia de la introducción, en cantidades excesivas, de materia sólida, líquida o gaseosa; energía, materiales radioactivos o cualquier otra sustancia o materiales con el resultado final de inhabilitar dichas aguas en su uso normal, para fines domésticos, industriales, agrícolas, la pesca y otros".

La C.E.E., de las naciones unidas la define así 1961: "Un río está polucionado cuando sus aguas son alteradas en su composición o estado, directa o indirectamente como consecuencia de la actividad humana, de tal modo que quedan menos apta para uno o todos los usos a que van destinadas, para los cuales serían aptas en su calidad natural".

En la "Carta del agua" (1968) proclamada por la asamblea consultiva del consejo de Europa en Estrasburgo, en su punto V dice: "La polución consiste en una modificación, generalmente provocada por el hombre, de la calidad del agua haciendola impropia o peligrosa para el consumo humano, la industria, la agricultura, la pesca, las actividades recreativas así como para los animales domésticos y la vida natural".

## 1.2 TIPOS DE POLUCION

La polución se la puede dividir en dos grandes grupos -Polución provocada por causas naturales o geoquímica -

cas.

-Polución provocada como consecuencia de la actividad del hombre.

Una y otra dan lugar a, alteraciones físicas, químicas o biológicas del agua, haciéndolas en muchos casos inservibles para determinados usos.

Las alteraciones más importantes que pueden sufrir las aguas como consecuencia del aporte al seno de las mismas, de sustancias extrañas o por la presencia de ellas mismas, son físicas, químicas y biológicas.

#### 1.2.1 Alteraciones físicas

##### a) Color

Todas las aguas, presentan una tonalidad variable dependiendo de muy variadas circunstancias. Esta tonalidad más o menos acusada es el color del agua que tiene su origen en causas internas o en causas externas. Las primeras son debidas a materiales disueltos y a los suspendidos en la misma agua, y las segundas, o sea las causas externas, tienen su origen en la absorción de la radiaciones de mayor longitud de onda.

A su vez, este color del agua es de dos tipos: aparente, el que presenta el agua bruta y verdadero, el que queda después de haber separado las materias en suspensión.

Las sustancias productoras de color son variadas, por ejemplo, el color café amarillento o pardo, es produ-

cido por materia orgánica diversa (humus, ácido tánicos, etc.) hojas, turbas, troncos, etc. El color verde se presenta, por ejemplo, cuando el agua es relativamente rica en fitoplacton, clorofilas, etc.

En general las aguas que provienen de zonas geológicas puras, pueden caracterizarse por su color si se las contempla bajo un cierto espesor. En efecto, las que provienen de la mayoría de los macizos graníticos y de las rocas silíceas presentan un color ligeramente pardo o rojizo, que tienen su origen en las sales de hierro que aportan estas rocas.

Las aguas que provienen de macizos no calcáreos son ligeramente amarillentos y los macizos calcáreos, verdosos.

En relación con las aguas tratadas, éstas pueden presentar una coloración debida a efectos de tratamiento es decir, que no haya sido capaz de quitarle el color. Las aguas negras recientes tienen color gris, que va pasando a oscuro e incluso cuando éstas se alteran.

Los desechos industriales dan a las aguas, algunas veces, colores característicos, pero en general no se puede establecer ninguna relación entre el color y el grado de polución.

En relación con la coloración de las aguas de origen vegetal, es muy poco lo que se sabe acerca de la composición de la materia colorante, excepto que es pro-

bablemente una mezcla compleja de un cierto número de compuestos orgánicos en forma coloidal y que la mayoría de estos compuestos tienen carga eléctrica. Estas partículas responsables del color están fundamentalmente provistas de carga negativa y pueden descargarse y flocular cuando se las somete a la acción de un campo eléctrico.

b) Olor

El olor presente en el agua, puede ser debido a la presencia en la misma de compuestos químicos como, por ejemplo, de los fenoles y el cloro, a materias orgánicas en descomposición o a ciertos organismos. Olores muy desagradables pueden ser causados por esencias liberadas en pequeñísimas cantidades por los organismos vivos (algas, hongos, etc.).

Las aguas negras domésticas recientes, son prácticamente inodoras, pero cuando empiezan a descomponerse huelen fuertemente a podrido, como consecuencia de la liberación de productos como ácido sulfídrico, indol, escatol, putrescina, cadaverina, etc. Igualmente pueden liberarse productos molientes en la descomposición de los vegetales, el desove de los peces, etc. Por último determinados productos de desechos industrial dan a las aguas olores característicos como, por ejemplo, los productos derivados del alquitran, los fermentos, etc.

Algunos malos olores se desarrollan como consecuencia del tratamiento de depuración de las aguas (ejemplo de cloro y sus derivados) por formar clorofenoles, tricloruros de nitrógeno, etc.

c) Sabor

El sabor, esta estrechamente ligado al olor, en efecto desde el punto de vista fisiológico, los sentidos del gusto y del olfato están íntimamente relacionados puesto que las papillas linguales y los sentidos olfatorios detectan estímulos simultáneos y complementarios, de tal modo que la percepción organoléptica de sabor y olor se confunde generalmente con una sola. Por esto, las causas apuntadas anteriormente para el olor pueden ser aplicadas al sabor.

Sin embargo a veces las sustancias minerales disueltas pueden dar sabores al agua sin olor ninguno. Por ejemplo, las sales de cobre, cinc, hierro, etc., pueden producir sabores metálicos. Los cloruros y sulfatos en concentraciones adecuadas hacen que el agua tenga sabor salado. Los clorofenoles dan un cierto sabor al agua aún antes de ser perceptibles su contenido al olfato.

Los malos olores desarrollados a veces en las canalizaciones, en las aguas tratadas, pueden ser provocados por un exceso de cloro que reacciona con el alquitran que constituye el recubrimiento de protección inte

rior de ciertas tuberías.

d) Temperatura

La temperatura, tiene una gran importancia en el desarrollo de los diversos fenómenos que se desarrollan en el seno del agua como, por ejemplo, en la solubilidad de los gases y de las sales, así como en las reacciones biológicas, que tienen una temperatura óptima para poder realizarse.

Una temperatura elevada implica la aceleración de la putrefacción y, por tanto, un aumento de la demanda de oxígeno. Paralelamente disminuye la solubilidad de éste.

Las reacciones biológicas que se desarrollan en el agua son influenciadas grandemente por la temperatura, pudiendo actuar estas sobre las poblaciones como un factor de control o como factor letal. En efecto, para todas las especies existe una temperatura óptima en la que se desarrollan, y que depende de la especie de la edad, de la estación, etc. Las temperaturas inferiores hacen que el metabolismo se reduzca y las superiores hacen que se sobreactiven los procesos de síntesis y de catabolismo, adquiriendo estos últimos cierta preponderancia. Algunos seres acuáticos siguen la ley de Van't Hoff o del  $Q_{10}$  que dice "Las reacciones metabólicas se hacen dos o tres veces más intensas cada vez que la temperatura del medio aumenta en

10 grados centígrados, entre los límites normales compatibles con la vida".

Se sabe que ciertas especies se reproducen solamente entre ciertos límites de temperatura.

El aumento anormal de la temperatura del agua puede tener su origen en el vertido de aguas industriales usadas como cambiadores de calor, por ejemplo de las centrales termonucleares.

#### e) Materia en suspensión

El agua se usa frecuentemente como elemento de transporte de las sustancias sólidas indeseables por el hombre. También ejerce este transporte como consecuencia de la erosión que provoca sobre la tierra al discurrir sobre ella.

Esta acción de transporte se realiza por tres caminos: arrastre, suspensión, disolución. Los dos primeros se realizan con las partículas insolubles y el tercero se realiza sobre las sustancias que son capaces de disolverse.

Las partículas en suspensión, a su vez, se pueden dividir, dependiendo del tamaño, en las que son capaces de formar suspensiones estables aún en el agua en reposo y las que no lo forman y sólo se encuentran en suspensión cuando el agua está en movimiento. Las primeras originan la llamada turbidez, que es un fenómeno óptico producto de las partículas insolubles pre -

entes en suspensión en el agua. Consiste esencialmente en una absorción de la luz que ilumina un cierto volumen de agua, combinado con una difusión. La turbidez, está provocada por partículas de arcilla, margas limo, sales de hierro, materia orgánica finamente dividida, etc., todas ellas de un tamaño que puede variar desde el coloidal hasta partículas relativamente gruesas, es decir, diámetros que van desde la milésima de micra hasta varias décimas de milímetros.

Se llama sedimento al material que debido a su tamaño se deposita rápidamente. La medida de la turbiedad se debe hacer, por tanto, después de haber dejado sedimentar la materia en suspensión durante un tiempo conveniente.

Al concepto de turbiedad están ligados conceptos tan importantes como cantidad de materia en suspensión y filtrabilidad. La cantidad de materia en suspensión se determina mediante filtrado de un volumen de agua determinado. El índice de filtrabilidad viene dado por la variación de la velocidad de filtración para un volumen dado de agua, suponiendo constante la superficie filtrante y la carga.

f) Radioactividad

Todas las aguas presentan una determinada radioactividad natural, como consecuencia de la presencia de los isótopos de los elementos, en especial los de potasio

en la actualidad como consecuencia de las actividades nucleares de origen industrial que el hombre realiza sobre la superficie de la tierra, hay un incremento de la radioactividad de las aguas que llega en muchos casos a causar perjuicios a quienes la utilizan.

g) Formación de espumas

La presencia de los detergentes sintéticos originan la formación de grandes cantidades de espuma. En la actualidad con el uso y muchas veces abuso de los detergentes, se presenta una alteración física a tener en cuenta cuando se trata de la polución de las aguas y es la formación de espumas.

Los detergentes o compuestos tensoactivos, son un grupo de cuerpos que tienen la propiedad de disminuir la tensión superficial de los líquidos en que se hallan disueltos. La mayor parte de los detergentes sintéticos del comercio están formados principalmente por dos constituyentes: de una parte el detergente propiamente dicho o agente tensoactivo, y de otra, una mezcla de sales sódicas (fosfatos, carbonatos, sulfatos, silicatos, perboratos, etc.). Parece que estos últimos cuerpos son los causantes de los trastornos que antes se atribuían a los detergentes.

Los detergentes son introducidos en las aguas naturales, tanto procedentes de las industrias como de las aguas domésticas, en cantidades enormes.

Esta contaminación que se ha presentado en los últimos 30 años (los detergentes sintéticos aparecieron en la primera guerra mundial) es particularmente molesta por se causa de la formación de espumas. Todas las sustancias que tienden a disminuir la tensión superficial de un líquido favoreciendo a la formación de espumas. Este es el caso de detergentes que forman espumas voluminosas en el agua aún con contenidos del orden de algunas millonésimas.

La formación de espumas y su estabilidad se favorece por la presencia de proteínas más o menos desagradables como es el caso de las aguas cargadas de efluentes domésticos. La presencia de partículas sólidas finamente divididas y de sales minerales disueltas, también influyen en la formación de espumas. Prat y Giraud citan que con agua destilada, con menos de 5 mg/l de ABS (sulfonato de alcohol-benceno), la espuma formada es poco abundante y desaparece rápidamente, mientras que con un agua de desecho sintético conteniendo 6mg/l de ión de magnesio, 0,5 mg/l de ABS son suficientes para obtener espumas abundantes y estables.

La temperatura también influye en la formación de espumas, actuando por otra parte en la ruptura de ésta, ya que al calentarse el gas ocluido en el interior de la burbujas, se dilata haciendo que la fragilidad de

las paredes aumente llegando a provocar la ruptura de las burbujas.

Una acción grave de los detergentes en lo que se refiere al poder auto depurador de los ríos, es que los mismos inhiben la oxidación química y biológica. Como consecuencia de esto, aun en las aguas fuertemente polucionadas, la DBO es muy pequeña. Esto se, debe entre otras causas, a que las bacterias en presencia de detergente se rodean de una película que las aisla del medio impidiendo toda acción de las mismas.

En las estaciones de depuración los detergentes actúan dificultando, en general, la sedimentación primaria como consecuencia de la variación de la tensión superficial del líquido y de la tensión entre las fases líquido-sólido. Igualmente interfieren en la floculación.

Juegan un papel emulsionante o solubilizante sobre los aceites y las grasas, dependiendo fundamentalmente de la estructura del grupo liófilo del detergente. También ejercen su acción sobre los lechos bacterianos y los lodos activos.

#### 1.2.2 Alteraciones químicas

Las alteraciones químicas producidas por compuestos químicos vertidos a las aguas son quizá las más importantes y las más comunes, tanto por los efectos que producen, como por las consecuencias funestas que ocu

rren. Estos compuestos químicos causantes de estas alteraciones pueden ser de origen orgánico y de origen inorgánico.

La alteración química de las aguas producidas por productos orgánicos es muy compleja, tanto por sus consecuencias como por las sustancias que pueden ser causa de ésta alteración. En la práctica se suelen relacionar las sustancias contaminantes por la industria que realizó el vertido. En general las sustancias orgánicas dan al agua un potencial reductor, debido a que son capaces de combinarse con el oxígeno más o menos fácilmente para transformarse en última instancia en  $\text{CO}_2$  y  $\text{H}_2\text{O}$ .

La alteración química por productos inorgánicos supone la presencia de nuevas propiedades o el amortiguamiento o exaltación de las anteriores.

### 1.2.3 Alteraciones biológicas

Las alteraciones biológicas suponen, por una parte el aumento de la presencia de bacterias patógenas, virus etc., capaces de producir enfermedades, y por otra, la ausencia de animales y plantas debido a no existir en disolución el oxígeno disuelto necesario para la vida en el seno del agua. En general, un agua que contenga menos de 4 mg/l de oxígeno disuelto no es apta para el desarrollo de la vida en su seno. Esta carencia de oxígeno solamente se da en un agua no polucio-

nada cuando procede de las capas profundas de la tierra. En los demás casos la ausencia de oxígeno es como consecuencia de una polución. A veces sin embargo, aunque hay oxígeno presente, las aguas están polucionadas por la presencia de sustancias inorgánicas que, al no ser reductoras no reducen la presencia de oxígeno pero sin embargo crean otras alteraciones en las propiedades del agua, que la hacen impropias para muchos usos.

### 1.3 COMPUESTOS CONTAMINANTES

Los cuerpos más importantes que polucionan las aguas, así como el origen de los mismos es muy extenso variando constantemente con arreglo a la variación de los procesos de fabricación de muchos productos. En la tabla 1.3a se presentan los más importantes productos capaces de contaminar, efectos más importantes para la salud, tolerancia de los vertidos y su posible tratamiento.

La tabla 1.3b ha sido publicada por la Organización Mundial de la Salud. En ella se presentan los principales contaminantes en agua, alimentos, suelo y aire, así como los posibles efectos sobre la salud.

TABLA 1.3 a

COMPUESTOS CONTAMINANTES

Productos	Efectos más importantes sobre la salud	Tolerancia de los vertidos	Posible tratamiento
Sólidos insolubles		Variable	Decantación o tamizado
Acidos	Tóxicos en la mayoría de los casos	Ausencia o control del pH	Neutralización, precipitación, oxidación etc.
Hidróxidos	Variable aunque en general pequeño excepto alguno venenoso	Control del pH	Neutralización
Sales de cobre	Dosis relativamente importantes son tóxicas	Ausencia	Precipitación con cal seguida de decantación
Sales de cinc	Tóxicas	Ausencia	Precipitación con cal seguida de decantación
Sales de mercurio	Muy tóxicas	Ausencia	Precipitación con la cantidad mínima posible de sosa caustica y posterior decantación. Recuperación del óxido de mercurio precipitado
Sales de plomo	Tóxicas	Ausencia	Precipitación con carbonato de sosa y decantación
Sales de arsénico	Todas las solubles son tóxicas	Ausencia	Precipitación con cal

TABLA 1.3 a (continuación)

Productos	Efectos más importantes sobre la salud	Tolerancia de los vertidos	Posible tratamiento
Cromatos y dicromatos	Muy tóxicos	Ausencia total	Precipitación con cal y decantación
Sales de hierro	Sin peligro especial	Ausencia de color	En las ferrosas oxidación por aire y decantación. Férricas, decantación
Cianuro Sódico	Muy tóxicos	Ausencia total	Tratamiento con hipoclorito o depuración biológica aerobia
Sulfuro sódico	Tóxicos	Ausencia	Aireación energética
Hidrocarburo	Poco tóxicos	Ausencia	Desengrasado, absorción
Aceites vegetales	Sin efecto notable	Ausencia	Desengrasado, absorción
Aceites minerales	Poco tóxicos	Ausencia	Desengrasado, absorción
Fenoles	En concentraciones elevadas muy tóxicos	Ausencia	Depuración biológica oxidación con $KMnO_4$ filtración sobre carbón activado

TABLA 1.3 b  
 PRINCIPALES CONTAMINANTES DEL MEDIO Y SUS POSIBLES EFECTOS (O.M.S.)

