

CAPÍTULO 10

DESINFECCIÓN

Quím. Ada Barrenechea Martel

Ing. Lidia de Vargas

1. INTRODUCCIÓN

La desinfección es el último proceso unitario de tratamiento del agua y tiene como objetivo garantizar la calidad de la misma desde el punto de vista microbiológico y asegurar que sea inocua para la salud del consumidor.

Si bien la práctica muestra que los procesos de coagulación, sedimentación y filtración remueven el mayor porcentaje de microorganismos patógenos del agua, la eficiencia de los mismos no llega al 100%.

Por otro lado, las aguas suministradas por una planta de tratamiento de agua para consumo humano pueden sufrir recontaminación en los tanques de almacenamiento o en las redes de distribución antes de ser distribuidas a la población. La desinfección debe protegerlas también de estas situaciones de riesgo posteriores al tratamiento.

2. LA DESINFECCIÓN

En términos prácticos, desinfectar el agua significa eliminar de ella los microorganismos existentes, capaces de producir enfermedades.

En la desinfección se usa un agente físico o químico para destruir los microorganismos patógenos, que pueden transmitir enfermedades utilizando el agua como vehículo pasivo.

La desinfección es un proceso selectivo: no destruye todos los organismos presentes en el agua y no siempre elimina todos los organismos patógenos. Por eso requiere procesos previos que los eliminen mediante la coagulación, sedimentación y filtración.

Para diferenciar claramente los conceptos referidos a la destrucción de organismos patógenos del agua, es necesario distinguir los siguientes términos:

- a) *Agente esterilizante*: es aquel capaz de destruir completamente todos los organismos (patógenos o no).
- b) *Desinfectante*: es el agente que inactiva los gérmenes patógenos.
- c) *Bactericida*: agente capaz de inactivar las bacterias.
- d) *Cisticida*: agente que tiene la capacidad de inactivar los quistes.

2.1 Utilidad de la desinfección

El uso de la desinfección como parte de un proceso de tratamiento del agua puede obedecer a los siguientes objetivos:

- a) Reducir el contenido inicial de contaminantes microbiológicos en el agua cruda (predesinfección). Este proceso se utiliza solo en casos especiales.
- b) Desinfectar el agua luego de la filtración. Constituye el uso más importante.
- c) Desinfección simple de un agua libre de contaminantes fisicoquímicos que no requiere otro tratamiento.

Para que la desinfección sea efectiva, las aguas sujetas al tratamiento deben encontrarse libres de partículas coloidales causantes de turbiedad y color, las cuales pueden convertirse en obstáculos para la acción del agente desinfectante.

La desinfección alcanza una eficiencia máxima cuando el agua tiene una turbiedad cercana a la unidad. Por ello es indispensable desplegar los esfuerzos necesarios para que los procesos de tratamiento previos sean efectivos y eficientes.

3. TEORÍA DE LA DESINFECCIÓN

Teóricamente, la acción desinfectante de las sustancias químicas se realiza en dos etapas:

- a) La penetración de la pared celular.
- b) La reacción con las enzimas, inhibiendo el metabolismo de la glucosa y, por tanto, provocando la muerte del organismo.

3.1 Factores que influyen en la desinfección

Los factores que influyen en la desinfección del agua son los siguientes:

3.1.1 *Los microorganismos presentes y su comportamiento*

El tipo de microorganismos presentes en el agua tiene influencia definitiva en el proceso de desinfección. La reacción de los microorganismos frente a un desinfectante parece estar determinada por la resistencia de sus membranas celulares a la penetración del mismo y por la relativa afinidad química con las sustancias vitales del microorganismo.

Las bacterias como las del grupo coliforme y las salmonelas son las menos resistentes a la desinfección, pues su respiración se efectúa en la superficie de la célula.

El número de microorganismos presentes en el agua no afecta el proceso de desinfección. Ello quiere decir que para matar una gran cantidad de microorganismos se requiere la misma concentración y tiempo de contacto del desinfectante que para eliminar una cantidad pequeña, siempre y cuando la temperatura y pH del agua sean los mismos.

Cuando las bacterias forman aglomerados celulares, las que se encuentran protegidas en el interior pueden sobrevivir luego del proceso de dosificación del desinfectante. Para evitar que esto ocurra, es necesario favorecer la distribución uniforme de los microorganismos en el agua, lo cual se puede lograr mediante la agitación.

3.1.2 *La naturaleza y concentración del agente desinfectante*

Desinfectantes como el cloro y derivados pueden formar en el agua una serie de especies químicas cloradas, de diferente eficiencia desinfectante.

