

Aspectos de la cloración de aguas potables (*)

Por JOSE ROMAN SANCHEZ DE LA NIETA

Dr. Ingeniero de Caminos, C. y P.
Departamento de Tratamiento de Agua
Canal de Isabel II.

El autor, al preparar una conferencia sobre cloración, en el Curso de Reciclado organizado por la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos (Fundación Agustín de Bethencourt), ha hecho un "barrido" de bibliografía y publicaciones técnicas sobre la situación actual del tratamiento del agua con cloro y sus compuestos y aportado su propia experiencia en la explotación de las Plantas de Tratamiento de Agua del Canal de Isabel II y el control de la calidad del agua a través de sus Laboratorios.

Con ello, se ha preparado el siguiente artículo, con el fin de presentar de un modo muy general la problemática actual de la cloración de las aguas potables, proporcionando al lector información actualizada que le permita documentarse para la solución de los problemas que el empleo de esta técnica le presenten.

Se comenta en el artículo la química de la cloración, las relaciones del cloro con el agua y distintos compuestos orgánicos e inorgánicos, las prácticas empleadas en la misma, los sistemas de cloración y puntos de aplicación de aquéllas, así como las instalaciones y seguridad de las mismas.

INTRODUCCION

El cloro fue descubierto en 1774 por el químico sueco Karl Wilhelm Scheele, quien lo obtuvo al hacer reaccionar el ácido clorhídrico con bióxido de manganeso. En 1805 a 1806 fue licuado por primera vez este gas, que fue identificado como elemento por Davy, que le bautizó con el nombre griego de cloros (verde), debido a su color característico, aunque no se sabe con exactitud cuando el cloro se empleó específicamente por primera vez para mejorar la calidad del agua. Por otra parte, no existe la menor duda de que las primeras aplicaciones fueron en base a su capacidad como desodorante y no desinfectante.

Sólo hasta bien entrada la última década del siglo pasado, cuando Pasteur, Koch y otros habían aportado sus inapreciables contribuciones a la ciencia de la bacteriología, varios científicos ingleses, franceses, alemanes y norteamericanos, se plantearon la problemática del empleo del cloro y las lejías de cloro en la desinfección del agua

y de las aguas residuales, demostrando su eficacia.

Las investigaciones como ahora, ya se centran en cuál era la demanda de cloro, la cloración y decoloración y los periodos de contacto necesarios.

La primera vez que fue empleada la cloración del agua como proceso de tratamiento continuo fue adoptada por Duyk en Bélgica en 1902, introduciendo cal clorada y percloruro de hierro en el agua bruta antes de proceder a su filtración lenta. La segunda aplicación más antigua del cloro en abastecimientos de aguas municipales ocurrió en el año 1904 en la planta de filtración de Lincoln (Inglaterra) aplicando una solución de hipoclorito sódico.

En los principios de la cloración del agua, las únicas fuentes comerciales eran el cloruro de cal y las soluciones de lejía de hipoclorito sódico, con los problemas derivados de la mala estabilidad y la variabilidad del contenido efectivo de cloro de estos materiales.

La primera aplicación de cloro líquido en la desinfección del agua data de 1912, con ocasión de un brote de tifoideas recurrente en Niágara Falls, y ya en 1913, Wallace y Tiernann inventaron equipos para medir el gas cloro, disolverlo en el agua y aplicar la solución.

A partir de aquí, en el último medio siglo de experimentación, desarrollo y perfeccionamiento, ha cristalizado en una técnica progresiva que garantiza la eficacia del cloro en la desinfección y otras aplicaciones. En un principio se empezó por la cloración sencilla, como complemento final de la filtración y otros procesos de purificación del agua y en algunos casos como único tratamiento. Pronto se empezó a reconocer la utilidad del cloro para otras finalidades que no fuera la cloración, como, por ejemplo, como coadyuvante de la coagulación. Después siguieron las cloraminas o tratamiento con cloro y amoníaco, como consecución de darse cuenta S. Rideal de la prolongación de la acción bactericida de la cloración en aguas negras aun después de no detectarse cloro en las aguas o como Houston al observar las ventajas de las cloraminas en la evitación de los sabores resultantes de las reacciones del cloro con la materia orgánica. Ante la eliminación de esta degradación organoléptica y la menor acción bactericida de las cloraminas, aunque más estables, el propio Houston llega a la supercloración y decoloración posterior, para dar paso a la cloración de punto de ruptura (Break-point) al observarse el

(*) Se admiten comentarios sobre el presente artículo, que pueden remitirse a la Redacción de esta Revista, hasta el 31 de marzo de 1979.

ASPECTOS DE LA CLORACION DE AGUAS POTABLES

mínimo que se producía en la curva de cloro residual, o sea, después de la oxidación de todos los compuestos de adición formados por el cloro y la materia orgánica del agua. Por último, al comercializarse el clorito sódico, aparece el empleo del bióxido de cloro, con su potencial redox de oxidación muy superior al cloro y más eficaz en la reducción del hierro y manganeso y en la eliminación de sabores y olores en general.

Como final a esta introducción histórica de la cloración, podemos decir que hasta la fecha, no hay otro proceso de tratamiento sanitario de las aguas comunarias que haya sido adoptado de un modo tan generalizado como éste. Su eficacia ha sido y es evidente, aunque hoy la degradación de la calidad de los recursos de agua, con la creciente incidencia de los micropoluentes o contaminantes orgánicos por el desarrollo industrial y urbano, ensombrecen ese panorama ante los compuestos orgánicos del cloro por un supuesto perjuicio a la larga a la vida humana. Otros oxidantes, como el ozono, principalmente, yodo y permanganato potásico, han adquirido o pueden adquirir una posición importante en sustitución o como complemento de la cloración, pero todavía, volvemos a insistir, el medio más universal, seguro, económico y tolerable para tener un agua sanitariamente potable es la desinfección con cloro y sus compuestos.

QUIMICA DE LA CLORACION

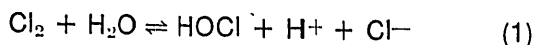
El conocimiento de la química fundamental de la cloración ha sido ampliado considerablemente en los últimos veinticinco años; esto ha contribuido a un significado avance en el campo. Sin embargo, lo mejor que podemos aprender es que el cloro, aplicado en su más simple forma (Cl_2), puede ser un potente desinfectante, casi sin igual.

Ahora bien, es bien conocido que la cantidad y complejidad de los poluentes que degradan la calidad del agua de nuestros abastecimientos está creciendo en términos alarmantes y también se sabe que dichos contaminantes orgánicos: el hierro, amonio, nitritos, etc., reaccionan con el cloro de una manera significativa y hoy, tal vez, preocupante.

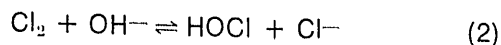
Pero antes de discutir la reacción de dichos compuestos con el cloro y su significación, debemos fijarnos primero en como la molécula de cloro es utilizada como desinfectante.

Reacciones con el agua.

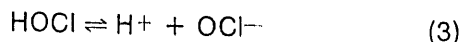
Cuando el cloro gas se disuelve en el agua, se hidroliza rápidamente de acuerdo con la siguiente ecuación:



formándose una mezcla de los ácidos hipocloroso (HOCl) y clorhídrico (HCl). La reacción es rapidísima, a 20° ocurre en décimas de segundo, a 0° en solamente unos pocos segundos. La explicación, parece ser que la molécula de cloro reacciona con el ion oxidrilo mejor que la molécula de agua:



El ácido hipocloroso es débil y sufre a su vez una parcial disociación en:



Esta disociación depende del pH y de la temperatura. A pH bajo, el cloro existe predominantemente como HOCl y a 0° C, para un pH de 7,8 predominan los iones de hipoclorito (OCl^-), existiendo éstos exclusivamente en pH del orden del 9,5 o superiores.

El cloro que existe en el agua en la forma de ácido hipocloroso o de iones de hipoclorito se conoce con el nombre de *cloro disponible libre*.