Contaminantes del agua y los alimentos	Posibles efectos sobre la salud
Bacterias	Infecciones gastrointestinales, endémicas o epidémicas (fiebres tifoideas, cólera, shigelosis, leptospirosis, etc.)
Virus	Infecciones víricas (hepatitis epidémica, por ejemplo), posibles inflamaciones cutáneas y de los ojos, en los nadadores
Protozoos y metozoos	Amebiasis, esquistosomiasis, hidatidosis y otras enfermedades parasitarias
Metales	Intoxicaciones con plomo, con metilmercurio (ingerido) (con alimentos), con cadmio (ingerido con alimentos), con arsénico, etc.
Nitratos	Metahemoglobinemia infantil (alteraciones de las moléculas de hemoglobina)
Fluoruros	Moteado de los dientes en los casos de concentración excesiva
Petróleo, fenoles contaminantes sólidos en solución	Posibles trastornos digestivos y de otro tipo
Contaminantes del aire	Agravación de las enfermedades respiratorias y mayor riesgo de contraerlas; trastornos de la función pulmonar: irritación de mucosas y tejidos cutáneos
Anhídrido de azufre, en asociación con suspensiones de partículas (humos)	

TABLA 1.3 b (continuación)

Partículas sólidas en suspensión	Agravación de los efectos de los contaminantes gaseosos (anhídrido sulfuroso, por ejemplo); posibles efectos tóxicos, según la composición química (por ejemplo, partículas de amianto o de compuestos de plomo)
Oxidantes (ozono inclusive)	Irritación de los ojos, posible desencadenamiento de crisis de asma en enfermos de vías respiratorias, trastornos de la función pulmonar
Monóxido de carbono	Se combina con la hemoglobina e impide el acarreo de oxígeno a los tejidos, tiene efectos particularmente graves en las personas con trastornos cardiorespiratorios; puede tener efectos neuropsíquicos en concentraciones muy bajas; una de las causas de intoxicación, acaso más frecuente que la inhalación de gases de escape de vehículos, es el humo del tabaco
Plomos	Efectos acumulativos, incluso mortales a partir de ciertas concentraciones, en los casos de ingestión o inhalación reiteradas; intoxicaciones posibles aun con una sola exposición
Amianto	Posible factor etiológico del cáncer de pulmón, en unión del tabaco y de otros contaminantes; se han observado casos de calcificación de la pleura, aun con exposiciones ocasionales
Berilio	Brotos de casos de intoxicación en las inmediaciones de establecimientos industriales

TABLA 1.3 b (continuación)

Contaminantes del suelo	Posibles efectos sobre la salud
Excrementos humanos	Equistosomiasis, teniasis, anquilostomiasis y otras infecciones
Aguas residuales	Filariasis, infestaciones con moscas y otros vectores de enfermedades
Basura y criaderos de insectos y roedores en basureros	Enfermedades transmitidas por roedores; contaminación del agua y del aire en los casos de protección insuficiente
Desechos industriales y radioactivos	Intoxicación por acumulación de metales y otros tóxicos en el organismo, en los casos de contaminación de alimentos
Plaguicidas	Contaminación de vegetales y alimentos de origen vegetal

#### 1.4 EL AGUA COMO VEHICULO TRANSMISOR DE ENFERMEDADES

Desde hace muchos siglos, los rios han sido utilizados por el hombre como lugar idóneo para arrojar los desechos de sus actividades. Es, entrado el siglo XIX cuando el problema de la polución empieza a hacerse notar de una manera generalizada, debido al acusado incremento experimentado por la población mundial, el avanzado estado de desarrollo industrial y el aumento excesivo de las concentraciones urbanas. Esto último unido a que el hombre es el reservorio más frecuente de los agentes causales de enfermedades infecciosas humanas, agentes que son eliminados fundamentalmente

por las excretas, hace que las aguas residuales sea las que en muchos casos transporte directa o indirectamente los agentes productores de enfermedades. Este conocimiento de que el agua es capaz de transmitir en enfermedades es muy antiguo pues Hipócrates ya recomendaba la ingestión del agua hervida con objeto de evitar enfermedades.

Tiene pues gran importancia un control riguroso de las plantas de tratamiento y depuración de las aguas. Unas y otras contribuyen cuando funcionan bien, a un mayor bienestar del hombre y el mejoramiento general de la salud. Ahondando en esto, Hazen enunció un teorema que dice que por cada defunción de fiebre tifoidea que se evita, en el caso de que las aguas destinadas al abastecimiento sean tratadas se evitan simultáneamente tres más debidas a otras enfermedades.

#### 1.5 MEDICION ANALITICA DE LA POLUCION

La medición analítica de la polución se hacen atendiendo a los procesos que suministran la química, la física de bacteriología y la biología, aplicados al agua. Ahora bien, consideran los efluentes de distintas procedencias e incluso un determinado efluente, en el tiempo, desde un punto de vista único, aplicando a todos los mismos parámetros para medir el grado de polución es un error muy grande que no se debe nunca cometer.

Los índices de polución deben ser elegidos en cada caso de acuerdo con el origen del agua y de los posibles vertidos que soportó, no olvidando el destino que se le vaya a dar.

En general, al aplicar los métodos analíticos, se ha adoptado la costumbre de considerar a los componentes inorgánicos menos significativos que los orgánicos, lo cual en cierto modo es verdad, ya que ellos alteran menos la composición del agua desde el punto de vista sanitario, criterio que en el mayor de los casos tienen prioridad.

El comité de expertos de la O.M.S. "Lucha contra la contaminación de las aguas" en su informe técnico 318 de 1965, en su apartado 5 titulado "Determinación de la calidad de las aguas de los ríos y de los efluentes", cita como índices fundamentales para medir la calidad de las aguas los siguientes:

- Concentración de oxígeno disuelto
- Concentración de materia oxidable por vía biológica (DBO)
- Concentración de amonio
- Salinidad
- Temperatura
- Bacterias nosivas

Se ve pues, que a estos índices habría que añadir otros a fin de poder hacer un diagnóstico exacto del

estado del agua que se desea estudiar. Por ejemplo, la concentración de materia oxidable por vía química (DQO), carbono total, nitritos, turbiedad, ph, etc. El criterio a seguir para escoger en cada caso un índice u otro lo da fundamentalmente la experiencia de acuerdo con la procedencia de las contaminaciones y el destino que se vaya a dar al agua; hay que advertir que ningún índice único es satisfactorio, y que en cada caso debe procurarse determinar el mayor número de ellos posibles.

Para el estudio de un río se deben hacer las determinaciones que se indican en la tabla 1.5

TABLA 1.5

DETERMINACION A REALIZAR PARA EL ESTUDIO DE UN RIO

En campo	En laboratorio
Temperatura del agua y del aire	Conductividad
pH	Materia en suspensión
Amonio	Materia decantable
Nitritos	Grasas
Oxígeno disuelto	Nitratos
	Fosfatos
	Detergentes
	Concentración de materia oxidable por vía química (DQO)
	Concentración de materia oxidable por vía biológica (DBO)

La toma de muestra debe hacerse por un especialista ya que es una operación muy importante por depender de ella, en muchos casos, la exactitud del análisis.

#### 1.6 DETERMINACION DE MATERIA ORGANICA PUTRESCIBLE

En el agua existen microorganismos, que necesitan para su nutrición sustancias que se pueden agrupar en cuatro categorías:

- Compuestos que proporcionan carbono y nitrógeno
- Sustancias que se usan como fuente de energía
- Compuestos inorgánicos
- Oligoelementos

En general, todas las sustancias orgánicas, algunas inorgánicas y muchas sintéticas, son atacadas por lo menos por una especie de microorganismos. Algunos organismos, pueden utilizar como fuentes de alimentación primaria gran variedad de sustancias orgánicas aunque todos necesitan los elementos básicos C, N, P y S junto con determinados oligoelementos como K, Ca, Zn, Mg, Mn, Co y Cu.

Ahora bien, el hombre ha introducido en el medio ambiente factores nocivos procedentes de su actividad fisiológica y de su actividad industrial. La mayoría de estas sustancias que recogidas por los cursos de agua producen la polución de las mismas, son putrescibles. La cantidad de materias orgánicas putrescible se pueden determinar por cuatro procedimientos:

- Pérdida de peso al rojo
- Demanda química de oxígeno
- Demanda bioquímica de oxígeno
- Carbono total

La primera se realiza por combustion, la segunda por via química, la tercera por intermedio de las bacteria y la cuarta instrumentalmente. Las cuatro oxidan la materia orgánica fijando el oxígeno, siendo la segunda la que más se usa.

Las cuatro tienen su ventaja al mismo tiempo su inconveniente, no existiendo ninguna relación entre los resultados de las mismas, ya que los efectos varían de una muestra de agua polucionada a otra.

#### 1.6.1 Pérdida de peso al rojo

Se realiza por evaporación de un volumen determinado de agua y su posterior calcinación del residuo seco o obtenido, al rojo, en crisol de platino. La diferencia entre el residuo seco hallado a 110 grados centígrados y el residuo a calcinación (materias minerales más materias orgánicas en el primer caso y materias minerales en el segundo) corresponde al peso de materias orgánicas.

Para una valoración real de este ensayo, se debe tener en cuenta la estabilidad de las sales presentes en el residuo seco a distintas temperaturas.

#### 1.6.2 Demanda química de oxígeno (DQO)

También llamada inmediata, es la cantidad de oxígeno consumido por los cuerpos reductores presentes en un agua sin intervención de los organismos vivos. Se ideó a fin de soslayar las dificultades que presenta la DBO, fundamentalmente en lo que se refiere al tiempo. Esta técnica se suele hacer con dicromatos. Para ella se añade una determinada cantidad de oxígeno al agua y se determina el que se ha consumido.

La determinación del oxígeno consumido con permanganato potásico puede considerarse como una forma de la determinación de la DQO. Se puede hacer o bien hirviendo la muestra durante diez minutos o bien cuatro horas a 37 grados centígrados. Como se ve fácilmente, los resultados de esta última prueba son más bajos que a ebullición, donde se obtienen generalmente, valores cuatro veces mayores.

Esta determinación se debe hacer al realizar un análisis de potabilidad, observándose según lo anterior, que la oxidabilidad en medio alcalino es la que tiene una significación real, por ser las materias orgánicas de origen animal la que indican la posibilidad de existencia de microorganismos de origen patógeno. Como regla general, cuando el oxígeno consumido en medio alcalino sea mayor que el consumido en medio ácido, se debe sospechar de ese agua.

Existe otra forma de estudiar el poder reductor de un

agua y es mediante la demanda de cloro o índice de cloro. Esta no se efectúa más que con vistas a un tratamiento de cloración de un agua.

### 1.6.3 Demanda bioquímica de oxígeno (DBO)

La DBO en las aguas polucionadas es la cantidad de oxígeno en mg/l necesaria para descomponer la materia orgánica presente, por la acción bioquímica aerobia. Esta demanda de oxígeno la ejercen los materiales carbonados, nitrogenados y ciertos compuestos químicos reductores. La transfoemación biológica de la materia orgánica se realiza en dos etapas. En la primera, se oxidan principalmente los compuestos carbonados y en la segunda los nitrogenados. Aquella, empieza inmediatamente y termina aproximadamente a los veinte días a 20 grados centígrados. La segunda no comienza antes de los diez días a 20 grados centígrados y se prolonga por un periodo más largo.

Se ve que de la clase de sustancias presentes depende la forma en que se ejerce la demanda. El punto final puede tardar en alcanzarse mucho tiempo. Por esto se ha aceptado como regla general, el periodo de cinco días de incubación, a la temperatura de 20 grados centígrados.

La demanda bioquímica de oxígeno es la prueba más importante que se emplea para determinar una polución. Es una prueba que reduce a números un fenómeno natu-

ral muy sencillo en teoría, pero en esencia muy complejo. El cálculo se efectúa determinando el contenido de oxígeno de una muestra dada y lo que queda después de cinco días en otra muestra semejante, conservada durante este tiempo en un frasco cerrado fuera del contacto del aire a 20 grados centígrados. La diferencia entre los dos contenidos representa la demanda bioquímica de oxígeno. En la práctica, las aguas muy polucionadas necesitan en los cinco días cantidades de oxígeno mucho mayores que las que contienen las muestras, por lo que, para que la determinación pueda realizarse, hace falta a una segunda muestra adicionarle una cantidad de agua pura después de cinco días (método de dilución). La determinación se hace midiendo ambos oxígenos disueltos inmediatamente y después del periodo de cinco días de incubación.

Este número se basa en la fórmula siguiente:

$$\text{mg/l de oxígeno (DBO)} = \frac{D1 - D2}{P}$$

en donde:

D1 Es el oxígeno disuelto en la muestra diluida después de la preaireación

D2 Es el oxígeno disuelto en la muestra diluida después de la incubación

P Es la fracción decimal de la naturaleza de una muestra de agua polucionada

Desde su introducción el método de la dilución ha sido abjeto de estudio a fin de tratar de mejorar su seguridad y reproducibilidad, no habiéndose llegado aún a resultados plenamente satisfactorios, debido principalmente a la diversidad de sustancias que se pueden dar en un agua polucionada, lo que trae como consecuencia que se encuentren distintos tipos de muestras introduciendo grandes errores cuando se someten todas ellas a la misma prueba bioquímica. Como ejemplo, considérense dos muestras de agua, una polucionada por aguas negras y otras por aguas residuales industriales. En la segunda no deben normalmente existir bacterias, por lo que la prueba de la  $DBO_5$  aplicada a ambas será completamente distinta.

#### 1.6.4 Cárbono orgánico total

Una determinación que está en estos momentos ensayándose, es la del carbon orgánico total. Las experiencias que se han realizado hasta el momento no permiten establecer con caracter científico sólido, por ahora, una correlación entre los valores hallados de este parámetro, la DBO y la DQO. Tiene el inconveniente de necesitar un aparato especial para su determinación, pero una vez que se dispone de él la valoración es rápida y sencilla.

### 1.7 METODOS ANALITICOS UTILIZADOS EN CONTAMINACION DE AGUAS

A continuación se relacionan los métodos analíticos frecuentemente utilizados en contaminación de las aguas.

#### 1.7.1 Oxígeno disuelto (OD)

Es la cantidad de oxígeno disuelto en las aguas, expresada en mg/l. No es necesario recalcar la importancia que la existencia de las cantidades adecuadas de oxígeno disuelto tiene para la vida acuática.

En la recogida de muestra para la determinación de OD hay que evitar el arrastre de oxígeno atmosférico o la disolución del mismo, En las tuberías a presión se monta un tubo de vidrio que llegue al fondo del muestreador. Se deja reposar el frasco o se tapa con cuidado para evitar la formación de burbujas de aire. Si el punto de toma muestra es profundo se incorpora al muestreador una válvula automática de aire. El conocimiento exacto de la temperatura del agua que se va a analizar es muy importante.

Los análisis de oxígeno disuelto deben efectuarse inmediatamente después de tomada la muestra y en el mismo lugar en que se recogió, pues, de lo contrario, pueden verse afectados los resultados. En el caso de que el análisis no pueda hacerse inmediatamente deberá paralizarse la actividad biológica para mantener el OD, conservando la muestra a la temperatura de recogida o bien con sello hidráulico a una temperatura de 10 a 20

grados centígrados una vez que se hayan añadido 0,7 ml de ácido sulfúrico concentrado y 1 ml de solución de nitruro de sodio (2 gramos de nitruro de sodio en 100 ml de agua destilada). Este procedimiento permite conservar las muestras unas 6 horas aproximadamente. Existen ciertos compuestos e iones que interfieren en la determinación de OD, por tanto el primer objetivo será la eliminación de estos elementos perturbadores de acuerdo con los métodos siguientes:

- Alsterberg, que elimina la interferencia producida por los nitritos
- Rideal-Stewart, en presencia de hierro ferroso
- Theriault, que se aplica en presencia de materia orgánica
- Alkali-hipoclorito, cuando existen sulfitos, tiosulfatos, polionatos, hipoclorito o cloro libre
- Floculación con alumbre, cuando se produzcan interferencias debidas a la presencia de sólidos en suspensión

El método analítico se basa en que el hidróxido manganeso precipitado en la muestra, por la adición de sulfato manganeso y azida sódica en medio alcalino, absorbe el oxígeno pasando a forma mangánica. La adición de ácido disuelto, tiende a disolver el flóculo producido, formandose la sal manganesa y desprendiendose yodo que se valora con tiosulfato.

Los métodos paralográficos para determinación de oxígeno en aguas residuales se encuentra en fase de desarrollo siendo preciso en la actualidad la calibración con aguas similares a las que se pretende analizar. Estos métodos se ven interferidos por la presencia de oxidantes, detergentes, jabones, y ciertos metales pesados.

#### 1.7.2 Demanda inmediata de oxígeno (DIO)

Es el consumo de oxígeno en mg/l, de un agua residual durante un periodo de reacción de 15 min, después de mezclarla con agua destilada saturada de aire.

Uno de los métodos de ensayo empleados es el API729-56 que consiste en diluir la muestra con agua destilada aerada dejándola reaccionar a continuación durante 15 min. Se determina el contenido de oxígeno disuelto en el agua destilada aireada y, después de los 15 min se calcula el oxígeno que se consume por la diferencia que existe entre el añadido con el agua destilada y el que permanece en la mezcla diluida al final del periodo de reacción de 15 min.