Por otro lado, la concentración del desinfectante determinará el tiempo de contacto necesario para destruir todos los microorganismos presentes en el agua.

3.1.3 *La temperatura del agua*

Por lo general, la temperatura favorece el proceso de desinfección.

Sin embargo, es necesario tener en cuenta que la solubilidad de los agentes desinfectantes en estado gaseoso es inversamente proporcional a la temperatura. Por tanto, en condiciones extremas de temperatura —por ejemplo, en lugares donde el agua llega a menos de 5 °C o en otros donde puede tener 35 °C—, la cantidad del desinfectante disuelto en el agua variará considerablemente; será menor a mayor temperatura y viceversa.

3.1.4 La naturaleza y calidad del agua

La materia en suspensión puede proteger a los microorganismos existentes en el agua e interferir en la desinfección.

La materia orgánica puede reaccionar con los desinfectantes químicos y cambiar su estructura.

En ciertos casos, si en el agua persisten compuestos orgánicos que no han sido removidos en los procesos previos a la desinfección, se pueden generar derivados tóxicos o compuestos que confieren sabor u olor al agua, muchos de ellos desagradables, lo que cambiaría su calidad organoléptica.

3.1.5 El pH

El pH del agua es de suma importancia para la vida de los microorganismos acuáticos, ya que valores muy altos o muy bajos ofrecen a los microorganismos un medio adverso, con excepción de los quistes de amebas, que soportan pH tan altos como 13 ó tan bajos como 1.

Por otra parte, la acción de los desinfectantes es fuertemente influenciada por el pH del agua. De acuerdo con su naturaleza, cada desinfectante tiene un rango de pH de mayor efectividad. Sin embargo, la práctica demuestra que cuanto más alcalina es el agua requiere mayor dosis de desinfectante para una misma temperatura y tiempo de contacto.

3.1.6 El tiempo de contacto

Cuanto mayor es el tiempo de contacto, mayor será la posibilidad de destrucción de los microorganismos para una cierta dosis de cloro aplicado.

El cuadro 10-1 muestra la variación de los productos de la dosis de cloro por el tiempo de contacto, necesarios para inactivar virus y protozoarios en función del pH y la temperatura. Se puede observar que las mejores condiciones —esto es, los menores valores de TD— se obtienen a valores de pH de 7,0 a 7,5 y a las temperaturas mayores.

Cuadro 10-1. Valores de tiempo de contacto *versus* dosis de cloro (TD) para la destrucción de microorganismos patógenos

pH	Virus		Protozoarios		
	0-5 °C	10 °C	5 °C	15 °C	25 °C
6,0	—	—	80	25	15
7,0	—	—	100		35
7,0-7,5	12	8	—		—
7,5-8,0	20	15	—	—	—
8,0	—	—	150	50	15
8,0-8,5	30	20	—	—	—
8,5-9,0	35	22	—	—	—

3.2 Variables controlables en la desinfección

Las principales variables controlables en el proceso de desinfección son las siguientes:

- 1) La naturaleza y concentración del desinfectante.
- 2) El grado de agitación al que se somete al agua.
- 3) El tiempo de contacto entre los microorganismos y el desinfectante.

Los demás factores no son controlables. Se deduce, entonces, que el punto fundamental de este tema consiste en un estudio del mecanismo de la desinfección.

Finalmente, cuando el desinfectante es un producto químico, resulta fundamental la concentración de la sustancia activa y su efectividad con cada tipo de microorganismo que se desea desactivar.

3.3 Acción de los desinfectantes

El sistema enzimático de las bacterias interviene en el metabolismo celular. Se considera que la principal forma de acción de los desinfectantes es la destrucción o inactivación de las enzimas.

Las enzimas son producidas en el interior de las células y son protegidas por las membranas celulares. En el caso de los desinfectantes químicos, se consideran muy importantes las siguientes características:

- La capacidad de penetración del desinfectante a través de las membranas celulares.
- La producción de reacciones con las enzimas de la célula de manera de producir un daño irreversible en su sistema enzimático.

Los halógenos y especialmente el cloro cumplen con estas características.

3.4 Cinética de la desinfección: la ley de Chick

La desinfección del agua no es un proceso instantáneo, ya que se realiza a una cierta velocidad, la misma que está determinada por tres factores:

- el tiempo de contacto;
- la concentración del desinfectante, y
- la temperatura del agua.

Cuando los microorganismos son expuestos bajo condiciones ideales a la acción de un desinfectante, la tasa de destrucción sigue la ley de Chick.