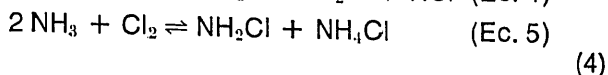
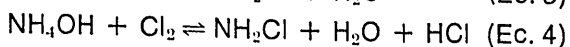
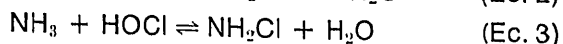
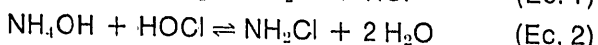
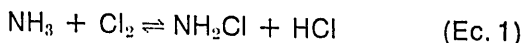
Las formas hipocloríticas del cloro, tales como el hipoclorito cálcico $\text{Ca}(\text{OCl})_2$ y el hipoclorito sódico, NaOCl , se ionizan en el agua y también producen iones de hipoclorito.

Es interesante cuantificar el concepto de cloro disponible, muy empleado en los primeros tiempos de las técnicas de cloración y que no es otra que una medida cuantitativa del poder oxidante de una solución, que no es necesariamente la medida de su eficacia desinfectante y que erróneamente se empleaba para un término de comparación del poder desinfectante de los compuestos de cloro con el cloro elemental, cuando se creía que el 100 por 100 del cloro-gas se encontraba disponible en las reacciones de desinfección.

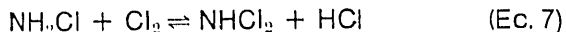
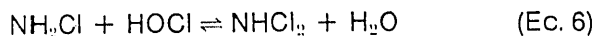
Reacciones cloro-amoniaco.

Las reacciones que suceden en el agua entre el cloro y el amoníaco son muy complejas, y están afectadas por el tiempo de contacto, temperatura, pH, calidad del agua y concentración de los reactivos. Se ha trabajado mucho para aclarar estos procesos; las investigaciones más completas son las de Palín (Wat. and Wat. Engng., 54, 1950 y J. Instn. Wat. Engrs., 4, 1950) y las de Griffin.

En una primera etapa y con una relación ponderal N/Cl_2 de hasta 1/5, puede suceder las siguientes reacciones:



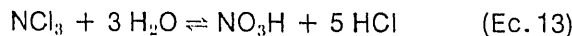
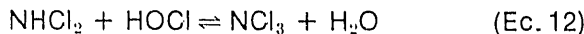
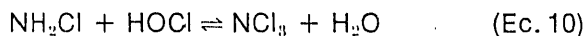
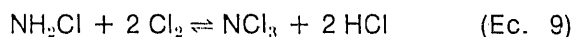
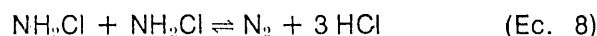
Una nueva adición de cloro, con una relación ponderal N/Cl₂ mayor de 1/5 da lugar a que parte de la monoclaramina, por una reacción de desproporción, se transforme en dicloramina:



(5)

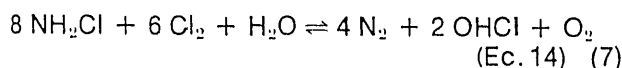
Estas reacciones suceden en competencia con las anteriores, hasta que la relación ponderal N/Cl₂ se acerca a 1/10. Esta es la proporción aproximada para el punto de ruptura y es también el punto en que existe un mínimo irreducible de cloro residual formado por partes aproximadas de mono y dicloramina con trazas de cloro libre (HOCl). También es este punto en el que desaparece el nitrógeno amoniacal (Handbook of Chlorination, Geo. Clifford Whithe 1972, pág. 298).

Cuando la proporción aumenta hasta llegar a 1/15 ó 1/20 tiene lugar la formación de tricloraminas, pudiendo llegar el cloro a estado iónico bacteriológicamente inactivo, de acuerdo con las siguientes reacciones:



(6)

El proceso de oxidación y destrucción de las cloraminas se puede resumir por medio de la ecuación:



La figura 1 ilustra, de modo esquemático y claro, lo que ocurre cuando un agua conteniendo nitrógeno amoniacal se somete a un tratamiento con dosis progresivas de cloro. Se ha construido a partir de la ecuación 1, para la formación de

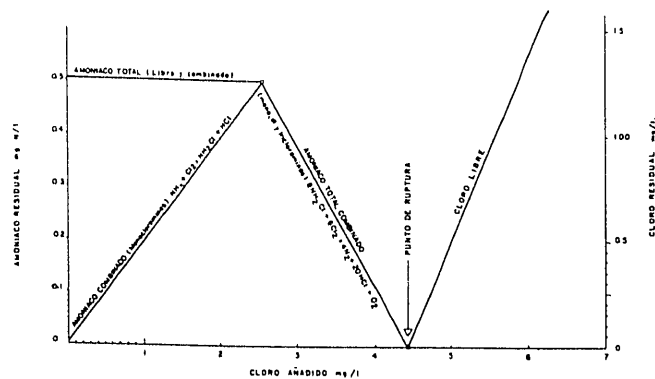


Fig. 1.—Relación entre nitrógeno amoniacal y cloro (Esquema).

monoclaminas y de la ecuación 14, de destrucción de cloraminas.

Partiendo de un agua destilada con 0,5 mg N/l de amoníaco, cuando hemos añadido 1 mg/l de cloro nos encontramos con que 0,10 mg N reaccionan con él para formar monoclaminas. En ese momento tendremos 0,50 mg N/l de amoníaco total: 0,40 mg N/l de amoníaco libre y 0,10 de amoníaco combinado (monoclaramina 0,5 mg/l si se expresan con cloro residual). A los 2,54 mg/l de cloro añadido, todo el amoníaco y todo el cloro se encuentran combinados como monoclaminas (0,5 mg N/l, si se expresa como amoníaco combinado y 1,27 mg/l, si se expresa como cloro residual). Después de esta dosis, el amoníaco y cloro residuales (cloraminas) descienden hasta desaparecer por completo a los 4,44 mg/l de cloro añadido (punto de ruptura). A partir de este momento todo el cloro añadido será cloro libre.

La figura 2, sacada del Handbook of Chlorination, es una curva típica del punto de ruptura basada en los trabajos de Griffin. Desde que se hicieron estos trabajos se ha dado cada vez más atención a la diferenciación entre las varias fracciones de cloro residual.

En la actualidad, la opinión generalizada sobre la probable distribución de las distintas fracciones a través del fenómeno del punto de ruptura es la siguiente:

Las reacciones químicas que intervienen en este fenómeno suceden con mayor rapidez en el rango de pH de 7 a 8. Por encima y debajo de estos valores la proporción en que se alcanza el punto de ruptura se reduce considerablemente.

Cuando la proporción amoníaco a cloro, en peso, es menor de 1/5, el cloro residual está, probablemente, todo como monoclaramina. Este es el caso de la rama ascendente de la curva de la figura 2.

Cuando la proporción excede de 1/5, parte de la monoclaramina comienza una reacción de desproporción para formar dicloraminas.

Los residuales formados por esta reacción suceden entre el máximo y el mínimo de la curva; en esta región hay una pronunciada reducción del nitrógeno amoniacal causada por la oxidación del cloro. Esta reacción sucede en competencia con la ecuación de formación de monoclaminas hasta que la proporción en peso, de amoníaco a cloro, alcanza 1/10. Esta es, aproximadamente, la proporción para el punto de ruptura en la figura 2. También es el punto en que desaparece el nitrógeno amoniacal.