#### 1.7.3 Demanda bioquímica de oxígeno (DBO)

DBO (demanda bioquímica de oxígeno) es la cantidad de oxígeno, en mg/l, necesaria para oxidar biológicamente los compuestos de las aguas residuales. La DBO última es la suma de oxígeno consumido para que la reacción bioquímica sea completa.

Los contaminantes se clasifican en naturales, vegetales, animales e industriales. Son naturales los producidos por las aguas lluvia o nieve a lo largo de su recorrido hasta llegar a los rios, arrastrando las sales que encuentran a su paso. Los vegetales se originan en la descomposición de las plantas existentes en los cauces de agua, así es como a partir de aquellos, que, por causas atmosféricas, llegan a esos cauces, los animales están representados por las excreciones, que por medios naturales o artificiales desembocan en las aguas. Entre los industriales figuran los componentes reductores o bioquímicos que la industria vierte en las aguas.

Existen dos tipos de reacciones de oxidación: las debidas a los compuestos inorgánicos oxidables con velocidad de reacción elevada, que determinan la DIO, y las reacciones bioquímicas cuya velocidad de reacción es lenta, de modo tal, que a los cinco días, tan sólo es el 68%. Este periodo de cinco días se denomina de incubación y su medida se conoce por  $DBO_5$ .

#### 1.7.4 Demanda química de oxígeno (DQO)

Es la cantidad de oxígeno, en mg/l, necesaria para oxidar los componentes de un agua residual recurriendo a reacciones puramente químicas. Los componentes de la muestra están constituidos por materia orgánica o inorgánica oxidable. Uno de los métodos de análisis

empleados es el API728-58, como agente oxidante, se emplea el dicromato potásico o permanganato potásico.

a) Método del dicromato potásico

Se añade a la muestra ácido sulfúrico y un exceso de dicromato potásico y se deja que la reacción transcurre durante 2h a 143 grados centígrados. El consumo de oxígeno no viene determinado por el dicromato potásico

b) Método del permanganato potásico

La muestra deja una reacción de 4h con permanganato potásico en medio ácido a 27 grados centígrados. Los valores determinados con ambos métodos difieren bastante entre sí ya que el primero da valores mucho más alto que el segundo.

El método API728-58 no proporciona resultados muy exactos pues se observa que hay compuestos orgánicos oxidables, tales como las aminas nitrogenadas y el amoníaco, que no se oxidan a no ser que se utilice un catalizador especial.

Por consiguiente hay que tener mucho cuidado en la interpretación de los valores de DQO, y no comparar los resultados de los tratamientos de aguas residuales cuando dichos resultados correspondan a diferentes métodos analíticos.

#### 1.7.5 Carbono orgánico total (COT)

Es la cantidad en mg/l, del carbono de materias orgá-

nicas contenidas en la muestra. Existen dos procedimientos para la determinación del COT: el primero basado en el análisis químico de laboratorio y el segundo recurriendo a los analizadores automáticos comerciales. El esquema de uno de estos modelos automáticos se presentan en la figura 1.7. Como la combustión en este modelo tiene una duración de dos horas permite controlar tanto el carbono orgánico como el inorgánico.

El método normal se basa en una oxidación completa de la muestra, mediante la determinación de la cantidad de  $\text{CO}_2$  producida.

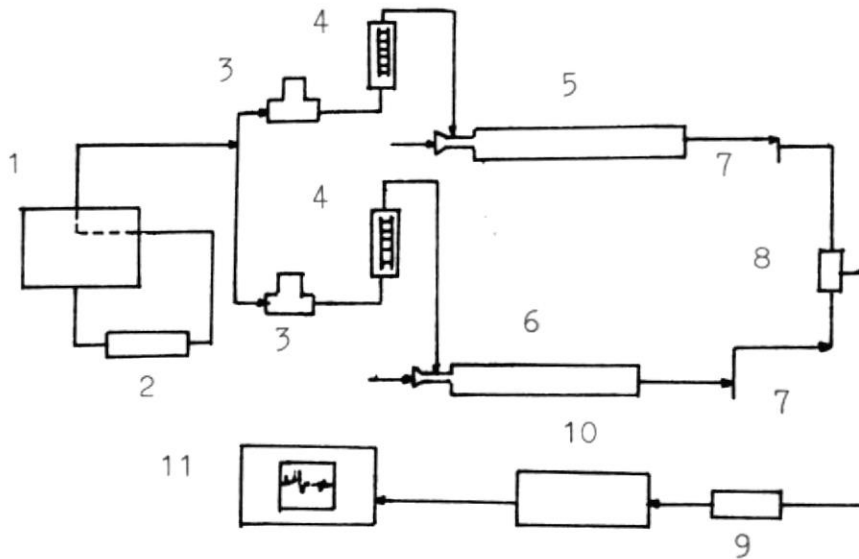


Fig. 1.7 Diagrama de un analizador de carbono

1. Unidad de purificación de aire
2. Tubo de combustión de aire

3. Regulador de presión
4. Rotámetro
5. Tubo de combustión baja temperatura 150 grados centígrados
6. Tubo de combustión alta temperatura 950 grados centígrados
7. Condensador
8. Válvula de selección de muestra
9. Filtro
10. Analizador de infrarojo
11. Registro

#### 1.7.6 Cloro residual

Dado que el cloro puede estar presente en las aguas en formas distintas, el problema analítico suele ser complejo y debe tratarse en cada caso de acuerdo con sus especialidades y circunstancias.

Utilizando el método yodométrico hay que tener en cuenta las interferencias del hierro, manganeso, nitritos y concentraciones altas de materia orgánica. En el caso de las tres primeras se puede disminuir la interferencia, controlando el pH (pH=4,0). Si no se registran estas interferencias, la producida por materia orgánica se reducirá a pH=3,0 añadiendo ácido acético o sulfúrico.

Si se utiliza el método de la ortotolidina las interferencias son las mismas que en el caso anterior y el

contenido de cloro residual aumenta. Una vez añadida la ortotolidina la temperatura de la muestra debe ser de 20 grados centígrados para que la reacción se complete. La temperatura no debe de bajar antes que se efectue dicha adición, ya que ello daría lugar a reacciones secundarias.

El pH de la solución será de 1,3 y la reacción en peso de ortotolidina-cloro de 3,1 como mínimo. El método normal de determinación de cloro se basa en su reacción a pH controlado en ortotolidina, formándose un compuesto coloreado. El color producido es proporcional a la concentración de cloro residual presente, pudiéndose evaluar su concentración por utilización de un colorímetro o comparación óptica con un patrón. La dosificación de arsenito sódico estabiliza el color, con lo que no existirá variaciones apreciables durante el tiempo que dure la determinación.

#### 1.7.7 Nitrógeno

El nitrógeno presente en las aguas puede adoptar la forma de nitrógeno amoniacal, o nitrógeno procedente de los nitratos o nitritos. Una vez recogida la muestra, se analizará inmediatamente para evitar cualquier actividad biológica. En caso de que no pueda analizarse en el actual lugar de recogida, se procederá a su fijación para ello por cada litro de muestra se añadirán 0,8 ml de ácido sulfúrico concentrado

(pH=2-3) y se guardará a una temperatura algo superior a la congelación. La preservación dura 24 h.

a) Nitrógeno amoniacal

Se halla en concentraciones variables tanto en las aguas superficiales, como en las profundas. Si la muestra contiene cloro residual, el nitrógeno se presenta en la forma de mono, de- y tricloroaminas. El control analítico de este nitrógeno se efectúa por destilación según el método estándar. Para llevar a cabo su determinación, se destila la muestra a pH=7,4, mantenida con una solución tampón de fosfato, analizándose el destilado con iodo-mercuriato potásico (reactivo de Nessler), que en presencia de amoníaco desarrolla xoleo, de tal forma que puede ser cuantificado por medio de una colorimetría o bien de un comparador óptico.

b) Nitrógeno de nitrato

Existe en cualquier tipo de aguas, potables, freáticas y negras. La interferencia más acusada se debe a la acción de los cloruros que se eliminan con sulfato de plata. El control analítico se lleva a cabo por adición a la muestra de una solución de brucina en eter y posteriormente de ácido sulfúrico, formándose un color amarillento cuya intensidad es proporcional a la concentración de nitratos y que puede ser determinada con espectrofotómetro a una longitud de onda de 470m $\mu$ .

c) Nitrógeno de nitrito

Para determinar la concentración de nitrito es preciso preservar la muestra para que se transforme en nitratos o amoníaco por acción biológica. Se emplea el análisis colorímetro del compuesto formado por el nitrito presente en la muestra al reaccionar con el ácido sulfúrico diazotado con clorohidrato de naftalina, a pH entre 2,0 y 2,5, desarrollandose un color rojo púrpurina que permite determinarla en concentración de nitritos por que permite la comparación de un patrón estandar, o bien utilizando un espectrofotómetro a una longitud de onda de 50nm.

d) Nitrógeno orgánico total

Está constituido por compuestos orgánicos en los que entra a formar parte en nitrógeno en forma trivalente como pueden ser aminoácidos y proteínas. La forma de llevar a cabo el análisis es por mineralización con ácido sulfurico concentrado en presencia de un catalizador formandose un sulfato amónico que se valora con un ácido, este método es conocido con el nombre de Kjeldahl.

1.7.8 Sulfuros

Al igual que los contaminantes anteriores, los sulfuros se encuentran en concentraciones variables en los distintos tipos de agua. Sus características principales es el olor, por baja que sea su presencia. Los

sulfuros son agentes reductores y por lo tanto originan una DIO que disminuye el contenido de oxígeno de las aguas.

Los sulfuros se presentan en las aguas como:

- Sulfuros totales, que comprenden el sulfuro de nitrógeno
- Sulfuros disueltos que quedan de una vez eliminados los sólidos en suspensión
- Acido sulfhídrico no ionizado el cual se calcula a partir de la concentración de sulfuros disueltos y del pH de la muestra original.

En el análisis de los sulfuros inmediatamente después de recogerse la muestra utilizando los métodos de volumetría o colorimetría. El análisis de los sulfuros totales se podrán preservar las muestras durante 24h, añadiendo por cada litro de las mismas 2 ml de solución de acetato de cinc. El análisis se realizará inmediatamente después de recogerse la muestra utilizando los métodos estándar de volumetría. El análisis de los sulfuros totales requiere la presencia de una cantidad razonable de sólidos en suspensión. El método analítico se basa en el desarrollo de coloración azul en la reacción de la muestra contenida de sulfuros con oxalata de p-amino dimetilánilina y cloruro férrico. La comparación de color se efectúa frente a unos patrones de azul métrico.

### 1.7.9 Cianuros

Los cianuros se hidrolizan fácilmente para transformarse en HCN. De ahí el gran peligro que representa para el personal encargado del mantenimiento del alcantarillado. No todos los cianuros tienen la misma toxicidad. Por ejemplo, los alcalinos simples se disocian en solución acuosa para formar el ión CN por cuya razón tienen un elevado grado de toxicidad. En ciertos rios no se permite una concentración de cianuros superior a 0,1 mg/l, pero el límite máximo internacional es de 0,2 a 1,0 mg/l. La legislación española es más estricta y fija un valor máximo de 0,01 mg/l. Los cianuros se analizan inmediatamente después de recogida la muestra para evitar las transformaciones químicas a que la gran actividad de dichos compuestos debe dar lugar. Conviene preservar las muestras con hidróxido sódico concentrado a un pH superior a 11, y conservarlas en lugar frío.

Las interferencias principales son:

- Ácidos grasos, que se eliminan por extracción con isooctano, hexano o cloroformo después de acidular las muestras con ácidos acéticos a pH 6-7.
- Agentes oxidantes, se titulan con tiosulfato sódico hasta que la prueba con papel de almidón, yoduro proporcione reacción negativa.
- Sulfuros, que se eliminan de la muestra con carbo-

no de plomo pulverizado a pH=11

- El resto de la interferencia se elimina por destilación

El método analítico depende de la concentración de cianuros en la muestra. Si es superior a 1 mg/l se valora con  $\text{AgNO}_3$  y si es inferior a esta cifra el método más indicado es el colorímetro. La valoración con nitrito de plata se efectúa utilizando rodamina con indicador, pasando de un color amarillo canario a salmón en el muy buen punto de equivalencia. El método colorímetro se lleva a cabo por medida en un colorímetro a 629 nm del color producido entre los cianuros de la muestra con cloroamina T y pridin-pirazolona.

#### 1.7.10 Fenoles

Los fenoles producen un sabor y olor desagradables a el agua potable, tienen propiedades bactericidas y en concentraciones elevadas interfieren los ensayos de la DBO. A ello se deben el que se hayan fijado unos límites máximo a la descarga de fenoles en las aguas negras urbanas. No todos los tipos de peces toleran la misma concentración de fenoles en el agua, por cuya razón la concentración máxima permitida será diferente según los casos. Se consideran tóxicos para peces de agua dulce las aguas de cuya concentración en fenoles sea del orden de 1-10 mg/l . La legislación española es mucho más estricta y exige menos de 0,002

mg/l tratandose de ríos de curso vigilado. Las interferencias al método analítico son:

- Agentes oxidantes, se eliminan añadiendose sulfato ferroso o arsénico sódico.
- Compuestos de azufre, se eliminan acidulando la muestra hasta un pH inferior a 4 con ácido fosfórico y utilizando anaranjado de metilo como indicador; se agita y se añade sulfato de cobre
- El método analítico se basa en la reacción a  $\text{pH}^{\pm} 0,12$  con 4 aminoantipirina en presencia de ferrocianuro potásico con la formación de una antipirina coloreada, susceptible de medida con espectrofotómetro a 510mu. Si la concentración de compuestos fenólicos es muy baja, se extrae con cloroformo y se mide a 460mu. Los resultados del análisis se expresan como ppm de fenol.

#### 1.7.11 Metales tóxicos

Como los iones de los metales pesados son de efectos tóxicos para la vida acuática, a los sistemas municipales de alcantarillado se le han fijado límites máximos de descarga. Los metales tóxicos son el arsénico, cinc, cobre, cromo, plomo, seleno, barro, cadmio, mercurio, níquel y plata. La concentración máxima de cada uno, internacionalmente permite dar en mg/l, aunque la total de los metales tóxicos no debe exeder nunca de los 5 mg/l. Aún en los sistemas municipales de el

límite total máximo de metales tóxicos admitidos es de 1mg/l.

a) Arsénico

Las trazas de arsénico en toda clase de aguas se determina por los métodos de Gutzeit, o el colorímetro del azul de molibdeno. El método de Gutzeit se emplea cuando no es preciso que el resultado obtenido sea muy exacto. En cantidades superiores a 0,10 mg el antimonio provoca interferencias. El método colorímetro de azul de molibdeno se emplea cuando se desea una mayor exactitud o en presencia de antimonio. La sílice y el fosfato del material de vidrio empleado interfieren el control del As.

b) Cinc

La presencia de sales de cinc en las aguas suele deberse a los desechos de plantas industriales o al deslizado del latón de las conducciones de hierro galvanizado. La presencia del cinc de las aguas alcalinas les comunica un sabor estringente. El análisis deberá efectuarse dentro de las seis horas siguientes a la recogida de muestras, se preservarán acidulándolas con ácidos clohídricos. En el control de este elemento es muy importante extremar las precauciones de limpieza tanto en lo que respecta en el material empleado como a los reactivos utilizados, teniendo en cuenta el gran número de interferencias que se registran.

Este elemento se determina colorimétricamente por reacción con zincon (2 carbil-2 hidroxil-5 sulfomacil-benceno) a pH=9. Una vez desarrollado el color debe ser analizado inmediatamente, para evitar su degradación.

c) Cobre

El empleo con fines biológicos de las sales de cobre en embalses y sistemas de distribución exigen el control analítico de las aguas en cuestión. La elección del método al emplear depende del tipo de agua y de sus contaminantes. Por la tendencia del ión cobre al adsorberse en las superficies del recipiente de la muestra el control analítico debe ser rápido. Si ello no es posible se añadirán 5 ml de ácido clorhídrico por cada litro de muestra. El método analítico se basa en la medida del color amarillo producido entre el cobre y neucoprina (2,9 dimetil-1,10-fenantrolina) a pH comprendido entre 4,0 y 6,0 ajustando con nitrito sódico. Los iones cuprónicos son reducidos a cuproso con cloruro de hidroxilamina. El complejo amarillo formado es extraído con cloroformo y determinado espectrofotométricamente a 457 nm.

d) Cromo

El cromo suele presentarse en las aguas en forma hexavalente y, en algunos casos en la trivalente. La presencia de sales de cromo se debe a la importancia de

sus propiedades anticorrosivas para la industria. La determinación del cromo hexavalente en las aguas potables se basa en el método colorímetro de la difenilcarbazida. Para el análisis del cromo total se emplea los métodos del permanganato-nitruro y del hipobromito alcalino. El empleo del permanganato-nitruro o del hipobromito alcalino depende del contenido de la materia orgánica, ya que en el segundo método se registra interferencias. Las interfaces o interferencias más corrientes de los compuestos del cromo son el hierro, mercurio y vanadio. Los iones cromato tienen tendencia a adsorberse en las paredes del recipiente de la muestra, Por lo que en análisis deberá realizarse dentro de las 26h siguientes a la toma de muestra. Se añade ácido con un exceso de 5ml de HNO<sub>3</sub>, por litro de muestra.

e) Plomo

Debido al carácter tóxico y acumulativo del plomo, su control es inevitable, sobre todo en las aguas potables, para evitar el envenenamiento por lo tanto del plomo o saturnismo. Los métodos analíticos son:

- La extracción con ditizona disuelta en cloroformo tratándose de aguas potables
- El método colorimétrico en el caso de las aguas negras y residuales industriales.