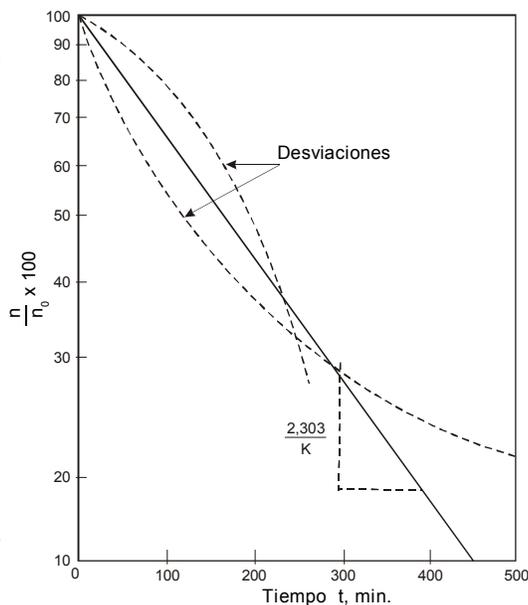


Figura 10-1. Representación gráfica de la ley de Chick

Esta ley señala que el número de microorganismos destruidos por unidad de tiempo es proporcional al número de microorganismos remanentes.

Esto se explica de la forma siguiente:

$$-\frac{dn}{dt} = kn$$

donde:

- n = número de microorganismos por litro
 t = tiempo en minutos
 k = constante de velocidad

Integrando la ecuación anterior desde $t = 0$ a $t = t$
 y desde $n = n_0$ a $n = n_t$:

$$\ln \frac{n_t}{n_0} = -kt \quad \text{o}$$

$$\frac{n_0}{n_t} = e^{kt} = R$$

donde:

- n_0 = número de microorganismos por litro a $t = 0$
 n_t = número de microorganismos por litro a $t = t$
 R = factor de reducción

El valor de t será:

$$t = \frac{-2.303 \lg \frac{n}{n_0}}{K}$$

En general, los virus son más resistentes a los desinfectantes que las bacterias, tal como se nota en la constante de velocidad, por ejemplo, del HOCl para *E. coli* y para el virus de la poliomielitis.

Por ejemplo, en la cloración, los valores de k para estos organismos a 6 °C son los siguientes:

$$\frac{20 C^{0,9}}{t} \quad y \quad \frac{4 C^{0,9}}{t}$$

respectivamente, donde C es la concentración de HOCl en miligramos por litro y t es el tiempo en minutos.

Estos valores de k indican que para el ejemplo dado, k es proporcional a la concentración a la potencia 0,9.

En general, $k = k' C^x$. Donde x tiene un valor entre 0,8 y 1,5.

En la práctica, no siempre la desinfección obedece a una reacción de primer orden. Por ello se presentan desviaciones de la ley de Chick. Por ejemplo, la eliminación de *Entamoeba histolytica* con cloro libre o yodo corresponde a una reacción donde se podría aplicar dicha ley; en cambio, algunos virus no siguen este comportamiento. Por ello, es necesario realizar la elaboración de las gráficas correspondientes, en la práctica, y determinar la desviación en cada caso específico.

La ley de Chick puede tomarse como referencia para conocer el comportamiento de un determinado proceso de desinfección. Conociendo el número de microorganismos y la cantidad de ellos en un determinado tiempo (n/no), se puede determinar el valor de k ; es decir, la velocidad de reacción con el desinfectante.

4. FORMAS DE DESINFECCIÓN

La desinfección del agua puede producirse mediante agentes físicos y químicos.

4.1 Agentes físicos

4.1.1 Sedimentación natural

La sedimentación natural es un proceso por el cual se realiza la decantación de partículas en suspensión por la acción de la gravedad.

La decantación natural del material fino, como limo y arcillas, ayuda a la remoción de las bacterias; sedimentan más rápidamente los esporulados y los huevos de helmintos. La eficiencia de remoción de estos microorganismos dependerá del tiempo de retención del agua en el reservorio o sedimentador.

Debido a que la sedimentación es un proceso en el cual la carga de microorganismos patógenos del agua puede concentrarse en los lodos, es necesario tener en cuenta que los presedimentadores, usados para abastecimiento de agua cruda, requieren un manejo cuidadoso a fin de no captar aguas estratificadas cuya calidad cause problemas en la planta de tratamiento. Por estas consideraciones, se recomienda:

- a) Estudiar el comportamiento del presedimentador, tanto en verano como en invierno, en función de la calidad fisicoquímica y bacteriológica del agua que se capta.
- b) Eliminar periódicamente los lodos generados, para lo cual debe conocerse permanentemente la altura que va tomando. No es recomendable devolver este material al curso de agua cercano, ya que su alto grado de contaminación afectaría seriamente los demás usos del agua (agricultura, pesca, etcétera). Estos lodos deben ser retirados por medios mecánicos y tratados con cal, a fin de eliminar los huevos de helmintos existentes.
- c) Efectuar la circulación vertical del agua, con la finalidad de eliminar la estatificación o de lograr que esta se produzca a la mayor profundidad posible, de tal modo que permita la oxigenación adecuada del agua.