Cuando la proporción llega a 1/15 ó 1/20 puede notarse la primera formación de tricloruro de nitrógeno. Posteriormente se encuentran cantidades incrementadas de cloro disponible libre (HOCl) con dicloraminas residuales y la posible presencia

ASPECTOS DE LA CLORACION DE AGUAS POTABLES

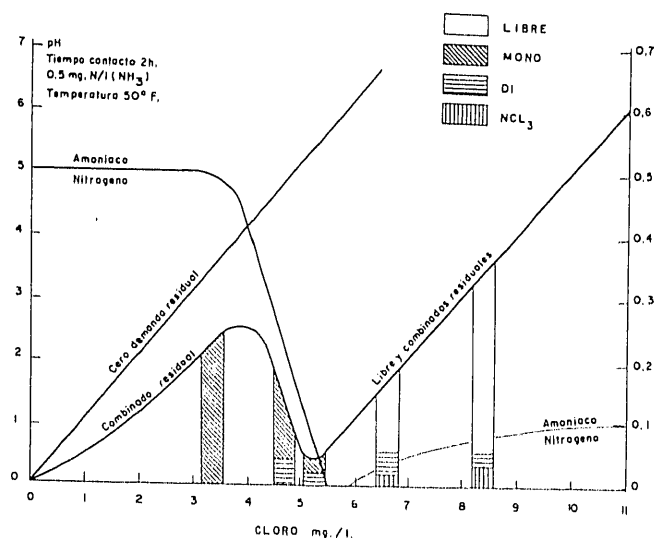


Fig. 2.—Relación entre el nitrógeno amoniacal y el cloro. Punto de ruptura (break-point).
(Tomado de Hand-Book of Chlorination. N. Y.)

de tricloruro de nitrógeno. Notar, en la figura 2, la presencia, de nuevo, de pequeñas cantidades de nitrógeno amoniacal. Posteriormente al punto de ruptura, la fracción de cloro libre disponible (HOCl) es, generalmente, igual al incremento en la dosificación de cloro, aunque, debido a la vuelta de nitrógeno amoniacal, se encuentran residuales de cloro combinado.

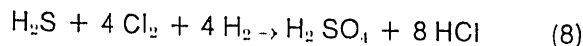
El mecanismo por el cual ocurren los fenómenos del punto de ruptura fue propuesto por primera vez por Rossum en 1943. A partir de la ecuación de acción de masas calcula la distribución de mono y dicloraminas. Reconoce la posible concurrencia del Cl₃N, pero cree que la reacción del punto de ruptura es un equilibrio entre la mono y dicloramina. Confirma lo descubierto por Griffin, es decir, la aparición de amoníaco a la derecha del mínimo de la curva.

En el procedimiento de desinfección del agua con cloraminas, con cloro + amoníaco o con amoníaco + cloro, que de todas estas formas ha sido llamado, lo que se pretende es obtener, predominantemente, monocloramina residual, por lo cual y teniendo en cuenta que "El exceso de amoníaco favorece la formación de monocloraminas" (Water Treatment and Examination. W. S. Holden, 1970, página 368), la proporción cloro/amoníaco empleada debe ser de 4/1 o aún menor (Handbook of Chlorination, pág. 297).

El cloro también reacciona con los materiales orgánicos nitrogenados, tales como las proteínas y los aminoácidos para formar complejos orgánicos de cloraminas. *El cloro que existe en el agua combinado químicamente con el amoníaco o los compuestos de nitrógeno orgánico se conoce por cloro disponible combinado.*

El cloro y otras sustancias inorgánicas.

La reacción entre el sulfuro de hidrógeno y el cloro es instantánea y típica de lo que ocurre con los materiales inorgánicos reductores:



Un p.p.m. de SH₂ puede oxidarse teóricamente con 8,5 p.p.m. de cloro. En la práctica, la destrucción del sulfuro de hidrógeno no es tan simple como parece deducirse de la ecuación anterior; hay paralelas una serie de reacciones que interfieren la reacción final.

La presencia de hierro y manganeso en el agua también influye sobre los procesos de cloración. En efecto, si el pH es lo bastante elevado como para permitir la formación de hidróxidos, y si se añade una cantidad suficiente de cloro, las formas ferrosas y manganosas de los metales se oxidan para convertirse en las hidrosolubles de los hidróxidos respectivos. Para lograr una oxidación manganosa satisfactoria, se requiere la presencia de cloro disponible libre y no de cloro combinado disponible. Para la separación del hierro, el pH óptimo es de 7 o superior, y para la del manganeso de 10. Por cada p.p.m. de Fe y Mn se requieren, respectivamente, 0,6 y 1,3 p.p.m. de cloro.

A veces, los nitritos están presentes en algunas aguas, especialmente en aquellas contaminadas por aguas negras o residuales industriales. Sin embargo, el cloro, especialmente, el libre disponible, los oxida fácilmente para convertirlos en nitratos; cada mg/l de nitritos consume 1,5 p.p.m. de cloro.

El cloro y los compuestos orgánicos.

Con la ayuda de las modernas técnicas de análisis, tales como la cromatografía de gases, espectrómetro de masas y de absorción atómica, muchos tipos de compuestos orgánicos y metales pesados han sido detectados en el agua de bebida. El conocimiento de los efectos en la salud humana de aquellos contaminantes, particularmente en las bajas concentraciones con que se presentan en el agua de bebida, es todavía muy incierto, pero preocupante; algunos estudios estadísticos, National Organics Reconnaissance Survey y de laboratorio (N.O.R.S.), National Cancer Institute (N.C.I.), han establecido comparación con la mortalidad por cáncer y el agua desinfectada con cloro y con la concentración de haloformos en el agua de bebida (Informe de Alavahan).

La Science Advisory Board ha advertido a la E.P.A. (Environmental Protection Agency) sobre el posible potencial carcinogénico u otros adversos efectos para la salud, resultantes de la presencia de compuestos orgánicos en el agua de bebida sometida a cloración.

ASPECTOS DE LA CLORACION DE AGUAS POTABLES

La Board considera que algún riesgo para la salud existe por la existencia de dichos contaminantes, pero actualmente es incuestionable. La conclusión está basada en la evidencia de la gran contaminación del agua de bebida, principalmente en cloroformo.

En laboratorios con animales (ratas) se ha comprobado la parición de hepatomías por cloroformo, pero los datos experimentales de carcinogénesis por cloroformo eran extremadamente reducidos. Otros autores, como Stokinger, encuentran difícil creer que los niveles de cloroformo presentes en el agua de bebida constituyen un peligro para la salud. Las experiencias del National Cancer Institute (N.C.I.) con ratones y ratas a los que administrado cloroformo por vía oral, han presentado carcinogénesis, aparte de que se ha hecho con animales debilitados por la ingestión de dosis máximas de cloroformo, no han tenido correspondencia en seres superiores, como perros, donde han aquantado durante años (7,5) exposición a 30 mg/Kg/día de cloroformo sin presentar carcinogénesis alguna, de donde puede reducirse que el cloroformo es un carcinogénico animal de muy baja potencia.

No obstante, sí parece prudente a la Science Advisory Board (E.P.A.) la recomendación de reducir la exposición del hombre a dichos compuestos sin incrementar el riesgo de las enfermedades infecciosas; por ejemplo, una revisión de las prácticas de la cloración, para ver si con sencillas recomendaciones se puede minimizar la formación de cloroformo u otros compuestos orgánicos clorados.

Compuestos orgánicos derivados de la cloración.

Aún no existe un sustituto aceptable del cloro como desinfectante que produzca una acción residual y los efectos sobre la salud de continuar la cloración, se sospecha que pueden ser graves, y al mismo tiempo la preocupación sobre los efectos de la cloración en los compuestos orgánicos encontrados en las aguas naturales y residuales aumenta.

Los compuestos halogenados formados en el agua por la cloración son: Cloroformo, bromodiclorometano, dibromoclorometano y bromoformo. Para algunos autores, como Rook y Stevens, se han formado por la presencia de los ácidos fúlvicos de las sustancias húmicas naturales como precursores de dichos trihalomenatos (organic precursors) o compuestos acetilénicos de bajo peso molecular.

Estudios realizados han expuesto que:

Las concentraciones de cloroformo a un pH constante y a 25°, fueron de siete veces más en

el agua bruta clorada que en la tratada y treinta veces más que en la pasada por un filtro de carbón activo. Las concentraciones de los precursores orgánicos son reducidas evidentemente por la coagulación, filtración, etc., y con ello la formación de cloroformo y mucho más con el tratamiento del carbón activo. Hay que tener en cuenta que si la cloración se hace con pH alto, debido al bajo peso molecular de los derivados acetilénicos que reaccionan bien a dicho pH, probablemente no serán eliminados por el tratamiento, cuya eficacia para eliminar precursores en la coagulación y filtración es mayor a pH 7. Experimentos han demostrado que las cloraminas no reaccionan con los precursores orgánicos del agua para la formación de trihalometanos.