En las aguas negras y residuales industriales pueden

registrarse interferencias debidas al bismuto y estaño . Aun con un pH=2-3 la ditizona forma complejos con el bismuto y estaño, lo que permite eliminar su interferencia teniendo en cuenta que el plomo se extrae a un pH=8-9.

f) Selenio

Es un tóxico absorbible por los cereales y hiervas en determinados suelos volcánicos. El método de control que suele emplearse es la destilación en aparatos de vidrio pyrex. Las interferencias que se registran en este método se deben al antimonio y arsénico, que pueden separarse por destilación junto con el selenil.

g) Manganeso

El manganeso se encuentra en las aguas potables en concentración muy pequeña . Los metodos de análisis son:

- El método del persulfato cuando se desconoce la concentración de manganeso. Este método del persulfato no es muy fácil a la presencia de cloruros. El cloruro sódico se elimina añadiendo sulfato mercurico, para formar complejos poco disociados. La materia orgánica se elimina prolongando el tiempo de calentamiento y añadiendo un exceso de persulfato amónico.
- El método de peryodato, si la concentración de manganeso es superior a 0,01 mg/l y no existe cloru-

ro ni materia orgánica y metales de iones coloreados. Los cloruros se eliminan por evaporación con ácido sulfúrico. La materia orgánica se elimina por ebullición con ácido nítrico. El manganeso tiende a adsorberse en las paredes del recipiente de la muestra por lo que el análisis deberá hacerse inmediatamente después de que éstase recoja. Si esto no es posible se preservará añadiendo ácido nítrico.

h) Hierro

El hierro ferroso es inestable y se oxida en presencia del aire. Es una oxidación lenta en medio ácido pero aumenta rápidamente al alcanzar la solución, cuyo color pasa a marrón. El hierro férrico puede hidrolizarse formando óxido férrico hidratado, insoluble en el agua. En condiciones reductoras el hierro es relativamente soluble en las aguas naturales donde se encuentra en la forma ferrosa. En las aguas residuales ácidas a un pH inferior a 3,5, también el hierro férrico puede ser soluble. Como los factores que afectan al hierro son muchos, su presencia en el agua adopta diversas formas estado coloidal complejos precipitados en estado deben efectuarse con mucho cuidado ya que el valor que se obtenga para el hierro dependerá de la muestra analizada. Si se desea cuantificar el hierro en estado ferroso o disuelto, se recogerá la muestra y se agregará ácido acético, para que el pH

sea inferior a 3, y formaldehído para evitar la proliferación de bacterias ferruginosas y la alteración de hierro durante el transporte o periodo de almacenamiento. Es conveniente que el análisis se realice en el lugar de la muestra. El método de análisis usualmente recomendado es el de la fenatrolina. Sin embargo, los resultados obtenidos por distintos laboratorios pueden diferir entre sí en función de los métodos de toma y tratamiento de muestras empleados. Los límites permisibles están comprendidos en el rango 0-10 mg/l siendo 0,3 mg/l el autorizado para las aguas potables uno de los principales problemas que plantea el hierro y las sales ferrosas es el de la coloración del agua y de los productos de ciertas industrias en los que el color es un factor importante, este es el caso de las industrias de alimentación que tienen también a las fibras textiles, etc.

#### 1.7.12 Fluoruros

En algunos países no se ponen límites a la concentración a máxima de fluoruros en las aguas residuales. Sin embargo, debido al aumento de la fluoración de los abastecimientos de aguas, este control es cada vez más importante. Debido a la reacción del flúor con la sílice del vidrio que hay que emplear frascos de polietileno en la recogida de las muestras. No se deben utilizar recipientes que hayan contenido solu--

ciones de elevada concentración de fluoruros. Los métodos analíticos empleados son:

- Destilación con vapor o directa. Este método se emplea cuando existen iones interferentes, o la muestra es turbia o coloreada. El cloro se elimina añadiendo 5 mg de sulfato de plata por cada mg de cloro.
- Métodos colorimétricos. Si el error que se produce al utilizar este método es superior a 0,1 mg de sulfato de plata. Este método está interferido por la presencia de carbonato cálcico, aluminio, hierro, fosfatos y cloruros. El cloro residual se elimina por adición de arsenito.

#### 1.7.13 Sólidos disueltos

La legislación española sobre el vertido de aguas residuales (decreto del 30/XI/61) nada específica acerca de los sólidos disueltos. Una alta concentración de sólidos disueltos puede provocar diversos efectos, como por ejemplo, comunicar un sabor y olor desagradable al agua, e incluso, hacerla inservible para diferentes aplicaciones industriales.

La determinación de los sólidos presentes en el agua, se lleva a cabo por evaporación total y posterior secado en estufa, hasta peso constante de una muestra de agua de un volumen de muestra filtrada determinado.

#### 1.7.14 Materias en suspensión

La materia en suspensión enturba las aguas, la materia en suspensión se clasifica:

- Sedimento y no sedimentable
- Volátil y no volátil

La materia en suspensión provoca graves trastornos en la vida acuática impidiendo la penetración de la luz solar y, por consiguiente, retrasando la fotosíntesis. La materia en suspensión en grandes cantidades puede llegar a bloquear las tuberías de las plantas de tratamiento, provocando los daños consiguientes. La concentración máxima permitida internacionalmente para descarga de aguas residuales en las naturales es de 20-100 mg/l de sólido en suspensión. La legislación española señala un intervalo variable según el tipo de río de que se trate. La concentración máxima es de 100 mg/l. La materia en suspensión decantable, se determina por decantación reposada durante una hora en conos de Imhoff, expresándose el resultado en ml/m. La materia en suspensión no decantable se determina por evaporación total del agua y posterior secado en estufa a 110 grados centígrados hasta peso constante de una muestra de agua no filtrada tomada de la parte superior de los conos Imhoff del ensayo anterior, al cabo de una hora. La diferencia entre el valor determinado y los sólidos disueltos de la materia en suspensión no decantable.

## II T R A T A M I E N T O Q U I M I C O D E L A G U A

1 El propósito de esta monografía es recapitular los métodos y la tecnología asequible hoy en día para el tratamiento de aguas industriales; buscando cada vez más aguas eficientes que no tengan una alta concentración de impurezas.

Al reconocer la necesidad para métodos más efectivos en el tratamiento de aguas, se han desarrollado un número de caminos para lograr este fin. Esta tecnología nueva continúa siendo relacionada con los fundamentos básicos de la química del agua, por esto es necesario familiarizarse con los fundamentos que incluyen lo siguiente.

### 1.1 PH

Indica la acidez o alcalinidad de una sustancia o solución. La definición exacta de pH es el logaritmo del recíproco de la concentración del ión de hidrógeno. Los valores de pH existen de 0 (cero) a 14; el valor mediano es 7.0 y una solución con este pH se llama neutral. Valores de pH altos indican alcalinidad, valores bajo indican acidez.

#### 1.1.1 Alcalinidad, acidez

Además de moléculas H-O-H, el agua pura contiene iones de hidrógeno (H) e iones de hidroxil (OH<sup>-</sup>). La acidez o alcalinidad de cualquier solución depende, si

predominan los iones de hidrógeno (H) o los iones de hidroxil (OH<sup>-</sup>). Si se añade al agua una sustancia que suelta más iones (H) ésta se convierte en una solución ácida. Al añadir más iones (OH<sup>-</sup>), la alcalinidad de la solución sube. Si hay un ión (H) por cada ión (OH<sup>-</sup>), el efecto ácido balancea al efecto alcalino del opuesto. El resultado es una solución con un pH de 7,0. Al añadir una sustancia que neutraliza los iones (OH<sup>-</sup>), la solución se vuelve ácida; al añadir una sustancia que neutraliza los iones (H), la solución se vuelve alcalina.

#### 1.1.2 Alcalinidad total (M-)

Se obtiene al dosificar con ácido de control el lado metil naranja (pH 4,3) del indicador de pH. Así también se llama "metil naranja" o "alcalinidad M". La alcalinidad total expresada en p.p.m., equivalente a CaCO<sub>3</sub> es la alcalinidad en la forma de carbonatos, bicarbonatos e hidróxidos.

#### 1.1.3 Alcalinidad de bicarbonatos

Es la fracción de la alcalinidad total que está en la forma de bicarbonatos (HCO<sub>3</sub>). Cuando la alcalinidad -P es cero, toda la alcalinidad presente en la solución se considera estar en la forma de bicarbonatos

#### 1.1.4 Alcalinidad fenoltalcina (P-)

Generalmente se considera representar la alcalinidad contribuida por todos los hidrógenos o radical Hidró-

xido más la mitad de los carbonatos. Se determina la alcalinidad -P al dosificar con ácido de control en la fenoltaleína del indicador de pH (pH 8,3).

#### 1.1.5 Alcalinidad de hidróxidos (OH)

Es la fracción de alcalinidad total debido a la presencia de (OH-), o iones de hidróxidos en la solución cuando la alcalinidad total es igual a la alcalinidad P-, se supone que la alcalinidad esta compuesta enteramente de hidróxidos.

#### 1.1.6 Relaciones de alcalinidad

Son aplicables al tratamiento de aguas de enfriamiento y también al tratamiento de aguas para calderos. Se puede concluir lo siguiente que concierne a la alcalinidad de agua de enfriamiento o al agua de calderos.

- a) Si la alcalinidad P es menos de la mitad que la alcalinidad M, la alcalinidad está compuesta de bicarbonatos y carbonatos pero no de hidróxidos.

$$2p = \text{Carbonatos}$$

$$M - 2p = \text{Bicarbonatos}$$

- b) Esta relación quiere decir que si la alcalinidad P es exactamente la mitad de la alcalinidad M, la alcalinidad está compuesta solamente de carbonatos.

$$M = 2P = \text{Carbonatos}$$

- c) Si la alcalinidad P es mayor que la mitad de la

alcalinidad M, la alcalinidad está compuesta de carbonatos e hidróxidos.

$$2P-M = \text{Hidróxidos}$$

$$2(M-P) = \text{Carbonatos}$$

- d) Si la alcalinidad M es igual a la alcalinidad P, la alcalinidad está compuesta enteramente de hidróxidos.
- e) Si la alcalinidad P- es cero, la alcalinidad M, puede considerarse compuesta enteramente de bicarbonatos.

## 1.2 LA SOLUBILIDAD Y "LA SOLUBILIDAD INVERSA"

Se refiere a una o más materias que se disuelven en agua para formar una solución homogénea y, como tal, se consideran impurezas. Mienstra las impurezas estan en la solución estas dan pocos problemas. Las impuresas que se disuelven en agua existen como iones o como sustancias no-iónicas que existen en una solución sin dosificación iónica. Cada impureza tiene se grado de solubilidad o porcentaje de disociación en un solvente específico. El grado de la solubilidad depende de muchas cosas, incluyendo el pH y la temperatura del solvente. El grado de la solubilidad en la mayoría de impurezas aumenta con un aumento en la temperatura. Sin embargo, en el caso del calcio, magnesio, hierro, manganeso y sílice, estos forman sales y óxidos que son menos solubles al aumentar la temperatura

esto es la solubilidad inversa y es un factor principal en la formación de incrustaciones "de dureza". En la mayoría de los casos, los elementos asociados con incrustaciones de dureza tienen un nivel más bajo, en valores de pH alcalinos. Recíprocamente muchas sustancias de incrustaciones son solubles en aguas ácidas. Una excepción es el sílice el cual tiene un grado mayor de solubilidad en pH<sub>s</sub> de valores alcalinos.

### 1.3 GASES DISUELTOS

Son consideraciones importantes en el tratamiento de aguas. Entre éstos, los gases principales son el O<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S. Mientras el nitrógeno es un gas inerte el oxígeno corroe muchos metales. Ambos N<sub>2</sub> y O<sub>2</sub> existen en aguas de superficie y aguas aireadas pero muy poco existen en aguas de pozos profundos.

El dióxido de carbón libre existe en la mayoría de sus plidores de agua natural y puede disolverse en el agua de enfriamiento y aguas de calderas de aire, o por descomposición termal de las sales carbonadas en las calderas. El CO<sub>2</sub> disuelto en agua corroe muchos metales, puede acelerar la corrosión causada por el O<sub>2</sub> disuelto. El H<sub>2</sub>S es el gas que dá un olor a huevos podridos en el agua, y este corroe altamente la mayoría de los metales al disolverse en agua. La solubilidad de los gases en agua usualmente disminuye, mientras la temperatura en la solución aumenta. Las burbu-

jas que aparecen al calentar el agua son causadas por el aire que esta disuelto, el cual es menos soluble a temperaturas altas. La solubilidad, de todos los gases aumenta cuando la presión parcial del gas está por encima de la solución. Un ejemplo importante es el fenómeno que ocurre en calderas de vapor donde el  $\text{CO}_2$  producido por la descomposición termal del  $\text{CaCO}_3$  se disuelve en la fase de vapor gaseoso bajo presión y luego se condensa con vapor condensado al volver al sistema. Este factor contribuye a una corrosión acelerada.

#### 1.4 SATURACION

Es el nivel máximo de solubilidad o el límite de concentración de una sustancia disuelta en un solvente como agua. Para cualquier solvente o soluto un número grande de soluciones sin saturar pueden existir simultáneamente.

Sin embargo el proceso de agregar más soluto (impurezas) a un solvente como el agua, no puede ocurrir indefinidamente. Eventualmente, llega un punto, en el cual la adición de más material a la solución no produce una solución de concentración más alta. Al contrario el material permanece sin disolverse o hasta puede causar que salgan otros materiales de la solución. Este es un factor principal en la formación de lodos y depósitos en sistemas de aguas industriales.

### 1.5 PRECIPITACION

Puede considerarse lo contrario que el disolver materiales en agua. Cuando las impurezas que estaban previamente en la solución se transforman en sustancias que están sin disolver en agua, quiere decir que ha ocurrido una precipitación. En la mayoría de los casos la precipitación ocurre por que el equilibrio de saturación se ha excedido y la solución está demasiado saturada. Para llegar a un equilibrio nuevo, algunos de los materiales disueltos salen de la solución en forma de precipitado. Si la estructura del precipitado es cristalina, puede facilmente causar incrustaciones en las superficies de los intercambiadores de calor en los tubos de calderas. Si es amorfo o no cristalino, el precipitado puede contribuir a la formación de lodos o problemas de depósitos en las calderas y en los sistemas de agua de enfriamiento.

### 1.6 EL TDS-SS

Se refiere a la concentración de "sólidos totales disueltos" (TDS) en una solución tal como agua. Los sólidos suspendidos (SS) son las concentraciones de materiales particulares suspendidos o dispersados en el solvente. Los sólidos disueltos pueden ser de una cualquier variedad de sustancias. Aunque son de interes en aguas industriales; estos son principalmente calcio, magnesio, hierro o cationes de sodio (iones

de carga positiva); aniones de cloro (iones de carga negativa), bicarbonato, hidróxido y sulfato. Sílices, nitratos, fosfatos, nitritos; también pueden estar presentes sustancias orgánicas, las cuales todas contribuyen a la concentración TDS.

Cualquier sustancia disuelta en cantidades bastante altas que excede el punto de ebullición pueden precipitarse para formar sólidos en suspensión o depósitos de incrustaciones. Usualmente existe un equilibrio entre el TDS y el SS de cualquier sistema de agua. Este equilibrio puede fácilmente trastornarse debido a un cambio en los factores que limitan la solubilidad (es decir que aumenta la temperatura) o al introducir cantidades adicionales de impurezas (es decir contaminantes de agua, del agua de enfriamiento llevados por el aire). Este equilibrio contribuye a problemas de incrustaciones y depósitos en sistemas de agua industrial. Frecuentemente el TDS se mide al terminar la conductividad específica del agua. La conductividad es un método que mide la habilidad del agua para conducir una corriente eléctrica. Como los SS son sólido que no están en una solución verdadera, pueden medirse al removerlos del agua por el método de la filtración. El TDS es un factor importante en el fenómeno de la corrosión. El TDS intensifica el efecto corrosivo del  $O_2$  y  $CO_2$ , es decir que si hay muchos sólidos

disueltos, la conductividad del agua es alta y también la probabilidad de la corrosión. El SS influye en la corrosión por acción abrasiva que destruye metales y previene la formación normal de la corrosión el cual inhibe películas en las superficies metálicas. Sólidos suspendidos también pueden establecerse en la superficie metálica para formar corrosión tipo "pitting".