Ante este panorama, E.P.A. está intentando salvaguardar la calidad sanitaria del agua potable en espera del desarrollo del control de los compuestos orgánicos. Por ejemplo, la práctica común de la precloración del agua bruta para asegurar la adecuada desinfección puede producir probablemente doble cantidad de haloformas comparada con la cloración del agua después de coagulada, sedimentada o filtrada. A continuación, se enumeran algunos cambios realizados en Plantas de Tratamiento, para una mayor reducción de la concentración de trihalometanos:

1. Colocando el punto de cloración después del tratamiento parcial de una presedimentación del agua bruta, con objeto de reducir el tiempo de contacto del cloro con el agua, y en consecuencia el tiempo de formación de trihalometanos y para mejorar la calidad del agua antes de la cloración.

2. Añadir carbón activo en polvo (P.A.C.) al agua bruta en el intento de reducir la concentración de los precursores orgánicos.

3. Ajuste del pH a rangos menos favorables para la formación de trihalometanos.

4. Cambiar la dosis de coagulante para mejorar la eliminación de precursores.

5. Reducir la dosis de cloro de acuerdo con los requerimientos bacteriológicos.

6. Mover el punto de cloración para que sea el último paso en el proceso de tratamiento.

7. Intensificar los estudios encaminados a la ozonización previa del agua bruta, como posible eliminación de los precursores orgánicos, aunque con la preocupación de los compuestos orgánicos que forman los precursores con el ozono.

8. Emplear bióxido de cloro en la precloración del agua bruta, ya que las concentraciones de trihalometanos cuando se emplean juntos bióxido y cloro es menor que para una cantidad equivalente de cloro sólo.

ASPECTOS DE LA CLORACION DE AGUAS POTABLES

PRACTICAS EMPLEADAS EN LA CLORACION DEL AGUA

Evolución.

Las primeras técnicas de cloración del agua (que se denominaban "cloración corriente", "cloración simple" y "cloración marginal"), se aplicaban con fines desinfectantes. El tratamiento con cloro-amoniaco (que antes se conoció por "cloraminación") se introdujo poco después para reducir la producción de sabores y olores desagradables, que con tanta frecuencia están asociados a la desinfección con cloro marginal. Posteriormente, se desarrolló la supercloración, con la finalidad adicional de destruir las sustancias productoras de sabores y olores desagradables, que con tanta frecuencia acompañan a los compuestos orgánicos que contienen cloro. La introducción de la "cloración de punto de ruptura" y el conocimiento de los residuales de cloro pueden existir en dos formas perfectamente definidas, permitiendo establecer las dos clases de cloración de las aguas empleadas actualmente: la cloración residual combinada y la cloración residual libre.

Cloración residual combinada.

La técnica de la cloración residual combinada implica la aplicación del cloro al agua, para producir con amoniaco natural o añadido un cloro residual combinado y mantener dicho residual en una parte o en la totalidad de la planta o sistema de distribución de agua. Las formas de cloro combinado poseen potenciales de oxidación más bajas que las del cloro disponible libre y son menos eficaces como desinfectantes, pero conservando un residual más estable a través de todo el sistema hasta el consumidor. Generalmente, es técnica que se aplica más bien como poscloración y precedida de una precloración residual libre, lo que, a la luz de las acciones del cloro y los compuestos orgánicos, habrá que considerar ahora en su punto de aplicación tiempos de contacto, etc. No olvidemos que las cloraminas no forman trihalometanos al aplicarse al agua para su desinfección o tratamiento.

Cloración residual libre.

La técnica de la cloración residual libre involucra la aplicación del cloro al agua para obtener, bien directamente, bien mediante la destrucción del amoniaco, un cloro residual disponible libre y mantener dicho residual en una parte o en la totalidad de la planta de tratamiento o sistema de distribución de agua. Las formas de cloro disponible libre poseen potenciales de oxidación más elevadas que las de cloro disponible combinado

y, por tanto, son más eficaces como oxidantes y desinfectantes.

La cloración residual libre se ha considerado hasta ahora como especialmente adecuada en los casos siguientes, que hoy habría que considerar prudentemente a la luz de la acción del cloro sobre los compuestos orgánicos. Dichas situaciones favorables son:

1. Cuando el agua bruta es de mala calidad.
2. Para la oxidación del hierro y manganeso.
3. Cuando el tiempo de contacto es insuficiente para lograr la desinfección con las formas disponibles combinadas.
4. Para reducir sabores existentes antes del tratamiento, o producidos por los compuestos de adición de la materia orgánica con el cloro, así como por ciertas algas.
5. Para reducir el desarrollo de sustancias biológicas en los filtros.
6. Para eliminar las bacterias resistentes en dosis débiles de cloro, que con posterioridad al tratamiento pueden desarrollarse en la red de distribución.

Acción bactericida del cloro y sus compuestos.

Numerosas teorías se han desarrollado para explicar la muerte de la célula bacteriana por la acción del cloro. Exactamente, el cómo se produce esto es todavía un rompecabezas académico. Lo que sí parece haber caído en desuso son las teorías basadas en que el cloro reacciona directamente con el agua para producir oxígeno naciente que destruya la célula bacteriana o que directamente el cloro, por oxidación, produzca el mismo efecto. Hoy parece ser que la acción bactericida del cloro es físico-química, con todos los interrogantes, como las variaciones de resistencias de las bacterias, esporas, quistes y virus, la aparición de mutantes, etc., si bien hay general acuerdo en que la relativa eficacia de distintos compuestos desinfectantes es función de la velocidad de difusión del agente activo a través de la pared celular. Se presume que, después de traspasada la pared celular, el compuesto desinfectante tiene capacidad para atacar el grupo enzimático, cuya destrucción provoca la muerte del organismo. Los factores que afectan a la eficacia de la destrucción son:

1. Naturaleza del desinfectante.
2. Concentración del desinfectante.
3. Tiempo del contacto con el desinfectante.
4. Temperatura.
5. Tipo y concentración de organismos.
6. pH.

ASPECTOS DE LA CLORACION DE AGUAS POTABLES

Pasemos ahora revistas a las acciones de los diferentes compuestos que se forman al adicionar cloro al agua.

Acido hipocloroso.

El HOCl, producto de la hidrolización del Cl en el agua, es el más efectivo compuesto de todas las fracciones del cloro residual. La eficacia germicida del HOCl es debida a la relativa facilidad con que puede penetrar a través de la pared celular. Esta penetración es comparable a la del agua y puede ser atribuida, tanto a su bajo peso molecular, como a su neutralidad eléctrica.

Ion hipoclorito.

El ion OCl⁻, que resulta del fenómeno de disociación del ácido hipocloroso, es un desinfectante poco efectivo, debido a su carga eléctrica negativa, que obstaculiza su difusión a través de la pared celular.

Monocloraminas.

La potencia bactericida de la monocloramina es función de la hidrólisis produciendo HOCl, que es función del tiempo de contacto, de su potencial redox o de su lenta velocidad de penetración a través de la pared celular. Hay que tener en cuenta que en las condiciones normales de una desinfección por cloraminas, el cloro combinado residual estará constituido probablemente por casi un 100 por 100 de monocloramina y que el tiempo de contacto necesario del combinado residual con el agua será del orden de una a dos horas para obtener los mismos resultados bacteriológicos que la misma dosis de cloro residual libre.

Dicloramina.

Es un bactericida más eficaz que la monocloramina, unas dos veces más, pero debe evitarse su producción en el tratamiento de aguas potables por proporcionar problemas de sabores y olores.

Tricloruro de nitrógeno.

Mucho más enérgico oxidante y desinfectante que las otras cloraminas, pero con serios problemas de sabores si llega a formarse un exceso de cloro residual libre que reacciona con la dicloramina, por ejemplo.

Bióxido de cloro.

El bióxido de cloro es un agente oxidante y desinfectante muy activo, que por otro lado puede

destruir los fenoles y otras sustancias que producen sabor en las contaminaciones por aguas residuales de origen industrial y por los productos de descomposición de algas. El bióxido de cloro en concentración equivalente es un desinfectante más enérgico que el cloro libre en aguas alcalinas, con un pH superior a 7,5 y oxida los compuestos mangánicos más rápidamente que el cloro y en aguas con gran contenido de amonio puede ser más ventajoso que el cloro pese a su alto coste, debido a que no reacciona con el amonio para formar cloraminas.

Es un gas inestable, por ello es preciso prepararlo "in situ", lo que afortunadamente no es complicado. El procedimiento más general es obtenerlo por la reacción:



Teniendo en cuenta que en la reacción cloro + clorito de sodio se produce 1 mol de bióxido de cloro por mol de clorito, es preciso utilizar en la práctica un exceso del 200 a 300 por 100 del Cl₂ estequiométricamente necesario, con lo que se difuminan de golpe las preciosas ventajas de la desinfección con ClO₂ y se introducen los inconvenientes de la desinfección cloro.

Tiene, por otro lado, el inconveniente de que el clorito de sodio empleado para obtener bióxido de cloro es caro, del orden de un dólar por kilogramo de producto puro.

Su justificación de empleo se apunta para aguas con fenoles, gran contenido de manganoso, amonio o en el tratamiento de vertidos de aguas residuales industriales, y hoy, ante la evidencia de que no forma con los contaminantes orgánicos precursores, los haloformas peligrosos en potencia (fig. 3).

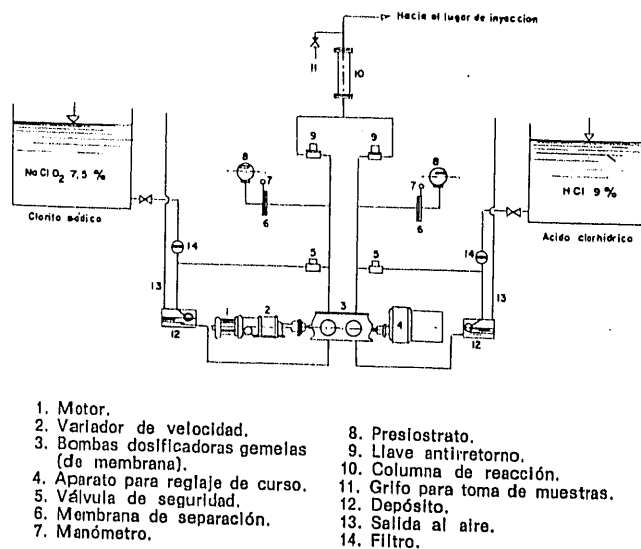


Fig. 3.—Esquema de una instalación de producción de bióxido de cloro.
(Tomado de la Technique de l'eau et de l'assainissement. Bélgica.)

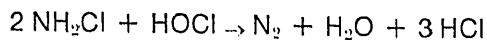
SISTEMAS DE CLORACION Y PUNTOS DE APLICACION

Cuando la cloración del agua se empleó por primera vez en la desinfección, el efluente de la planta de purificación casi siempre se sometía a un tratamiento final. Hoy en día, el empleo del cloro en diversas etapas del tratamiento de aguas y aun en el sistema de distribución, es una práctica extendida. Fundamentalmente, los puntos en que se aplica la cloración dependen de los objetivos específicos de ésta, así como consideraciones de orden técnico, práctico, económico y de higiene.

La cloración corriente o sencilla involucra la aplicación del cloro al agua que no se someta a ningún otro tratamiento.

Cuando se trate de aguas reguladas por embalses o depósitos, el cloro suele aplicarse en las conducciones de salida de dichos sistemas. Si son aguas bombeadas, procedentes de captaciones subterráneas o fluviales, el cloro suele añadirse en la fase de aspiración de la bomba, utilizando la presión de ésta para accionar los alimentadores de cloro.

La precloración implica la aplicación del cloro al agua antes de someterla a cualquier otro proceso de tratamiento unitario. Entre las ventajas que se logran con este proceso, hoy cuestionadas por la formación de los haloformos, son una mejora de la filtración, mejora de la coagulación, reducción de los compuestos que producen sabores, olores y color, la introducción de un factor de seguridad en la desinfección de las aguas muy contaminadas, mientras que el cloro residual en el sistema de distribución se reduce al mínimo, merced también al mayor tiempo de contacto del cloro con el agua bruta a través de todo el proceso de tratamiento, cuestión hoy también con los interrogantes de los haloformos. Generalmente, la dosificación se orientaba a conseguir cloro residual libre más que combinado, o sea, dosis de punto de ruptura o break-point, mínimo de la curva cloro-amoniaco, a partir del cual, al añadir cloro al agua, el cloro residual libre empieza a aumentar, por no consumirse más en la formación de cloraminas y éstas se han descompuesto formando nitrógeno y ácido clorhídrico:



La postcloración se define como la aplicación del cloro al agua después de que ésta se haya sometido a cualquier otro proceso de tratamiento unitario. Si el tiempo de contacto con el agua tratada, del desinfectante, es menor de una a dos horas, si se temen recrudescimientos bacterianos en la red de distribución, o la presencia de otros organismos que puedan degradar la calidad del agua, es preferible la postcloración a dosis de

break-point y aun de supercloración, máxime que la preocupación hoy de la formación de los haloformos que da disminuida al haber eliminado por el tratamiento previo gran parte de los "precursores orgánicos". Con tiempos de contacto superiores, gran longitud de los sistemas de distribución, la postcloración con cloraminas para obtener cloro residual combinado, puede ser muy aceptable.

La precloración implica la aplicación del cloro al agua después de un tratamiento de cloración previo, en uno o más puntos del sistema: Depósitos, red de distribución, estaciones de bombeo, etcétera.

Decloración.

Al emplearse dosis elevadas de cloro que pueden provocar una degradación organoléptica del agua, posiblemente en atmósferas húmedas, el ataque a elementos metálicos, etc., se puede imponer la decloración, o sea, la reducción parcial o completa del cloro residual en el agua mediante cualquier tratamiento químico o físico.

Entre los agentes declorantes tenemos como más importante el bióxido de azufre SO_2 , de aplicación sencilla y precisa como el gas cloro, el carbón activo, sobre todo de tipo granular, la aireación del agua clorada.

Control de la cloración del agua.

El tipo y cantidad de cloro residual necesario para una aplicación determinada, están relacionados con los objetivos del tratamiento, y varían en función del tiempo y lugar. Cuando el objetivo es la desinfección, son factores muy importantes el pH, la temperatura, la demanda de cloro y la vulnerabilidad o resistencia de los organismos a la acción de éste. Como es obvio, las características químicas de las aguas que destinan a un fin económico, difieren radicalmente entre sí, como también ocurre de vez en cuando con las de una misma procedencia. Las cantidades de cloro necesarias para lograr el objetivo deseado reflejan claramente esas diferencias.

Así, pues, el control efectivo de la cloración requiere reajuste en la alimentación del cloro, no sólo en lo que respecta a la variación del caudal de agua, sino también en compensación de las variaciones que la calidad de ésta experimenten. Ya hemos indicado al principio los compuestos que reaccionan con el cloro y que tienen que ver con las técnicas de tratamiento del agua, como son las sustancias inorgánicas reductoras, el amoníaco, los aminoácidos, las proteínas, los micropoluentes, ácidos húmicos, acetonas y materiales carbonosos. El control de los procesos de cloración se basa en alcanzar un residual determinado, que una vez establecido el contacto, se determina

ASPECTOS DE LA CLORACION DE AGUAS POTABLES

por experimentación para lograr la finalidad propuesta. Un mínimo será la demanda de cloro, o sea, la diferencia existente entre la cantidad de cloro aplicada al agua y la de cloro disponible libre, combinado o total que permanece en dicha agua al final del período de contacto especificado, siempre que se compruebe la destrucción bacteriana (o de otros organismos), único índice positivo para determinar la eficacia de la desinfección con cloro. Sin embargo, el cloro residual determinado manual o automáticamente, ofrece la única posibilidad práctica de relacionar esta eficacia con la rapidez suficiente, con el control operativo de la planta.