#### 1.7 EVAPORACION

Es un fenómeno físico donde las moléculas de agua van de la fase líquida a la fase de vapor. Este fenómeno no usa energía de calor, y en sistemas de aguas de enfriamiento el efecto neto es el enfriamiento de la fase del agua residual. La realidad significativa de la evaporación que ocurre en los sistemas de agua de caldera y sistemas de agua de enfriamiento es que la molécula de agua, va a la fase de vapor. Las impurezas que fueron disueltas o suspendidas en la fase líquida no se desprende del líquido residuo pero actualmente aumenta en concentración relativa mientras el proceso de evaporación ocurre. Hay muchos factores que controlan la tasa de evaporación en cualquier ambiente. Lo más importante en los sistemas de aguas industriales son la temperatura la presión de vapor del líquido, presión parcial alrededor de la fase de vapor, la temperatura de la bombilla mojada del ambiente del

cual se desprende el vapor de agua.

#### 1.8 DUREZA TOTAL

Es una presión para la suma de las concentraciones de iones metálicos polivalentes en el agua, incluyendo calcio, magnesio, hierro, aluminio, manganeso, cinc, estroncio, y otros. En los sistemas de agua industrial los más importantes son el calcio, magnesio y hierro. La solubilidad de las sales de estos metales es muy baja en las condiciones en las que se encuentran los sistemas de agua de calderas y agua de enfriamiento. Por ésto los suplidores principales de éstas incrustaciones en los sistemas son las sustancias "duras" las cuales se encuentran en el agua. Típicamente el agua de los suplidores de las superficies es blanda (contiene muy pocas sustancias duras), mientras el agua de suplidores bajo tierra son usualmente duras (contiene más de 50 p.p.m. de sustancias duras en la forma de  $\text{CaCO}_3$ ).

Cuando hay mucha dureza en el agua del suplidor, se usan procedimientos para ablandar el agua estos procedimientos son necesarios para remover los cationes indeseables del agua.

#### 1.9 CICLOS DE CONCENTRACION

Además de la inclusión de las impurezas en suplidores de agua, los CICLOS DE CONCENTRACION son las características más importantes en los sistemas de aguas in-

dustriales que se relacionan con la formación de incrustaciones, depósitos y corrosión. Los ciclos de concentración son una medida del nivel de los sólidos que están concentrados en agua que circula y en agua de calderas. Es el inverso de "BLOWDOWN" o pureza, y puede calcularse así:

$$\text{CICLOS DE C.} = \frac{\text{ppm (cloros) en agua que circula}}{\text{ppm (cloros) en agua de reposición}}$$

Esta ecuación indica que los ciclos de concentración se determinan por la relación de sólidos disueltos en el agua que circula a los sólidos disueltos en el agua de reposición. Los análisis cuantitativos de las concentraciones de cloro en cada agua se usan para determinar esta relación ya que se encuentran menos interferencias a causa de las precipitaciones, absorciones y así mismo por descomposición.

Mientras que el agua que circula por una torre de enfriamiento tiende a producir una reducción del volumen de evaporación y el viento. En la evaporación solamente el vapor de agua se descarga del sistema; los sólidos disueltos permanecen en la fase líquida y aumenta la concentración a un nivel de equilibrio con el agua perdida por evaporación y que es purgada por el sistema de "blowdown". La misma relación existe en las calderas de vapor donde los sólidos disueltos au-

menta en concentración y en proporción a la cantidad de agua evaporada y que es purgada por el sistema de "blowdown". El equilibrio de materiales para esta relación se puede expresar como sigue:

$$M=E+B \quad (1)$$

donde

M=la cantidad de agua de reposición que se añade

E=la cantidad de agua evaporada

B=la cantidad de agua perdida por corrientes, "blow-down" o purga

Como previamente se ha mencionado que los líquidos disueltos en sistemas de circulación abiertos se sacan por vientos "blowdown" o purga y por eso aumenta en concentración causada por evaporación. El factor de concentración (C) se expresa así:

$$C = \frac{M}{B} \quad \delta \quad C = \frac{(E+B)}{B} \quad (2)$$

El factor de concentración C, también se refiere comúnmente a "ciclos de concentración".

Al aumentar los ciclos de concentración se disminuye el requisito para el agua de reposición. Sin embargo, no es práctico el operar más allá de ciertos límites con los ciclos de concentración, no solamente porque los ciclos de concentración altos de sólidos disueltos aumenta la tendencia de formar incrustaciones, si no que también hay un efecto de retornos disminuidos,

mientras los ciclos aumentan. De la solución previa si  $C$  no equivale a 1.0, la cantidad de agua de reposición requerida a varios ciclos de concentración se puede expresar así:

$$M = \frac{EC}{(C-1)} \quad (3)$$

Por ejemplo en un sistema de agua de enfriamiento, si la cantidad de agua evaporada fuera  $30 \text{ m}^3/\text{h}$ , entonces la cantidad de reposición requerida a 1,2 ciclos sería  $180 \text{ m}^3/\text{h}$ .

$$\frac{(30 \text{ m}^3/\text{h}) (1,2)}{(1,2-1)} = 180 \text{ m}^3/\text{h}$$

Al aumentar los ciclos de concentración a 1,5 la reposición se reduce en un 50% dando  $90 \text{ m}^3/\text{h}$ .

$$\frac{(30 \text{ m}^3/\text{h}) (1,5)}{(1,5-1)} = 90 \text{ m}^3/\text{h}$$

Otra ecuación útil puede derivarse de la relación que permite la estimación de tasas de "blowdown" o purga de la tasa de evaporación.

$$B = \frac{E}{C-1} \quad (4)$$

Las tasas de adición y concentración de productos químicos para tratamiento de aguas son frecuentemente basadas en la última ecuación para sistemas de recirculación abiertos.

Mientras los ciclos de concentración en sistemas de

recirculación abiertos aumentan, algunas materias disueltas desaparecen del agua de circulación, es decir la precipitación del carbonato del calcio ( $\text{CaCO}_3$ ) para formar incrustaciones en las superficies de los intercambiadores de calor, y en estos casos, la concentración de materiales específicos en el agua de circulación, puede menos que lo esperado. La variación en el valor de los ciclos de concentración de "dureza" puede a veces proveer una indicación si las incrustaciones están formándose, disolviéndose o dispersándose. Este principio puede usarse al seguir la precipitación, absorción y descomposición de otros materiales los cuales están contenidos o agregados al agua de reposición.

El índice de estabilidad de Ryznar (R.S.I.), es una modificación de la ecuación teórica de Langelier para determinar el índice de saturación del agua. Este concepto trata con las condiciones de operación en las cuales el agua en particular está en equilibrio con el carbonato de calcio. Esta ecuación ha hecho posible predecir la tendencia del agua a precipitar el carbonato de calcio y potencialmente causar la formación de incrustaciones, o a disolver el carbonato de calcio, reduciendo así el potencial de formación de incrustaciones. La ecuación expresada, la interacción del pH, la concentración del calcio, concentración de

alcalinidad total, concentración del total de sólidos disueltos y la temperatura en relación a la solubilidad del carbonato de calcio en aguas con pH de 6,5 a 9,5. La ecuación original de Langelier, sin embargo, mide solo la tendencia direccional o fuerza de empuje del agua. No se puede usar como medida cuantitativa para predecir grados de severidad de la tendencia a la corrosión o a las incrustaciones. Por ejemplo, dos aguas diferentes, una con dureza baja y por lo tanto, corrosiva; y otra con dureza alta y por lo tanto, formador de incrustaciones puede tener el mismo valor derivado de la ecuación de Langelier. El R.S.I., como lo propuso Ryznar, permite distinguir entre los dos tipos de aguas. El R.S.I., está basado en estudios donde se observan diferentes tipos de aguas con diferentes puntos de saturación bajo condiciones reales de operación. Por lo tanto es posible predecir cuantitativamente el grado de formación de incrustaciones corrosividad del sistema a tratarse. El R.S.I., se usa para seleccionar los productos químicos apropiado a usarse para el control de incrustaciones y corrosión, así como también para definir los límites del control de operación para una eficiente operación del sistema bajo tratamiento. La aplicación del R.S.I., como parte de la tecnología moderna para el tratamiento de agua de enfriamiento industrial y agua de proce

so ha sido muy significativo en la prevención de incrustaciones y corrosión. Lo que se observará más adelante será la derivación del índice de saturación de Langelier y el procedimiento para calcular el R.-S.I., ésta observación provee los datos necesarios para los cálculos, y ello es una ilustración gráfica de los grados de tendencia a la corrosión y a la formación de incrustaciones para los diferentes valores del R.S.I..

## 2 METODO PARA CALCULAR EL INDICE DE SATURACION (LANGELIER) Y EL INDICE DE ESTABILIDAD (RYZNAR)

El índice de Langelier o índice de saturación de carbonato de calcio del agua de enfriamiento es importante para predecir la tendencia a la corrosión y a la formación de incrustaciones. El uso de éste índice aparece discutido en este reporte. Para computar éste índice es necesario saber (1) La alcalinidad total, (2) La dureza del calcio, (3) El pH, (4) La concentración aproximada del total de sólidos disueltos, y (5) La temperatura máxima del agua.

Para determinar el índice de saturación, es necesario obtener los valores A, B, C, y D de la figura 2 y calcular el pH de saturación como sigue

$$PH_s = (9,3 + A + B) - (C + D)$$

Entonces usando el pH real del agua, calcular el índice.

INDICE DE SATURACION=PH-PH<sub>s</sub>

Si el índice de saturación es cero el agua está en balance químico. Si el índice es positivo, se indicaran tendencias a incrustaciones. Si el índice es negativo se indicaran tendencias corrosivas.

El índice de estabilidad de Ryznar es una modificación del índice de saturación Langelier.

INDICE DE SATURACION=2PH<sub>s</sub>-PH

Todos los valores de índice de estabilidad serán positivos y los valores sobre 6,5 indican una tendencia corrosiva mientras los valores bajo 6,0 indican una tendencia a formar incrustaciones.

TABLA 2

DATOS PARA CALCULAR LOS INDICE DE SATURACION Y ESTABILIDAD

SOLIDOS TOTALES	A	DUREZA DEL CALCIO	C	ALCALINIDAD TOTAL	D
ppm		ppm CaCO <sub>3</sub>		ppm CaCO <sub>3</sub>	
50 - 350	0,1	10	0,6	10	1,0
400 - 1100	0,2	12	0,7	12	1,1
		14	0,8	14	1,2
TEMPERATURA	B	18	0,9	18	1,3
		23	1,0	23	1,4
C	F	28	1,1	28	1,5
0	32	35	1,2	36	1,6
2	36	44	1,3	45	1,7
7	44	56	1,4	56	1,8
10	50	70	1,5	70	1,9
14	58	88	1,6	88	2,0
18	64	111	1,7	111	2,1
22	72	139	1,8	140	2,2
28	82	175	1,9	177	2,3

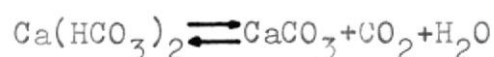
TABLA 2 (continuación)

32	90	1,8	230	2,0	230	2,4
38	100	1,7	280	2,1	280	2,5
44	112	1,6	350	2,2	360	2,6
51	124	1,5	440	2,3	450	2,7
57	134	1,4	560	2,4	560	2,8
64	148	1,3	700	2,5	700	2,9
72	162	1,2	870	2,6	880	3,0
82	180	1,1	1050	2,7		

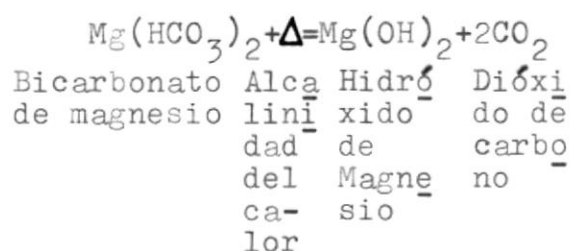
Las incrustaciones se pueden definir como la formación de una capa dura o incrustaciones que están en las superficies de las calderas y de los sistemas circulatorios que tocan el agua; el mecanismo de formación de incrustaciones es básicamente el mismo en todos los medios del agua. Desafortunadamente estas incrustaciones se forman donde menos se puede tolerar, en estos lugares se encuentran las condiciones propicias para la precipitación de los materiales de incrustaciones en áreas que tienen un alto nivel de transferencia de calor y tasas de evaporación altas, hay un aumento significativo en la incrustación de los sólidos disueltos y generalmente ésta excede el punto de saturación de las condiciones de temperatura localizadas.

Muchos de los sólidos disueltos en el agua que alimentan a las calderas y en el agua de reposición de los sistemas de enfriamiento, se precipitan en el proceso esto es así por una o dos razones, cambios de químico en el agua durante el proceso, y las propiedades de

solubilidad inversa de algunas sales. Uno de los cambios químicos más significativo que ocurren es la conversión de iones de bicarbonatos en iones de carbonatos, esto es  $(\text{HCO}_3^-)$  a  $(\text{CO}_3)$ . El efecto neto será la producción de carbonatos que se combinará con calcio para formar carbonato de calcio, el cual es un material relativamente insoluble. La descomposición del bicarbonato de calcio ocurre por que los efectos de concentración y calor cambian el equilibrio expresado por la ecuación:



Las sales de magnesio y las sales de hierro así como también sulfato de calcio, fosfato de calcio, silicatos y otros son también producidos por cambios en la química del agua en proceso, por ejemplo:



Muchas sales que no son totalmente insolubles en calderas y en aguas de enfriamiento circulante, frecuentemente se precipitan en superficies de intercambiadores de calor a medida que la temperatura de la solución aumenta. Estos materiales llegan en solución al lugar de los depósitos, pero generalmente tienen pro-

piedades de solubilidad inversa; esto es solubilidad decreciente con temperatura creciente. La precipitación que se forma de éste modo es típicamente muy homogénea y las incrustaciones tendrán una estructura cristalina.

Otras incrustaciones son menos homogéneas en su composición y generalmente se forman de un modo diferente. Estas ocurren cuando se ha excedido el punto de saturación de un material dado por el aumento en la temperatura localizada y por concentración excesiva. La precipitación de materiales solubles inversos forman partículas; los factores de control para la formación de incrustaciones en esta situación son las cargas en las superficies de las partículas individuales. Fuerzas opuestas tienden a influenciar las partículas en el agua de circulación, y así también las partículas con cargas opuestas se atraen para formar en los depósitos incrustaciones. La alta velocidad del flujo de agua contraresta esta atracción y así previene la formación inicial de depósitos. Sin embargo en lugares de baja velocidad, la atracción de las cargas puede ser mayor entre las superficies de intercambio de calor y las partículas que permiten deposición. Una vez que ha comenzado a depositarse, muchas partículas heterogéneas se juntan o se pegan unas a otras por medio de pega intra-particular. Algunas de las partícu-

las que quedan sueltas son atrapadas en un enrejado de partículas juntas, de esta manera la incrustación se "endurece" cuando las cargas de la superficies de la masa aumentan y ocurre una pérdida en el "agua de hidratación". Frecuentemente se encuentran depósitos de incrustaciones que contienen óxido de hierro, fosfato de calcio, sulfato de calcio y algunas sales de silicato en forma de óxidos y de hidratos.

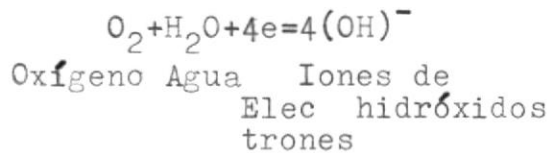
El mecanismo mediante el cual se forman las incrustaciones, tienen una consideración importantes al desarrollar métodos y procedimientos para preveer la formación de incrustaciones tanto en calderas como en sistemas de agua de enfriamiento.

2.1 El término corrosión se asocia generalmente con el procedimiento o proceso de deterioro de los metales y sus aleaciones. El hombre ha tomado materiales de la naturaleza, tales como el hierro y los ha hecho termodinámicamente inestables de forma tal que pueden usarse para un propósito específico. Hay varios mecanismos que ocurren continuamente para convertir los materiales hecho por el hombre a una condición termodinámica estable. Estos materiales son reacciones químicas o electroquímicas. La concentración de electrolitos por evaporación y saturación de agua con  $O_2$  en un sistema de recirculación abierto y de una pasada produce condiciones para el establecimiento de célu-

las de corrosión. Las altas temperaturas, las altas concentraciones de electrolitos y la presencia de ppm de O<sub>2</sub> crean condiciones ideales para la formación de células de corrosión en calderas. Las células de corrosión consiste de un polo ánodo y un polo cátodo, en donde los metales ferrosos disuelven los iones ferrosos en el ánodo con el flujo correspondiente de electrones del ánodo al cátodo. La reacción del ánodo es:



En la reacción del cátodo con un pH neutral y elevadamente alcalino, el oxígeno se reduce como está demostrado en la reacción siguiente.



Hay varios factores que influyen en el establecimiento de células de corrosión. Estos pueden clasificarse como; factores externos, los cuales incluyen las características del ambiente, el pH del agua, temperatura, tasa de flujo de agua, gases disueltos, etc. , y los factores internos que son los inherentes del metal en sí.