Los métodos convencionales de determinación de las concentraciones residuales de cloro son función del poder oxidante de este elemento y se basan en sus reacciones con los agentes oxidantes. Fundamentalmente, se emplean tres tipos de ensayos: Yodimetría con almidón, valoración colorimétrica modificada con ortotolidina y valoración amperométrica. Los Standard Methods tienen incorporados, alguno a título provisional, la técnica de estos ensayos.

Registadores y analizadores de cloro residual.

El método amperométrico de determinación del cloro residual libre y combinado tiene la máxima ventaja para lograr el cloro residual apetecido en cada momento. Es evidente que esto no puede conseguirse con ensayos de muestras en el Laboratorio que nos indiquen la modificación que puede tener el cloro residual sin una dedicación casi exclusiva del operador de la instalación, sobre todo si existen variaciones de la calidad del agua y de las pérdidas del cloro por cambiar la temperatura, pH o simplemente la luz solar.

El procedimiento más seguro para conseguir la cloración apropiada es disponer de un analizador y registrador amperométrico del cloro residual. Este aparato puede ser calibrado para registrar solamente el cloro residual y no solamente registrar minuto a minuto la concentración, sino arrancar o parar o aumentar el caudal del clorador.

El funcionamiento es simplemente tener una célula de medida que recibe una muestra constante del agua, en la cual están introducidos dos electrodos que producen una corriente eléctrica, que es proporcional al cloro residual libre o combinado existente en el agua y que es convertida y amplificada en una señal 0-10 mA, la cual se envía al registrador, el cual la señala como partes por millón. La señal 0-10 mA puede ser transmitida a distancia para registro o control.

Se trata de un control de anillo cerrado (closed loop) ya que se añade al circuito la medición del efecto del proceso, de modo que el controlador puede comparar la operación tratamiento con un

punto de referencia (dosis de seguridad del cloro residual) y efectuar los ajustes necesarios para que la descarga del clorador se base directamente en la demanda del cloro del agua, o sea, el out-put del proceso, mediante la retroalimentación de información (feed back) que el analizador de cloro residual proporcione por la medición de cloro residual que se compare con el de consigna.

Instalaciones de cloración.

Nos vamos a referir en este ensayo fundamentalmente a las instalaciones de cloración con cloro-gas, que son las que principalmente se han de emplear. Las instalaciones para empleo de soluciones de hipoclorito son tan sencillas, una bomba de impulsión de la solución y, a veces, un simple botellón de lejía invertido con tubos diferenciales para goteo de la solución, que no merecen comentario.

Podemos distinguir dos tipos de cloradores, los de rangos hasta 10 Kg/hora y los de rango superior. Los primeros suelen aplicarse directamente sobre el contenedor, botella o bidón, o en la pared. Los segundos van alojados en cabinas, disponiéndose en unidades aisladas o formando baterías en espacios contiguos a los de almacenamiento.

En los cloradores, y lo que digamos para estos aparatos puede extenderse a otros dosificadores de gases, como amoníaco o bióxido de azufre, el principio de funcionamiento está logrado por el vacío creado por un eyector, que se desplaza a

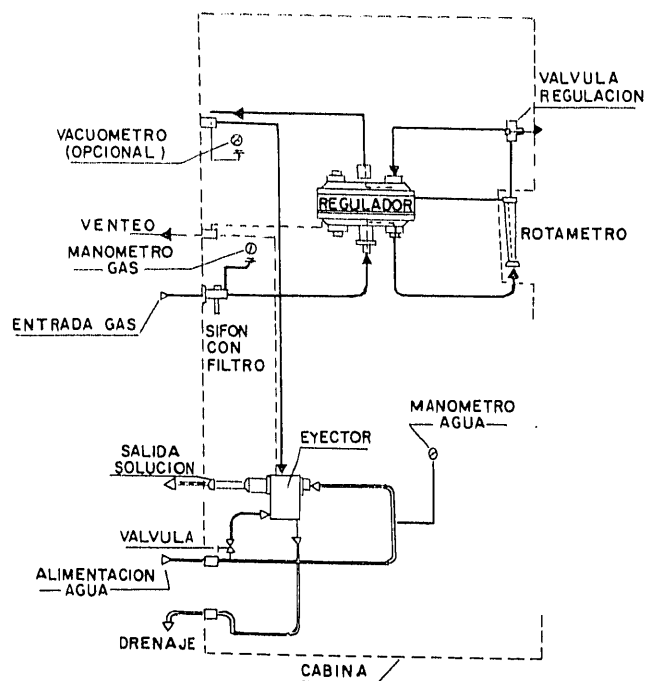


Fig. 4.—Dosificador de cabina con válvula de regulación manual. Eyector interno. Capacidad, 20 Kg Cl_2/h .
(Catálogo Fischer-Porter Co.)

ASPECTOS DE LA CLORACION DE AGUAS POTABLES

la válvula de admisión de cloro provocando la entrada del gas que se diluye en el agua a presión que entra en el eyector, enviando la solución concentrada del cloro en el agua al punto de aplicación.

La regulación del flujo de gas y del vacío producido por el eyector puede hacerse en cloradores pequeños, basándose en la velocidad que adquiere el cloro-gas a través de la válvula de regulación del mismo, pues cuando un gas atraviesa la válvula reguladora, el flujo del mismo se ve afectado por las presiones antes y después de dicha válvula. Solamente hasta que la velocidad del gas sea igual a la del sonido, a partir de ese momento, el flujo está afectado únicamente por las presiones antes de la válvula (fig. 4).

Una vez posicionada la válvula de regulación, el caudal queda constante, mientras que en el eyector se consigue el vacío necesario.

En los cloradores de cabina la constante del caudal se consigue colocando un regulador de vacío antes del rotámetro, y un regulador de presión en la válvula reguladora del caudal, de forma que la diferencia de presiones a ambos lados de la válvula reguladora sea constante o bien un regulador de vacío antes del rotámetro y otro después de la válvula reguladora.

Los cloradores pequeños son alimentados directamente de las botellas o contenedores. A efectos de elección del número de botellas o contenedores que hay que utilizar en una determinada instalación, hay que considerar que, a 20° C y con una contrapresión de dos kilogramos por centímetro cuadrado, las posibilidades de vaporización de una botella o un contenedor son el 1,5 por 100 y por hora de su contenido de cloro. Es decir, que una botella o contenedor de 100 Kg vaporiza 1,5 kilogramos de cloro por hora.

Los cloradores de mayor rango pueden ser alimentados directamente desde los contenedores o botellas, si la temperatura del local no desciende de los 10° o si el consumo no excede del 1,5 por 100 de los contenedores.

Para consumos superiores es necesario suplir el calor de vaporización con los evaporadores, que no son otra cosa que un suministrador de calor necesario para mantener la evaporación del cloro líquido del contenedor.

En los esquemas adjuntos puede dar idea clara de las instalaciones de cloración con las tres etapas del proceso: Almacenamiento de cloro líquido, evaporación del cloro líquido y dosificación y dilución del cloro-gas.

Los cloradores de cabina se dividen en dos grandes grupos:

- De regulación manual, o sea, aquellos en los que la válvula reguladora de caudal se acciona manualmente (fig. 5).

- De regulación automática, en los que la válvula reguladora de caudal se acciona por una señal modulada eléctrica o neumática.

Una instalación normal de accionamiento manual consta esencialmente de:

- Dos líneas de botellas o contenedores de cloro (depende del caudal) de las cuales una está funcionando y otra en reserva, para entrar en servicio cuando se acabe la primera (fig. 6).

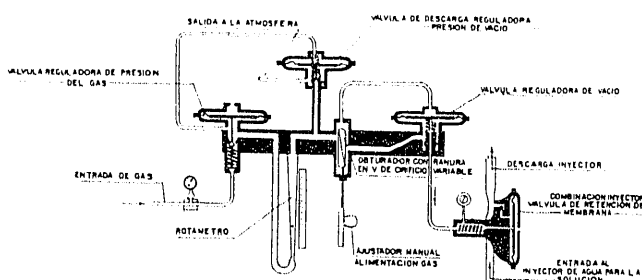


Fig. 5.—Esquema de clorador de cabina con regulación manual con dos reguladores de vacío.
(Catálogo de Wallace and Tiernan-Tonbridge.)

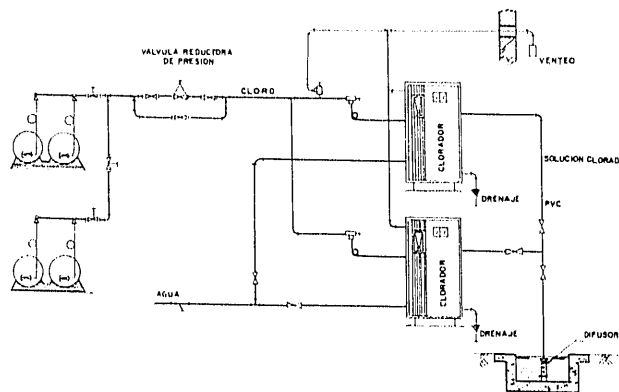


Fig. 6.—Esquema de cloración sin evaporadores.
(Catálogo Fischer-Porter Co.)

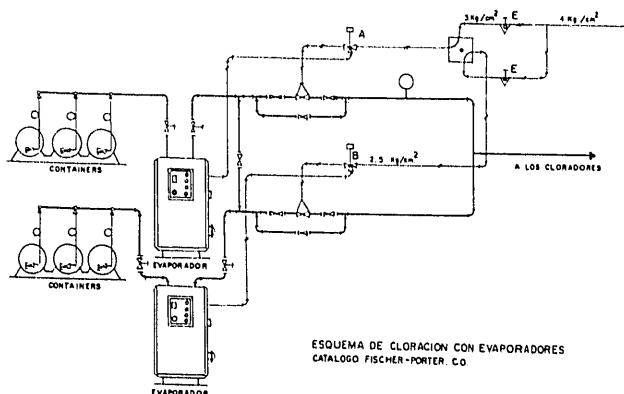


Fig. 7.—Esquema de cloración con evaporadores.
(Catálogo Fischer-Porter Co.)

ASPECTOS DE LA CLORACION DE AGUAS POTABLES

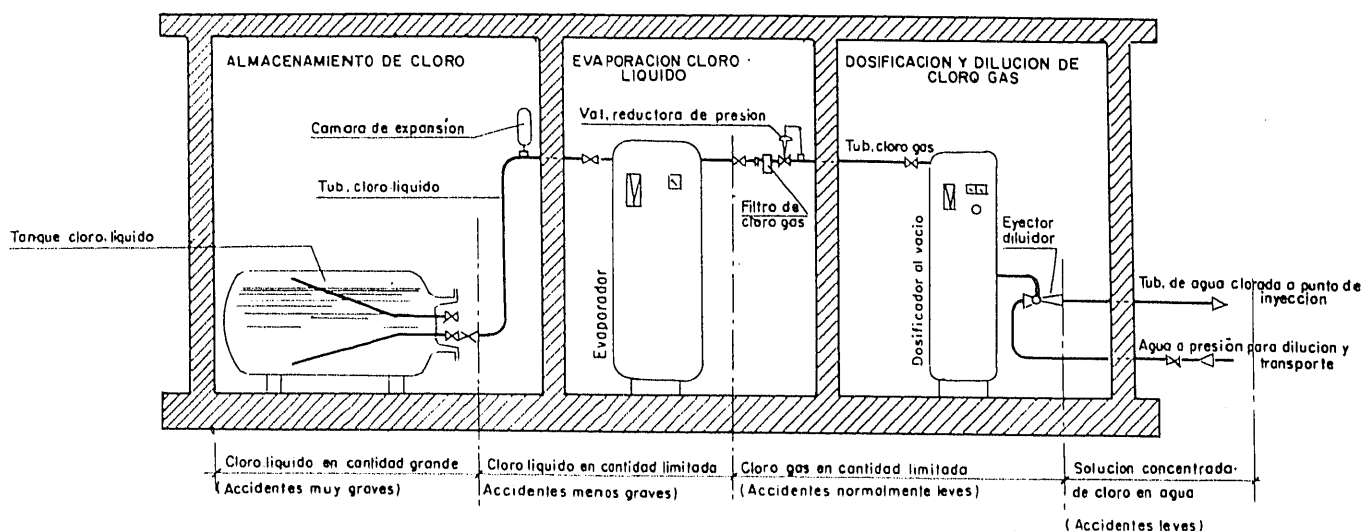


Fig. 8.—Representación esquemática de instalación de cloración para altos consumos horarios de cloro. (Tomado de "La seguridad en la instalación de cloración". Dr. Ing. Luis de Torres Rivademar.)

- Uno o más evaporadores (según el tipo de instalación y el caudal de cloro necesario). A la salida del evaporador se dispone válvula reductora de la presión del cloro, regulándose la presión entre 2,5 y 3 kilogramos por centímetro cuadrado. Por último, a la salida de la válvula va un colector al cual se unen uno o varios cloradores. Como accesorio complementario debe añadirse tubería de comunicación a la atmósfera unida al colector de cloro-gas y a cada uno de los cloradores (figs. 7 y 8).

La instalación puede mejorarse con las siguientes disposiciones que nos vamos a limitar a enumerar:

- Instalación con cambio automático de botellas de contenedores.

Cloraciones automáticas proporcionales al caudal.

- a) Con señal directa de presión diferencial.
- b) Con señal neumática cuadrática.
- c) Con señal eléctrica lineal.
- d) Con señal procedente de una medición de caudal en canal abierto.
- e) Con señal procedente de un medidor de caudal neumático.
- f) Dosificación proporcional al caudal según el número de bombas que estén funcionando para las instalaciones donde el agua a tratar es impulsada por dos o más bombas.
- g) Señal procedente de un medidor de caudal de turbina.

Cloraciones automáticas en función del cloro residual.

- a) Dosificaciones en función del cloro residual, a base de analizador, convertidor, controlador, clorador. La señal puede ser amperométrica o neumática, dependiendo del convertidor.
- b) Dosificación de SO_2 en función del cloro residual.
- c) Dosificación de Cl_2 y SO_2 en función del cloro residual.

Cloraciones automáticas proporcionales al caudal y al cloro residual.

Es una combinación de los casos descritos en los apartados a) de las dos posiciones anteriores. El clorador está dispuesto para recibir dos señales, una de caudal y otra de cloro residual, procedente del analizador de cloro a través de un convertidor y un controlador.

Fugas de cloro. Prevención y neutralización de las mismas.

Como consecuencia de la peligrosidad que supone una fuga de cloro, bien por rotura de una tubería o por fisura de un tanque, o mal funcionamiento de una válvula de seguridad, es obligado construir un sistema de absorción de dicha fuga (figura 9).

Los accidentes que pueden producir fugas de cloro en la atmósfera podemos clasificarlos en tres grupos fundamentales: Fugas del agua fuertemente clorada, que conduce el cloro dosificado