Los gases disueltos y en particular el O<sub>2</sub> son factores importantes en el mecanismo de corrosión. La solu

bilidad del oxígeno en agua depende de la temperatura y de la presión. A mayor presión mayor solubilidad; a mayor solubilidad mayor presión; a mayor temperatura, menos solubilidad. Las células de aereación diferenciales pueden causar corrosión extensiva. Los cátodos se desarrollan donde las concentraciones de  $O_2$  son altas. Los ánodos se desarrollan donde las concentraciones de  $O_2$  son bajas, y las posibilidades corrosivas ocurren en los ánodos.

Los productos marginales de la corrosión crean condiciones anaeróbicas más extensas, el ánodo se forma progresivamente más grande causando así una corrosión acelerada.

La corrosión de éste tipo produce condiciones fácilmente identificables en forma de hoyos o depresiones en la superficie del metal. Cuando ocurre corrosión de hoyos (pitting corrosión), el efecto es como si la misma pérdida del metal ocurriera sobre un area grande, la corrosión intensa en los hoyos causa una penetración más profunda del metal y un fallo más rápido en estos puntos. Este tipo de corrosión se puede encontrar en los tambores de vapor de calderas, en los tubos y tambores de las calderas de fuego, en intercambiadores de calor de los sistemas recirculatorios de enfriamiento por agua y en lugares localizados en sistemas circulatorios cerrados.

El pH es un factor activo en la corrosión, particularmente en valores cerca de 4,3 el cual vendría a ser una región de acidez mineral libre. A mayor concentración de iones de hidrógeno, (esto es pH bajo) mayor será la intensidad diferencial anódica catódica, aumentando así la tasa de corrosión.

Un pH bajo aumenta también la solubilidad de ciertas sales y óxidos que forman una capa protectora en la superficie de los metales. Al remover ésta capa protectora se acelera la corrosión.

La concentración de sólidos disueltos en el agua son directamente proporcional a las tasas de corrosión, hasta cierto punto cuando la concentración de electrolitos disueltos aumenta; el potencial de corrosión también aumenta. Una vez alcanzada la conductividad eléctrica optima del agua, el aumento de los sólidos disueltos no juega papel importante en las tasas de corrosión crecientes. Sin embargo cuando ciertos materiales alcanzan el punto de saturación de depósitos puede contribuir al establecimiento de células de corrosión. Además iones agresivos como son los cloruros y sulfatos atacan las capas protectoras anódicas de los metales y aceleran aún más el proceso de corrosión. La temperatura afecta a las tasas de diferentes reacciones químicas incluyendo las envueltas en corrosión. Generalmente un aumento de corrosión responde a

un aumento en la temperatura. A medida que la temperatura aumenta, la viscosidad del agua disminuye y la tasa de difusión del  $O_2$  aumenta. La conductividad eléctrica aumenta a temperaturas más altas y produce un efecto similar a los aumentos de sólidos siendo estos disueltos. La corrosión de hoyos aumenta donde los componentes de los metales adyacentes tienen diferentes temperaturas, con la sección anódica caliente a la sección fría.

Sin embargo todos los factores que influyen en la corrosión son interdependientes. Algunos metales mostraron un aumento en la tasa de corrosión seguido de una disminución de la corrosión cuando la temperatura subía, esto sucedió así por que el nivel del oxígeno en la solución a sido agotado a medida que la temperatura de la corrosión a seguido aumentando.

En sistemas de circulación abierta, un aumento en la tasa del flujo de agua tiende a acelerar el grado de corrosión lateral o de superficie. Este aumento de corrosión es causado por el efecto de dipolarización del oxígeno. A medida que la tasa del flujo aumenta, la cantidad de  $O_2$  que entra a el sistema también aumenta y acelera la reacción catódica. Frecuentemente los sólidos suspendidos en el agua actúan como materiales abrasivos, los cuales remueven las capas de óxido en el ánodo. Esto también acelera la corrosión en

áreas localizadas. La corrosión que ocurre por el contacto con metales disimilares se conoce como corrosión galvánica, este mecanismo está relacionado con el establecimiento de una fuerza electromotriz creada por el electrodo potencial entre dos metales. Este potencial se expresa en la serie galvánica o electromotora de metales y aleaciones. Sin embargo las series electromotoras no se pueden interpretar como una indicación precisa del grado potencial de corrosión galvánica por que el potencial de corrosión de diferentes metales se puede alterar por la concentración de iones temperatura u otros factores que contribuyen a un ambiente corrosivo.

### 3 FUNDAMENTOS DEL CONTROL DE MICROORGANISMOS

La mayoría de los problemas relacionados con los sistemas industriales de enfriamiento por agua de proceso son causados por una microflora mixta. Esta microflora mixta consiste de algas, bacterias y hongos. Un solo tipo de microorganismos o gérmenes es rara vez responsables por los problemas operacionales mayores en aguas industriales. Sin embargo cada uno de los grupos de microorganismos se caracterizan por propiedades fisiológicas únicas, y desde luego que muchos de estos grupos tienen características comunes. Para identificar los problemas microbiológicos y tomar pasos para el control de éstos es necesario tener un

conocimiento básico de los requisitos para el crecimiento y para los procesos fisiológicos de los diferentes grupos de microorganismos mencionados arriba.

### 3.1 Algas

Las algas que se encuentran comunmente en los sistemas de enfriamiento todas son unicelulares o filamentosas. Tienen la capacidad de generar grandes masas de materia orgánica en un corto período de tiempo bajo condiciones óptimas de crecimiento.

Una de las características únicas de las algas que crecen en los sistemas de enfriamiento por agua es que éstas necesitan luz solar para una parte de su ciclo de crecimiento. Por lo tanto estas algas se encuentran en lugares del sistema expuestos a la luz. Estas algas se pueden encontrar en otras partes del sistema, pero generalmente estas han sido transportadas allí por el flujo del agua. Este es un factor importante en el cuadro total del problema microbiológico por que las algas no solamente forman depósitos, si no que ellas mismas sirven de alimento para los otros microorganismos que pueden crecer en el sistema.

### 3.2 Bacterias

Las bacterias son un grupo muy diversos de microorganismos. Se caracterizan por ser organismos unicelulares muy pequeños en tamaños. Sin embargo, son capaces de crear problemas operacionales en los sistemas de

enfriamiento por agua. Las bacterias juegan un papel muy importante en el equilibrio biológico total de los ambientes acuosos. El hecho de que son pequeñas en tamaños quede contrarestando por su habilidad para reproducirse muy rápidamente, se reproducen por directa fisión a razón de una, cada 30-40 minutos. Esto crea una población que crece logarítmicamente formando grandes colonias de masas pegajosas en corto tiempo. Las bacterias crecen bajo una gran variedad de condiciones. Las hay del tipo aeróbico las cuales necesitan  $O_2$  para vivir, y las del tipo anaeróbico las cuales no crecen presencia de  $O_2$ . Además, las hay del tipo facultativas, las cuales crecen con o sin  $O_2$ . Las bacterias pueden crecer en una variedad de  $pH_s$ ; sin embargo, aparentemente la tendencia a tener problemas bacteriales es mayor en sistemas de aguas con  $pH_s$  neutrales o alcalinos. Las temperaturas típicas de los sistemas de enfriamiento por agua se consideran temperaturas óptimas para el crecimiento de muchos tipos de bacterias. Muchas bacterias son capaces de generar su propio alimento, otras tienen la capacidad de utilizar la mayoría de las materias que se encuentran comunmente en los sistemas industriales de agua. Algunas bacterias usan hierro, sulfuro y otros metales como fuente de energía para su metabolismo.

### 3.3 Hongos

Los hongos son grupos de microorganismos muy diverso que existen en los sistemas de enfriamiento de agua. Estos son generalmente más grande de tamaño que las bacterias y son tambien filamentosos. La tasa de reproducción es más baja que la de las bacterias pero tienen la misma habilidad de crecimiento poblacional logarítmico porque cada generación puede producir billones de bacterias. Esto se logra mediante la producción de esporas o semillas y tambien mediante la propagación negativa o fragmentación. Los hongos producen masa micediales o esteras que son muy resistentes a ambientes extremos. Las algas y las bacterias en el ambiente proveen una nutrición adecuada para el crecimiento de hongos; sin embargo, muchos de los hongos tienen la capacidad de digerir aceites, sales orgánicas e inorgánicas y hasta madera. Temperaturas altas, por ejemplo sobre 45 grados centígrados reducen la tasa de crecimiento de muchos tipos de hongos. Sin embargo la mayoría de los hongos pueden sobrevivir a temperaturas de cerca de 100 grados centígrados; muchos hongos han desarrollado mecanismos de defensa sofisticado contra los extremos ambientales. Cuando las limitaciones del ambiente han sido removidad, los hongos continuan su ciclo de crecimiento de un modo aun más vigoroso.

3.4 El crecimiento de bacterias, hongos, algas y o-

tros tipos de microorganismos en las torres de enfriamiento, superficies que transmiten calor y otras partes del sistema producen depósitos microbiológicos y ensucian el área. Las bacterias y los hongos que forman lama son responsable por la formación de lama microbiológicas en las tuberías en las partes cerradas del sistema incluyendo las superficies de transferencia de calor. En la superficie de las torres de enfriamiento que están expuestas a la luz solar, las algas son las responsables por el sucio en las superficies. Pequeños crustáceos tales como las almejas, lapas y ostras que se encuentran en los sistemas de agua de mar pueden causar problemas especiales de suciedad. Los depósitos biológicos pueden ser tan abundantes en sistemas de enfriamiento que obstruyen el flujo libre del agua del aire y el peso es tal que baja los miembros estructurales de las torres de enfriamiento, a veces hasta el punto de romperlos. Por otra parte, hasta las capas de lama muy finas en la superficie de transferencia de calor tienen un efecto adverso muy pronunciado en la eficiencia de los sistemas de enfriamiento.

Las algas difieren de las bacterias y de los hongos ya que estas normalmente producen su propio alimento por fotosíntesis; por lo tanto, necesitan la luz solar, así como también agua y aire .

Las algas pueden crecer en las aguas tibias de los tanques de duchas y en las bandejas de agua de distribución abierta de las torres de enfriamiento que están expuestas a la luz del sol. Las masas de algas pueden obstruir las aberturas en las bandejas de distribución y también pueden tapar las mallas y obstruir el flujo en las tuberías. Las algas más problemáticas en los sistemas de torres de enfriamiento son las algas azul verdosas y las algas verdes, pero diatomeas y otros tipos también se encuentran en los depósitos de las torres de enfriamiento.

Como las bacterias y los hongos son basadas en excepciones, no utilizan el proceso de fotosíntesis para el crecimiento, no necesitan la luz solar y pueden crecer en partes cerradas del sistema de enfriamiento por agua. Las bacterias encapsuladas son una de las bacterias más problemáticas las cuales forman una capsula gelatinosa en la cual atrapa basura, protege la bacteria contra ataques químicos y físicos, y ayuda a mantener juntas las masas de lama.

Los hongos que más contribuyen al sucio microbiológico son los hongos filamentosos del tipo de moho y del parecido a la levadura. Estos tipos de hongos se asocian generalmente con el deterioro de la madera usada en la construcción de las torres de enfriamiento. Al discutir el sucio microbiológico se debe hacer men-

ción especial a la bacteria del hierro, la bacteria de azufre y la bacteria que reduce el sulfato. La bacteria del hierro es un organismo de agua dulce que utiliza el hierro en el metabolismo y deja depósitos de óxido de hierro en las paredes de los tubos y del equipo. Por lo general, son filamentosas y las células están rodeadas de una capa babosa y forman una lama voluminosa que puede obstruir severamente el flujo de agua. La bacteria de azufre puede oxidar el azufre y reducir los compuestos de azufre ya que éstos están presentes en el agua que contiene "sulfuro de hidrógeno" u otros compuestos del azufre. El tipo de bacteria filamentosa es el principal contribuidor al sucio que se forma en los sistemas de enfriamiento por agua, pero ciertas especies de bacterias de azufre pueden causar problemas de corrosión por que éstas producen cantidades considerables de ácidos de azufre tanto las bacterias de hierro como las de azufre así como la mayoría de los organismos que causan suciedad, son aeróbicos y funcionan muy bien en las aguas altamente aireadas de los sistemas recirculatorios abiertos. Por el otro lado, las bacterias que reducen los sulfatos son anaeróbicas y necesitan un ambiente libre de oxígeno para su crecimiento. Por lo tanto, en los sistemas de enfriamiento por agua aireados estas bacterias crecen solamente en áreas donde se ha ago-

tado el oxígeno de otros depósitos microbiológicos. Las bacterias que reducen los sulfatos forman sulfuros de hidrógeno el cual no solo causa malos olores, si no que es corrosivo al acero y otros metales. Como mencionamos anteriormente la microflora de un sistema de enfriamiento por agua existe como una mezcla de muchos tipos de microorganismos. Esta comunidad compleja de microorganismos establece un equilibrio biológico con los factores que controlan el crecimiento que se encuentra en el ambiente, esto es temperatura, pH, gases disueltos o despachados, fuentes de alimentos, etc. Las condiciones que controlan el crecimiento cambian cuando se encuentran en un ambiente dinámico como del sistema de enfriamiento por agua cuando ocurre esto, todos o algunos de los miembros de la microflora mixta responden aumentando o disminuyendo en número. Esto causa un cambio en el equilibrio biológico y puede resultar un problema en los lugares localizados en los sistemas. Numerosos estudios realizados en laboratorios y en sistemas operacionales reales han demostrado que la población sigue una curva de crecimiento microbiológico típico bajo esas circunstancias. La curva de crecimiento consiste de varias fases que incluyen la fase latente, la fase logarítmica, la fase estacionaria y la fase de decadencia la fase latente es una etapa que dura hasta que algun

factor del ambiente estimula la población para acelerar la tasa de reproducción en números logarítmicos y así pasando a la fase logarítmica; la duración de la fase logarítmica dependerá de como el ambiente se ha estabilizado en condiciones adversas para limitar la tasa de reproducción de la población total. Si el ambiente no es estable, entonces las probabilidades son pocas de que la fase latente sea larga; sin embargo, si el factor adverso en el ambiente es estable y consistente, como lo es la presencia de una sustancia tóxica, entonces la fase latente puede durar por un período de tiempo indefinido. A medida que la población pasa de la fase latente a la fase logarítmica, el número de los diferentes tipos de microorganismos aumenta a una tasa limitada solamente por la inestabilidad del ambiente. Este crecimiento es casi como una reacción en cadena y la población alcanza números mucho mayores que los alcanzados durante la fase latente, aunque las condiciones ambientales han vuelto a circunstancias similares. La fase logarítmica termina cuando el ambiente no puede soportar un crecimiento rápido. Así se pasa a la fase estacionaria; es en esta fase, que las tasas de reproducción y de mortalidad de la microflora son estáticas. La fase estacionaria continúa hasta que el ambiente cambia de nuevo para proveer el estímulo para una nueva fase logarít-

mica de crecimiento, o las condiciones simplemente no soportarán una tasa de reproducción igual a la tasa de mortalidad de la población total. Cuando ocurre esto último, la población entra en una fase de decadencia y el número de microorganismos viables, disminuye desafortunadamente la fase de decadencia es muy rara en ambientes dinámicos tales como el de los sistemas de recirculación abierta o los de una sola pasada. La fase de decadencia ocurre en los sistemas de recirculación cerrados fríos/calientes; sin embargo, cuando esto ocurre es por que la población ha alcanzado numerosos problemas que aumentan o causan muerte por hambre o asfixia por si misma.

El poder reconocer la fase de crecimiento en la cual la población existe, provee información importante para poder controlar el crecimiento de los microorganismos que causan problemas. El entendimiento del concepto de equilibrio biológico en un sistema dinámico provee las fases para establecer la frecuencia a la cual se debe administrar el microbicida y hasta cierto punto se puede determinar la concentración necesaria para mantener el sistema libre de crecimientos microbiológicos.

El objetivo básico de controlar en crecimiento de microorganismo en los sistemas de aguas industriales es la preevención de los problemas asociados con su cre-

cimiento. El propósito de éste no es esterilizar el sistema. Los procedimientos para el control industrial microbiológico han sido desarrollados de un signúmero de fuente; sin embargo, éstos están basados en sentido común y lógico. Lo primero que tenemos que admitir es que la preevención de problemas microbiológicos es más práctico y posible que el tratar de eliminar el problema microbiológico una vez que está fuera de control es debido a negligencia o debido a circunstancias imprevistas. Por lo tanto, los métodos usados para el control de problemas microbiológicos deben incluir protección contra negligencias y ser lo suficientemente flexibles como para reaccionar a circunstancias imprevistas. Un buen programa de control microbiológico debe utilizar material de amplio espectro que tienen la habilidad de controlar una gran variedad de microorganismos incluyendo bacterias, hongos y algas. Estos materiales de amplio espectro deben ser efectivos bajo gran variedad de condiciones. En los sistemas de enfriamiento por agua hay muchas condiciones diferentes que afectan la actividad de un "biocida" o un "bioestático"; así que un material de amplio espectro debe funcionar bajo todas estas condiciones.