ASPECTOS DE LA CLORACION DE AGUAS POTABLES

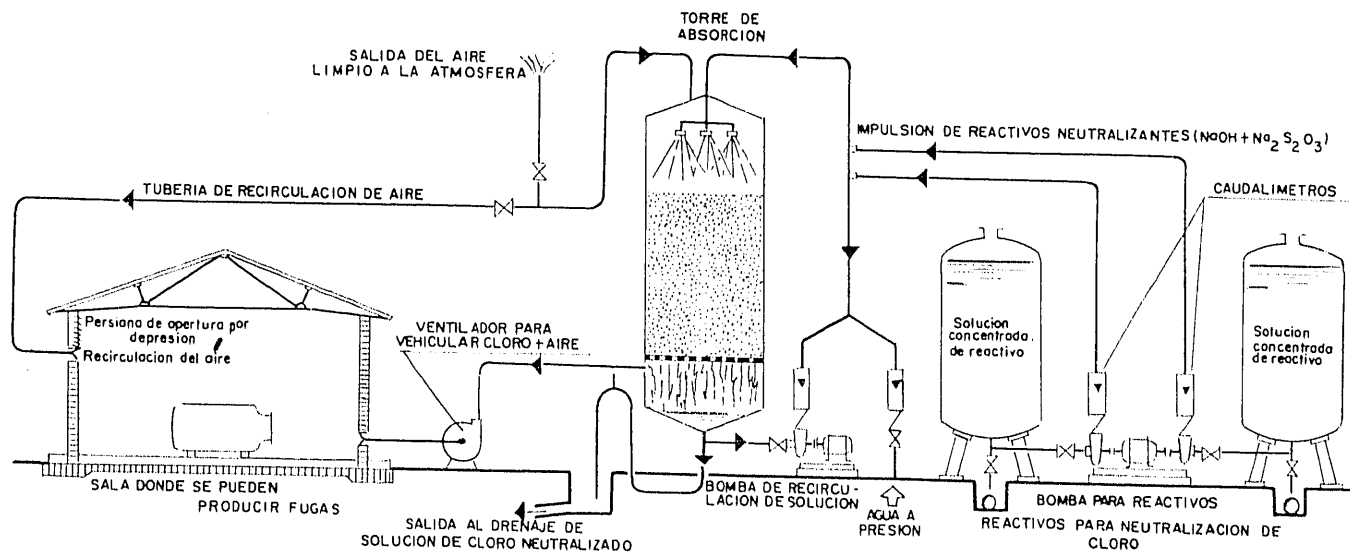


Fig. 9.—Esquema de dispositivo de absorción de fugas de cloro en salas cerradas. (Recirculación de aire y de solución absorbente, opcionales.)
(Tomado de "La seguridad en la instalación de cloración". Dr. Ing. Luis de Torres Rivademar.)

hasta los puntos de aplicación; fugas en tuberías o aparatos con contenido de cloro limitados, sea en forma líquida o gaseosa, y fugas en los tanques de almacenamiento. Vamos a analizar estos tres grupos fundamentales por orden creciente de gravedad.

1. Fugas de agua transportadora de cloro por rotura de tubería.

El índice de gravedad de esta fuga depende de la concentración inicial del cloro en el agua, en la práctica está entre 2.000 y 3.000 gramos de Cl_2 por metro cúbico de agua de dilución y transporte, por lo que vemos se pueden alcanzar contenidos de cloro peligrosos en la atmósfera.

La precaución básica a adoptar será tener un dispositivo detector de cloro, capaz de dar la alarma en forma rápida y perceptible.

En caso de un accidente de este tipo, los pasos a dar son la detención del agua, con lo que se detendrá automáticamente el flujo de cloro, la evacuación del aire de recinto afectado y la absorción y neutralización del cloro.

2. Fugas en las tuberías de cloro-gas o líquido o en los aparatos de cloración.

La característica esencial de estas fugas es que aislando el tanque de cloro de la parte averiada por cierre de las válvulas de aislamiento de los tanques, la cantidad de cloro fugada queda limitada. Evidentemente, puesto que un centímetro cúbico de cloro líquido produce, a la presión at-

mosférica, 456 litros de gas, la gravedad del accidente se multiplica en la misma proporción, si la avería se produce en tuberías o aparatos con cloro líquido en lugar de gas.

Normalmente, las fugas se producen por deficiencias de juntas o por pequeñas grietas por corrosión del recipiente que contiene el cloro. Sólo más raramente se producen roturas francas de tubos, que permiten la salida de grandes cantidades de cloro en cortos espacios de tiempo.

Como en casos anteriores, una primera operación será que personal protegido con máscaras o mejores equipos respiratorios corte el suministro de cloro al punto averiado.

Después de esta operación se evacuará el gas enviándolo a la torre de absorción, donde será absorbido y neutralizado.

3. Fugas en los tanques de cloro líquido.

Las causas de este accidente, el más grave de todos los que pueden ocurrir en una instalación de cloración, pueden ser una sobrepresión por llenado o temperatura excesivos; un accidente mecánico que produzca una rotura o un ataque químico localizado que produzca una grieta. En todos estos casos, la existencia de una carga importante de cloro y la imposibilidad de aislar de dicha carga de cloro el punto de fuga, dan extrema gravedad al accidente.

Los contenedores, tanques y botellas de cloro líquido se hallan, generalmente, separados de la sala de dosificadores y evaporadores, en una zona especialmente dedicada al almacenamiento.

ASPECTOS DE LA CLORACION DE AGUAS POTABLES

La medida de seguridad esencial es utilizar un detector de fugas de cloro, con sus alarmas correspondientes y que la sala tenga buena hermeticidad.

El paso siguiente será: Absorber el aire con cloro y llevarlo a la torre de absorción, neutralizándolo y recirculándolo hasta que la concentración de cloro sea pequeña para enviarlo a la atmósfera.

Equipos de una absorción de fugas de cloro.

El proceso para absorción de una fuga de cloro lo podemos dividir en tres etapas:

- a) Detección y absorción de posibles fugas de cloro en la sala de clorómetros y fisura de tanques en el almacén de cloro.
- b) Absorción del aire con cloro en la "torre", transformándose en hipoclorito sódico.
- c) Neutralización del hipoclorito sódico formado en la torre con una solución de sulfito de sosa.

Los detectores de cloro funcionan haciendo pasar la muestra de aire por una célula electroquímica donde se genera una corriente eléctrica proporcional a la concentración de gas en la muestra. Los detectores ponen en funcionamiento el sistema, con dos niveles de cloro en el aire, uno bajo, de cinco p.p.m. (el límite olfativo inferior es de 3,5 p.p.m.) para los extractores y un circuito de alto para 15 p.p.m. para todo el sistema de neutralización. Hemos de advertir que la concentración máxima de cloro que una persona humana puede tolerar durante una jornada de ocho horas es de un p.p.m. (0,003 mg/l). Una concentración de sólo 3,5 p.p.m. (0,010 mg/l) sólo puede tolerarse durante un par de horas.

Dispositivos de absorción y neutralización.

La absorción del cloro se realiza haciendo pasar el aire con cloro a través de una serie de anillos (RASHIG) dentro de una torre, cilíndrica, ge-

neralmente de Uralita o poliuretano, por las cuales y a contracorriente circula una solución de sosa. Las instalaciones se suelen proyectar para una fuga de cloro líquido de 7' y de cloro gaseoso de 10', o sea, para unos 139 Kg de cloro, o sea, una fisura o defecto de válvula en tanque y una rotura de tubería o latiguillos, de acuerdo con normas en vigor, de las que pueden ser ejemplo las publicaciones en Francia por el "Instituto Nacional de Recherche et de Sécurité pour la Prevention des Accidents du Travail et des Maladies Professionnelles", en su edición *Le Chlore* de octubre de 1970.

BIBLIOGRAFIA CONSULTADA

- CARLES R. COX: "Práctica y vigilancia de las operaciones de tratamiento del agua". Organización Mundial de la Salud. Ginebra.
- "Water Treatment Plant Design". American Water Works Association, Inc. New York, N. Y.
- "Water Quality and Treatment". American Water Works Association, Inc. N. Y. 1.200.
- "Handbook of Chlorination". Geo Clifford White. Van Nostrand Reinhold Company. New York, N. Y. 10.001.
- "Le Chlore". Institute National de Recherche et de Sécurité pour la Prevention des Accidents du Travail et des Maladies Professionnelles". 9, Avenue Montaigne. París.
- ROOK, J. J.: "Haloforms in Drinkins Water Journal". A.W.W.A. Marzo 1976.
- STEVENS, A. A.: "Chlorination of Organics in Drinking Water". Journal A.W.W.A. November 1976.
- "Report on the Carcinogenesis. Bioassay of Chloroform". National Cancer Institut. Wáshington, D. D. 1976.
- HERBERT E. STOKINGER: "Toxicology and Drinking Water Contaminants". Journal A.W.W.A. July 1977.
- WALLACE and TIERNAN: Boletines de Información. Tonbridge (England).
- FISCHER and PORTER, CO: Boletines de Información.
- LUIS DE TORRES RIVADEMAR: "La seguridad en las instalaciones de cloración". Aport. Congreso I.W.W.S.A. 1971.

COLEGIO INGENIEROS DE CAMINOS
BIBLIOTECA