Los materiales usados corrientemente para el control del crecimiento de microorganismos están clasifica-

dos como biocidas y bioestáticos. Los biocidas matan los organismos y los bioestáticos impiden su crecimiento y reproducción. Si se usa un biocida o un bioestático, dependerá en parte de la fase de crecimiento en el cual existe la población. Es deseable que el programa de control microbiológico mantenga la población en la fase latente, en números bien por debajo del nivel crítico. La población se puede mantener en esta fase si el ambiente contiene un factor adverso de crecimiento y reproducción de la microflora. El factor adverso tiene que estabilizarse en una etapa consistente de manera tal que la población no pase de la fase logarítmica de crecimiento bioestático de amplio espectro creará una condición estable que mantendrá la población en la fase latente. La frecuencia de la aplicación dependerán de la persistencia del material en el sistema y del efecto residual que sea posible mantener.

Un biocida amplio de espectro se puede usar para lograr el mismo objetivo. La diferencia será que la actividad del material será intermitente. La aplicación del biocida al ambiente se hace a diferentes tiempos de manera que la población nunca alcance una tasa de crecimiento en proporciones logarítmicas. Es necesario mantener una concentración de biocida suficiente como para proveer suficiente tiempo de contacto para

matar los segmentos más importantes de la microflora. Para entender el enfoque desde el punto de vista del tiempo de contacto/residuo, debe considerarse como una reacción química típica. El residuo requerido debe ser parecido a la concentración necesaria para lograr el esfuerzo necesario para comenzar una reacción química. Una vez que ha comenzado la reacción, el tiempo requerido para completarla es el tiempo necesario de contacto para el control biológico.

El bioestático se puede usar solamente cuando la operación del sistema de agua industrial se puede mantener en una condición relativamente estable. Si el sistema es operado bajo un itinerario interrumpido, o existen extremos en las condiciones de operación tales como carga de contaminación alta o mucha agua de reposición en un mismo tiempo, entonces resulta muy difícil operar bajo condiciones estables.

Las condiciones de operación variable de un sistema inestable pueden producir dificultades al tratar de mantener un efecto bioestático en el sistema. Cuando esto ocurre, no se puede lograr un control efectivo de los microorganismos con un material que es básicamente bioestático en actividad. Por lo ya mencionado se aconseja utilizar un material que sea biocida en actividad; la aplicación de choque en un biocida no depende de la estabilidad del ambiente de operación.

Una concentración y tiempo de contactos suficientes del biocida mantendrá la población en bajos números cuando la frecuencia de la aplicación está de acuerdo con la existencia de condiciones favorables para el crecimiento de microorganismos. Esto quiere decir desde luego, que a medida que las condiciones son más favorables para el crecimiento, las aplicaciones deben ser más frecuentes y quizás se necesitaran mayores concentraciones de biocida.

Las aplicaciones de choque de biocida se usan para reducir la población que existen en la fase estacionaria en números que exceden el nivel crítico donde ocurren problemas. Es bajo estas circunstancias que es necesario limpiar bien el sistema antes de que se pueda implementar de nuevo el programa de prevención y control.

Este procedimiento de limpieza se puede llevar a cabo mientras el sistema de enfriamiento por agua esté en operación solo si la cantidad de depósitos y masas microbiológicas presentes no taparen el sistema cuando se despegaran. Generalmente se usa un dispersante orgánico junto al biocida para ayudar a impedir que la basura tape los tubos de el intercambiador de calor, las mayas y los filtros; la cantidad de depósitos y basura es frecuentemente demasiado como para impedir que tapen el sistema. En estos casos el proceso debe

pararse y hacer una limpieza mecánica y química completa, vaciar toda el agua y empujar el sistema con agua que contenga un biocida para matar todos los residuos. Una vez que esto se halla terminado, se debe llevar a cabo un proceso de rutina para prevenir que ésto suceda de nuevo.

### III 1. SISTEMA DE CLARIFICACION

En ésta sección se describe la operación manual del sistema de clarificación del agua cruda y sistema de distribución del agua cruda dosificada (más adelante llamada como agua de refinería).

El objeto de ésta sección es proporcionar una descripción de flujo y explicación del sistema, procedimiento para precomisión, etc., y suministrar una fuente de referencia para resolver los problemas operacionales.

#### 1.1 TEORIA SOBRE LA CLARIFICACION

##### 1.1.1 Reactor envirex

Los reactores envirex son usados para la parcial suavización y clarificación de aguas para procesos o aplicaciones industriales y municipales. Los reactores envirex son recomendados para todos los procesos de precipitación y absorción con agua fría; pueden ser efectivamente usados para extraer o reducir la

dureza, sólidos suspendidos, turbiedad, color, y olor. El reactor envirex puede ser empleado para realizar cualquiera de los siguientes procesos para tratamientos fríos:

1. Clarificación
2. Suavizamiento
3. Control de calidad
4. Reducción de hierro
5. Absorción de sílice

#### 1.1.2 Clarificación

La clarificación del agua requiere la completa extracción de toda la materia suspendida del agua. Toda la materia no disuelta (materia suspendida) presente en el agua pueden ser divididas en dos clases generales de acuerdo a su tamaño y tipo de suspensión; hay partículas relativamente grande las cuales son arrastradas junto con el agua; y hay también partículas coloidales las cuales son arrastradas por las cargas electroestáticas presentes en cada partícula.

Estas partículas coloidales son muy pequeñas en tamaño y debido al campo electroestático que rodea a cada partícula están uniformemente de alguna manera dispersadas; el color es generalmente un resultado de estas partículas coloidales.

Las partículas grandes de materia suspendida son relativamente fáciles de extraer, por filtración o por

permanencia, si la velocidad del agua se reduce de tal manera que no puedan ser arrastradas debido a la acción hidráulica del agua.

Las partículas coloidales no pueden ser fácilmente extraídas por la filtración ordinaria, sin embargo debido a las cargas electrostáticas de dichas partículas es posible observarlas sobre el área superficial de un adecuado coagulante precipitador. Este floc con las partículas coloidales absorbidas pueden entonces ser extraídas de la solución por sedimentación o filtración.

Para la extracción de la materia suspendida, turbiedad y color se utiliza un coagulante usualmente sulfato de aluminio que se agrega al agua.

### 1.1.3 Permanencia

Permanencia es el proceso por el cual se permite la sedimentación de la sustancia suspendida en el agua. El principal propósito del agua con respecto a la permanencia es efectuar la clarificación de la misma, permitiendo la sedimentación de la materia suspendida y la consecuente reducción de la turbiedad. La permanencia es de valor primordial en la extracción de las partículas gruesas las que se asientan rápidamente y pueden ser extraídas más económicamente por este método que por coagulación.

Todas las partículas más densas que el agua poseen

una tendencia a sedimentarse debido a la influencia de la gravedad. El tiempo requerido para la sedimentación depende de varios factores tales como densidad, forma, tamaño, junto con la viscosidad y resistencia friccional del agua.

Las partículas de una alta gravedad específica naturalmente se sedimentará a una razón más alta que aquellas cuya gravedad específica es ligeramente mayor que la del agua, la viscosidad del agua es también un factor de mucha influencia en la sedimentación, pues la viscosidad del agua depende de la temperatura de la misma.

La permanencia ordinaria generalmente no produce un agua lo suficientemente baja en turbiedad para ser aceptada en los propósitos de servicios domésticos; ni aceptadas para requerimientos industriales por tanto la coagulación es necesaria.

#### 1.1.4 Coagulación

Es el proceso por el que las partículas finamente divididas de turbidez y color capaces de mantenerse en suspensión son combinadas por medios químicos en vasos lo suficientemente grandes que permiten una rápida alimentación. Para la extracción de la turbiedad y color del agua es necesario usar un coagulante tal como el sulfato de aluminio, con el objeto de preparar el agua para la clarificación por sedimentación.

y filtración; el coagulante agregado actúa de tres maneras:

- a) Un ión trivalente positivo se forma, el cual es extremadamente efectivo para precipitar coloides negativos
- b) Un ión divalente negativo ( $SO_4$ ) se forma, el cual es efectivo en precipitar los coloides positivos
- c) Un precipitado loculante pesado se forma el cual extrae grandes cantidades de materia suspendida o coloidal del agua por absorción.

Este tercer proceso efectuará la aglomeración de las partículas suspendidas haciendo de éste modo que el agua sea más rápidamente filtrada y causando de ésta manera que gran cantidad de la materia coagulada se sedimente antes que se realizare la filtración.

Las reacciones de coagulación pueden ser escritas simplemente mostrando el uso de los precipitados de las sales de aluminio para formar un floc de hidróxido de aluminio, aunque éstas reacciones son demostradas de la manera más simple, la coagulación es un fenómeno mas complejo que el ilustrado. La precipitación de los coagulantes de aluminio producen precipitación finamente dividida por óxidos hidratados. Los precipitados están cargados positivamente y por tanto se repelen unos a otros. La neutralización de las cargas positivas es realizada por los iones tales como sulfato

tos, cloruros, etc., los cuales estan naturalmente presentes en las superficies de las aguas causando un aglutinamiento de las partículas finas las cuales forman un precipitado gelatinoso y poroso de gran volumen. La floculación es en lo posterior un incremento en tamaño y densidad de los precipitados causados por su reunion, a travez de la suave acción de la agitación del agua, un número de partículas precipitadas de óxido hidratado con las de turbiedad forman una masa mayor y más rápidamente sedimentable. Para cada coagulante hay un óptimo rango de pH para una mejor coagulación. Es necesario controlar el punto del pH de máxima precipitación del coagulante, equivalente a la máxima solubilidad del floc. El mejor pH para la precipitación depende no solamente del coagulante sino también de las características minerales del agua. La temperatura del agua también afecta el proceso de coagulación, ya que a temperaturas cercanas al punto de congelación, se incrementa el tiempo de mezclado así como también la dosis de coagulación que puede ser requerida. En general la exitosa coagulación depende de tres factores principales:

- a) La presencia de una mínima cantidad de iones de aluminio para formar un floc insoluble.
- b) La presencia de un ión fuerte tal como un sulfato o un cloruro.

c) El pH del agua debe ser controlado dentro de un rango definido.

No es posible predecir a partir del análisis del agua cual sería el mejor coagulante a usarse, o más propiamente, cual es la dosificación óptima y rango de pH para el control del proceso. Para una mejor coagulación económica y eficiente es necesario que ésta sea hecha a variadas concentraciones y variados niveles pH. Los agitadores de laboratorio deben ser usados en éstas pruebas, para obtener condiciones de análisis uniformes y, que la experiencia previa con el agua tratada ayude en la selección de los dosajes de coagulantes y determine el pH óptimo; para obtener un resultado positivo es necesario cambiar la dosis del coagulante y el control del pH para compensar luego la variación de las características del agua.



La fórmula para el alumina comercial es  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$  conteniendo un 17%  $\text{Al}_2\text{O}_3$  por peso.

La alumina forma iones de aluminio trivalentes  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$   $2\text{Al}^{+++} + 3\text{SO}_4^{=}$

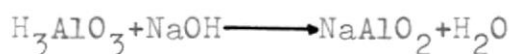
La carga altamente positiva del ión (Al) tiene una fuerte afinidad por las partículas cargadas negativamente .

El filtro de alumina es una sal ácida lo cual debe reaccionar con la alcalinidad presente en el agua. Si la alcalinidad del agua es insuficiente la alcalinidad artificial debe ser suministrada. Cada gramo por galón de alumina requiere cerca de 1/2 gramo por galón del  $\text{CaCO}_3$  como alcalinidad. El precipitado de la alumina es el hidróxido de aluminio ( $\text{Al}(\text{OH})_3$ ) éste precipitado tiene una solubilidad aproximada de 1,5 ppm en un rango de pH de 5,5-7,5

Abajo:



Arriba:



Este precipitado es anfótero y puede formar sales ácidas o básicas.

#### 1.1.5 Control de pH

Puesto que la acción del coagulante es afectado por el pH del agua tratada, es necesario el control del pH dentro de ciertos rangos dependiendo de las características del agua y del coagulante usado, en determinados casos este rango es muy pequeño; si el pH es controlado dentro de éste rango, el flóculo formado es imperfecto y produce partículas coloidales finamente divididas y no se produce el asentamiento. Como se previamente el óptimo rango del pH puede ser ajustado empleando un procedimiento standar. Los tres pasos

esenciales en el adecuado control del proceso de coagulación son:

1. Mezclado
2. Flocculación
3. Sedimentación

Es muy importante saber que el coagulante sea mezclado rápidamente con el agua a ser tratada para obtener una coagulación suficiente a una mínima dosis de químico. Para obtener una adecuada cantidad para clarificación,, el coagulante y el agua deben ser emzclados completamente de manera que la precipitación se realice uniformemente en el agua..

La reacción química que causa la precipitación del coagulante es instantanea para la coagulación de la partícula más allá del tamaño coloidal, y es extremadamente lento si la agitación no es empleada. La agitación mecánica controlada adecuadamente producen contactos numerosos en las partículas coloidales y su coagulación en partículas grandes y pesadas forman un flóculo que se asienta rápidamente y consecuentemente reduce el tiempo del asentamiento requerido: así como el flóculo es aglomerado por agitación, también puede ser roto por agitación violenta. La velocidad de agitación debe ser la suficiente para obtener una buena formación del flóculo y asi mismo lo suficientemente baja prar prevenir la ruptura del precipitado; la ve-

locidad del agitador es ajustada por el proporcionador mientras el agitador esta en marcha. La velocidad de agitación para mejor formación del flóculo puede variar con los cambios de las características de la alimentación. El agitador debe ser operado a una velocidad adecuada para mantener los lodos suspendidos; la altura del nivel del lodo es mantenida por el rango de la velocidad del agitador.

Siguiendo el mezclado, el próximo paso para una segura floculación, requiere reunir las pequeñas partículas bajo la influencia, de un mezclado que permita el incremento en el tamaño y conseguir un rápido asentamiento en el estanque de sedimentación. Mejor floculación puede alcanzarse por el uso de zonas variante y deflectores; cambiando la proporción y dirección del flujo del agua.

La rápida formación de la densidad del flóculo es esencial para una satisfactoria operación del reactor la masa de las partículas del flóculo efectúan la separación del floc del agua clarificada. La formación rápida del floc aseguran un mínimo de tiempo de retención y una rápida separación de la turbidez y color del agua. Para mantener las condiciones óptimas en la rápida formación del floc denso, se realiza una máxima reducción de la materia suspendida, turbidez y color. Una alimentación de álcali con cal o sosa. La

cal introduce un ión hidróxilo (OH) para hacer que el pH aumente.

#### 1.1.6 Operación del reactor

Los dos principios básicos que intervienen en la operación del reactor son:

- a) Precipitación química
- b) Separación hidráulica

Para formar el precipitado floculante con un mínimo de reactivos es necesario que sean observadas las siguientes condiciones:

1. La fase de solución y la fase sólida deben estar en contacto; y los sólidos presentes proporcionar un núcleo que deben eventualmente ser dispersados.
2. La agitación del mezclador en la formación del precipitado ayudará a la aglomerar del floc en grandes masas.
3. Los reactivos pueden ser alimentados de una forma continua con el fin de mantener el pH de una manera tal que las reacciones donde se forman los floc estén siempre en valores óptimos para la rápida formación del floc y aglomeración del mismo en grandes partículas.
4. El tiempo de retención puede ser controlado de tal manera que la reacción sea completa, y las partículas del floc están aglomeradas al tamaño más grandes, que esten sujetos a la separación hidráulica

del agua clarificada.

La separación hidráulica de las partículas del floc y materias suspendidas incluidas, turbidez y color son obtenidas si se cumplen las siguientes condiciones:

1. El agua entrante es introducida en la cima de la sección cónica de mezcla, está en un punto tal, en cual se obtiene la velocidad máxima del agua.
2. Las soluciones químicas son introducidas en el reactor, en la parte más baja de la zona de mezcla introduciendo los químicos en el agua al punto donde la precipitación tiene lugar.
3. El agitador mezcla los químicos en el agua entrante, y el floc previamente formado servirá como núcleo para lograr la formación de floc y precipitación química.
4. El agua pasa de la zona primaria a la zona secundaria donde la coagulación, aglomeración y precipitación es logrado. Por medio de un tabique y área expandida, la agitación en la segunda etapa es considerablemente reducida permitiendo la completa coagulación y aglomeración de los precipitados. El agitador es diseñado para proporcionar una agitación de esta zona primaria de las partículas de floc preformado, que forma el núcleo de precipitación en la zona primaria. Esto ayuda a acelerar la precipitación primaria del reactivo proporcionando

una superficie en la cual el tamaño de las partículas de éste precipitado inicial es construida.

5. El agua procedente de la etapa secundaria a la etapa final produce un cambio en la dirección de flujo y ayuda a la separación de grandes masas de floc y aglomerados. Un tabique inmovil ayuda a reducir la agitación permitiendo una separación hidráulica efectiva del floc en la tercera etapa.
6. Una igual distribución del agua en la tercera etapa es lograda por los tabiques, y la distribución del efluente es controlada por un diseño especial. Controlando la distribución del agua, de entrada y salida por los costados se hace posible lograr un flujo vertical continuo, con una velocidad de flujo controlado.

Los lodos presentes en el compartimento del filtro de los mismos son inclinados de tal manera que el área o sección de cruce, aumenta como aumenta el agua a través de ésta.

Por consiguiente la velocidad del agua hacia arriba disminuye constantemente mientras sube a través del compartimento, y consecuentemente el poder de goteo disminuye también proporcionalmente, esto se logra cuando la velocidad descendida del agua es pequeña; lográndose de esta manera el precipitado de las partículas o por consiguiente el atraso permanente. La inter

pretación de datos en la concentración de los lodos se obtiene de varios sitios en el reactor. La determinación de las condiciones óptimas que se relacionan con el nivel de lodos y concentración, permite el ajuste en la operación de alimentación de lodos; como la turbidez de la materia suspendida en el agua cruda está sujeta a condiciones de la estación, es necesario que la concentración de lodos sea periódicamente chequeadas y ajustada.

La concentración de lodos puede ser determinada por simple observación o por pruebas verdaderas; el muestreo de la concentración de lodos se realiza a varios niveles por todo el reactor, para esto es necesario utilizar el método de la varilla zambullida.

Los lodos formados en el colector del reactor son recogidos en el fondo de concentración de éstos, y extraídos por una línea de descarga a sus desechos. El manifold de lodos está provisto por un diafragma operado por una válvula de motro (accionador de selenoide).

Esta válvula permite la extracción de lodos por medio de una línea de descarga hacia, los desechos; el automático del sistema para eliminación de lodos está controlado por un contador reset y accionado por un integrador de impulsos, de un medidor de entrada, al reactor. Cuando el contador realiza su cuenta sobre ésta, actúa un controlador de tiempo, sumador de tiempo re,

set timer el cual controla la válvula solenoide su-  
pliendo un medio de operación (aire o agua a la pre-  
sión adecuada) al abrir la válvula de eliminación de  
lodos por un periodo ajustable. El timer de elimina-  
ción de lodos energiza una válvula solenoide para su-  
plir un medio de operación al abrir una válvula de  
eliminación de lodos por un prefijado pero ajustable  
periodo.

#### 1.1.7 Retrolavado automáticamente controlado

(Back-flusing), el retrolavado deberá ser establecido  
y con un tiempo para éste relativamente corto. Esta  
operación deberá realizarse solo en el tiempo sufi-  
ciente para purgar los lodos del colector y asegurar  
una uniforme descarga del área entera, cubierta por e  
el cabezal de alimentación de lodos. Un excesivo tiem-  
po en el retrolavado puede agitar los lodos en la sec-  
ción controladora de lodos en tal forma que no podrá  
hacerse ni conseguirse una efectiva descarga de lodos.  
Un retrolavado insuficiente puede dar como resultado  
una destrucción de lodos en el manifold colector, un  
subsecuente crecimiento de lodos en el área alrededor  
de la obstrucción del colector.

El sistema automático de eliminación de lodos está  
controlado por un reset timer; el timer deberá ser  
energizado y luego abrirá la válvula de eliminación  
de lodos por un periodo ajustable, una vez que éste

periodo es establecido por el ajuste del contador. El periodo durante el cual la válvula de eliminación de lodos es abierta, el ajuste es variable de acuerdo al tiempo de duración para poder energizar la válvula de control por el periodo de tiempo dado.

La existencia de un buen nivel de lodos es deseable y necesario en la operación del reactor, sin embargo, mucho lodo podría formar el floc hacia arriba del espacio de agua clara. Es necesario mantener un nivel alto de la capa de lodos, pero que no sobrepase la puntada del cono interno en lo que sea posible; pero por encima de todo evitar que la superficie se eleve por encima de este nivel.

Si el nivel de lodos es mantenido muy bajo, no se realizara una completa aglomeración, estableciendose una interfase de lodos y un derramamiento de partículas de pequeño diámetro de floc.

La remoción de lodos debe ser realizado periodicamente y a frecuentes intervalos de tiempo, bajo condiciones ordinarias de operación.

Para evitar obstrucciones y asegurar una descarga uniforme de los lodos que han sido concentrados en el concentrador de lodos, la linea y el distribuidor son automáticamente retrolimpiados. Los intervalos periodicos son determinados por la experiencia en operación de la persona que opera esta planta; la válvula

de compuerta en la línea de retrolavado será bien abierta dejando que el agua de retrolavado entre en el reactor.

#### 1.1.8 Operación inicial

Después que el reactor ha sido llenado con agua el agitador mecánico de velocidad variable será encendido y operando aproximadamente un medio de la velocidad normal de operación. La alimentación de químico será iniciada y el agua deberá ser tratada hasta que los desechos y lodos formados sean retirados y el agua adquiera una calidad aceptable, el retiro de lodos no será aceptado o iniciado hasta que el nivel de lodos esté completamente formado.

Hay que ajustar el sistema de alimentación de químicos para inyectar estos químicos aproximadamente en la proporción que indica la página de datos, esta razón será aceptada en el rango que permita un óptimo rendimiento.

En la primera etapa del reactor, el flujo de entrada es inyectado en la zona de mezcla, y los valores proporcionales de reactivos químicos son introducidos si simultáneamente.

Una activa agitación en ésta etapa asegura la mezcla apropiada de reactivos y el agua, con la preformación de precipitados acompañados de una precipitación inicial. El agua pasa de la etapa primaria a la secunda-

ria donde la coagulación y la aglomeración de precipitados es completada. Por medio de deflectores y área expandida, la agitación en ésta etapa secundaria es considerablemente reducida, produciendo la precipitación completa de los aglomerados.

El agitador es diseñado para prever recirculación, desde la zona secundaria hasta la zona primaria, las partículas del floculo preformado forman el núcleo de precipitación inicial en la zona primaria. Estos producen la precipitación preliminar acelerada de los reactivos, por previsión de una superficie en que la medida de éstas partículas iniciales de precipitados se ha formado.

Como el agua pasa desde la etapa secundaria hasta la etapa final, un repentino cambio en la dirección del flujo separa las grandes masas de floculos y aglomerados por inercia; deflectores fijos reducen la agitación permitiendo una efectiva separación hidráulica del floculo en la tercera etapa.

La distribución equitativa del agua en esta tercera zona es realizada por deflectores, y la distribución del efluente es controlada por los canalones de salida. Mianstra se esté operando la experiencia con el equipo existente, dictará la dosificación de alimentación de químicos requerida para obtener un buen resultado; puede ser deseable la confirmación de éstos do-

sajes por pruebas de campo, para colaborar en este, nosotros preveemos la información de los ensayos de vibración, en la siguiente sección de éste instructivo.

#### 1.1.9 Prueba de jarra

No hay una teoría cabal o una forma empírica para calcular la dosificación requerida para la formulación del flóculo óptimo; por eso es necesario preparar una prueba de jarra para determinar la dosificación de la alimentación de químicos en un rango máximo de eficiencia para producir un floc óptimo. Estas pruebas son un intento de aumentar a pequeñas escalas las condiciones existentes en el reactor. Aunque es un procedimiento de prueba y error nos dará aproximadamente la predicción de dosificación de coagulante requerida en la mayoría de los casos y aunque éstos ensayos no son infalibles, son generalmente lo suficientemente reales para verificar las óptimas condiciones para la muestra probada.

El equipo de ensayo es un agitador eléctrico (teniendo una varilla de vidrio para agitación manual, producirá resultados satisfactorios), varios vasos de precipitación de 600 ml, 500 ml, graduados, dos pipetas de Mohr, una balanza química y una tabla de logaritmo. Preparación de soluciones normales de aluminio y cenizas sódicas: En la preparación de una solución

normal de aluminio será necesario el usar alumina que está en forma hidratada siendo variedad lo que será alimentada al reactor. Se disuelve 4,205 gramos de sulfato de aluminio hidratado en un recipiente de un litro ( $Al_2(SO_4)_3$ ).

Un mililitro de esta solución estambién una muestra de un mililitro de agua a ser tratada; y esto es equivalente a 8,57 ppm de sulfato de aluminio o 0,50 gramos por galón americano.

El ensayo grueso se realiza para determinar el rango del tratamiento; el ensayo fino se hace para establecer la dosificación exacta de alimentación en éste rango. Permite que el agua a ser tratada corra por todas las tuberías para limpiarlas, y el agua muestreada sea atraída de la fuente con un mínimo de tiempo de retención en las líneas.

El pH del agua cruda debe ajustarse variando la cantidad de hidróxido de sodio para producir un pH tal que la óptima formación del floc ocurra. Este valor será determinado experimentalmente por prueba de jarra de acuerdo a la "VARIACION DE LA CONCENTRACION" previamente descrita para el ajuste proporcional del alumbré. La dosificación química es determinada por éstas pruebas de jarra. Sin embargo, deben ser hechas por el reactor cuando éste esté funcionando para varias cargas, la concentración de coagulante en el reactor

debe permanecer constante con la variación del flujo. Esto es acompañado por prueba de alimentación de químicos empleado.

1. El bióxido de carbono libre se incrementa en 4 ppm por cada 10 ppm de sulfato de aluminio adicionado.
2. La alcalinidad al naranja de metilo decrece 4,5 ppm para cada 10 ppm de sulfato de aluminio dosificado.
3. Los sulfatos incrementan en 4,5 ppm para cada 10 ppm de sulfato de aluminio dosificado.

#### 1.1.10 Panel de controles del reactor

El equipo de control para la operación automática de la evacuación de lodos es proporcionado en el control principal del panel. Este equipo comprende de un contador el cual es accionado por el medidor del contador integrador el agua cruda, un timer ajustable y un selector el cual acciona uno u otro de los sistemas de evacuación de lodos. Cuando el contador queda afuera, la válvula de retrolavado abre por el tiempo ajustado en su respectivo timer. Cuando el timer de retrolavado queda afuera, la válvula de retrolavado cerrará y la válvula de evacuación de lodos abrirá por un tiempo ajustable en su respectivo timer, y otra vez comenzará el contaje de los impulsos del medidor de agua cruda para repetir la completa opera-

ción automática antes mencionada.

La frecuencia de la evacuación de lodos y la duración del mismo deberá ser una función de la turbidez del agua cruda y el tiempo que se usa un determinado tipo de químicos. La duración del retrolavado es materia de experimentación y deberá ser un mínimo para minimizar la perturbación de lodo acentado previo su evacuación.

#### Datos del reactor

##### Diseño

Flujo	2.000 GPM c/u
Tiempo de retención:	
Mezcla instantanea	20 segundos
Reacción	20 minutos
Sedimentación	60 minutos
Motor del mezclador	2 HP
Motor del separador de lodos	1 HP
Ajuste del contador del clarificador	30
Timer del retrolavado	20 segundos
Timer de evacuación de lodos	3 minutos

#### 2 CARACTERISTICAS DEL SISTEMA DE AGUA DE REFINERIA

El sistema de agua de refinería consiste de los siguientes puntos:

- a) La laguna de retención de agua cruda consiste de dos secciones. Capacidad total de las dos secciones ( $54.300 \text{ m}^3$ ), las cuales están para 10 días de

operación.

- b) Dos bombas de carga de agua cruda de  $450 \text{ m}^3/\text{h}$  c/u
- c) Sistema de agua cruda, que consiste de dos sistemas independientes idénticos los cuales están equipados con sistemas de alimentación de reactivos químicos y de concreto. Cada sistema es capaz de tratar  $450 \text{ m}^3/\text{h}$ .
- d) Dos bombas para agua de refinería de  $450 \text{ m}^3/\text{h}$  c/u.
- e) Dos bombas para desalojo de lodos de  $17 \text{ m}^3/\text{h}$  c/u; y una laguna de lodos para las dos secciones de  $5.300 \text{ m}^3$  en total.

## 2.1 Condiciones de agua para refinería

### Agua cruda (agua del río)

Las muestras han sido tomadas directamente del río esmeraldas para el análisis y presentada por UOP como sigue:

Temperatura	23,9	27,2	
pH	6.1	6,8	
Dureza total como $\text{CaCO}_3$	35	48	ppm
Mg como $\text{CaCO}_3$ (calculado)	3	28	ppm
Total alcalinidad como $\text{CaCO}_3$	42	54	ppm
$\text{SO}_4$	3	14	ppm
Cl	3	7	ppm
Fe (no filtrado)	15	27	ppm
Fe (filtrado)	3	11	ppm
$\text{SO}_2$	6	32	ppm

Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (no filtrado)	36	122	ppm
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (filtrado)	3	11	ppm
Total de solidez	180	213	ppm
Total de sólidos suspendidos	30	129	ppm

(Las muestras han sido tomadas en los meses de Julio, Agosto, Septiembre y Noviembre de 1.972)

## 2.2 Agua de refinería (agua clarificada)

El sistema de agua ha sido diseñado de acuerdo con la condiciones del agua de refinería, y son como siguen:

Sólidos suspendidos	menos de 15	ppm
pH	6,0-8,5	
Presión:	Diseño	12,2 Kg/cm <sup>2</sup> (175psig)
	Operación	8,7 Kg/cm <sup>2</sup> (125psig)
Temperatura:	Diseño	37,8 Grados C.
	Operación	23,9 - 29,4 Grados C.

## 3. PROCEDIMIENTOS PARA CALIBRAR LAS MAQUINAS DOSIFICADORAS DE SULFATO DE ALUMINIO

- Colocar en marcha el dosificador
- En el diál de dosificación seleccionar el número máximo (Ejemplo: 500)
- Colocar un recipiente bajo el alimentador y recoger el material durante un tiempo exacto (Ejemplo: 2 minutos), o más dependiendo del tamaño del recipiente y las facilidades para realizar este trabajo

- d) Pesar el material recogido (en 2 minutos). Supongamos que haya sido (3,8 Kg)
- e) Hacer el siguiente cálculo

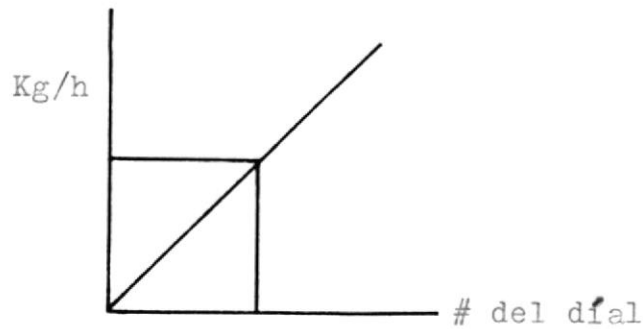
#500	minutos	Kg
	2	3,8
	60	X
	$60 \times 3,8$	
	$X = \frac{\quad}{2} = 114$	

por lo tanto para el número 500 en el día correspondiente 114 Kg/h

- f) Repetir el procedimiento desde el paso 2, y así coloque sucesivamente en el día 500, 450, 400 ... durante el mismo tiempo como se realizó en el paso 3 (2 minutos)
- g) Con esto se obtiene una tabla como la que sigue:

<u>Número del día</u>	<u>Kg/h</u>
500	114
450	111
400	108
-	-
-	-
50	11,4

- h) Graficar éstos valores en un diagrama como el que sigue



Para dosificar:

- a) Con el dato de laboratorio en ppm y el caudal que entra a el clarificador en  $m^3/h$  aplicando la fórmula se tiene:

$$D = \frac{\text{ppm} \times Q}{1000}$$

Ej. ppm= 150

$$Q = 200 \quad Q = m^3/h$$

$$D = ? \quad D = \text{Kg/h}$$

$$D = \frac{150 \times 200}{1000} = 30 \text{ Kg/h}$$

Con éste valor se va al gráfico anterior y se encuentra que número debe colocarse en el dial para obtener los ppm deseados.

## R E C O M E N D A C I O N E S

- 1.- El operador debe tener una capacitación básica sobre los principios de clarificación.
- 2.- Se debe usar un tornasol con la finalidad de saber en que condiciones se encuentra el agua (ácido, básico, normal).
- 3.- Automatización del proceso (no operar en manual).
- 4.- Se debe realizar una periodica limpieza de algas, hongos, etc., en las piscinas de estabilización..
- 5.- En el pozo de succión de las bombas que desalojan el lodo, se debe colocar un mezclador o agitador con el fin de homogenizar la mezcla, evitando con ésto que las bombas se taponen y trabajen forzadamente.

## C O N C L U S I O N

Con ésta investigación se ha llegado a la conclusión , de que los estudios, acerca de como las aguas de origen natural están contaminadas, al igual que las de escurrentías y subterranos.

Por otro lado se ha concluido, de que éste tipo de aguas puede causar incrustaciones, corrosión y en algunos casos deterioro de los equipos; y es debido a ésto, que se debe controlar cada uno de los parámetros y análisis que el agua pueda tener en el proceso de clarificación, haciendo notar una vez más que la dosificación de químicos sea la más adecuada y la más precisa para que el proceso de clarificación obtenga el éxito deseado.

## B I B L I O G R A F I A

1. F. DE LORA, J. CHAVARRIA "POLUCION DEL AGUA"  
Labor, Madrid España, 1972, pp 6-21, 41-52
2. BRUCKMAN LABORATORIES, INC, "TRATAMIENTO QUIMICO  
DEL AGUA", Memphis, Tennessee U.S.A. (Trad. Ing-Esp)
3. D. VILLEGAS, "CLARIFICACION"  
CEPE, Ecuador, 1977, pp 1-16, 19-24, 40-41