4.1.2 Coagulación–floculación–sedimentación

Los procesos de mezcla, coagulación, floculación y sedimentación son bastante eficientes en la remoción de la mayoría de las bacterias, protozoarios y virus que se encuentran en el agua, debido a que estos microorganismos son partículas coloidales y por ello se encuentran sometidos al mismo mecanismo de remoción de los demás coloides.

Evidentemente, al continuar la aglutinación de partículas, las bacterias y los virus son incorporados dentro de los microfloculos y se sedimentan.

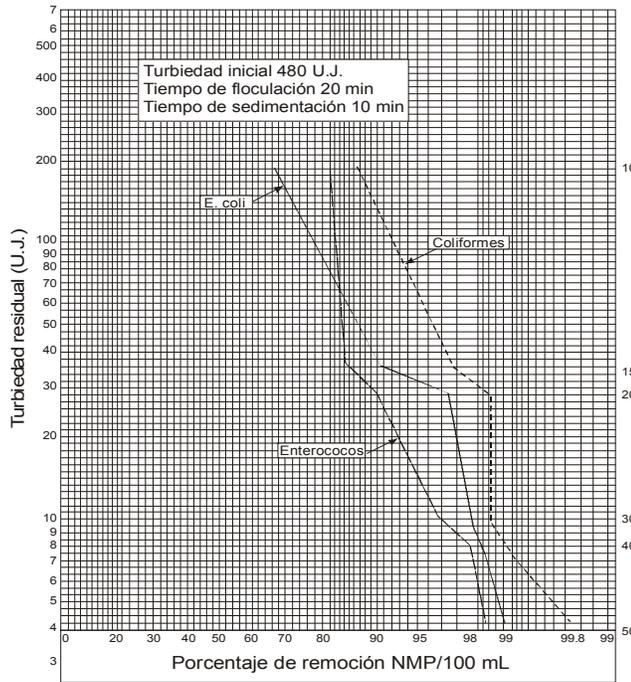


Figura 10-2. Porcentaje de remoción de bacterias en un agua coagulada y sedimentada

Por esta característica, en los lodos provenientes de los sedimentadores, se encuentra gran cantidad de bacterias y virus, lo que obliga a manejar estos lodos con bastante cuidado por su peligro potencial.

Estos procesos de coagulación-floculación-sedimentación son bastante eficientes para la remoción de bacterias vegetativas, tal como se observa en la figura 10-3, dibujada sobre la base de los datos proporcionados por Sastry y colaboradores. En esas curvas se observa que la

remoción de bacterias es directamente proporcional a la remoción de turbiedad y que si se manejan adecuadamente esos procesos, se puede obtener una eficiencia de 99,7%. Robeck y colaboradores hallaron que al incrementarse la dosis de sulfato de aluminio como coagulante, en un agua sembrada con virus, podían obtenerse remociones de 99%, tal como se muestra en la figura 10-3.

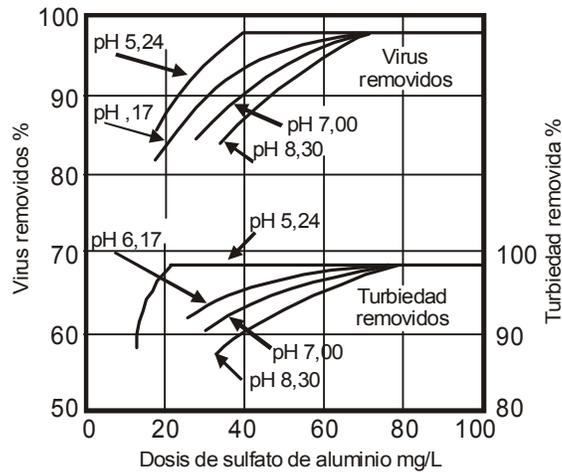


Figura 10-3. Remoción de virus T-4 mediante coagulación y floculación

Por otra parte, Carlson y colaboradores reportan que las partículas de arcilla absorben los virus muy rápidamente. Concluyen que la inactivación de los virus ocurre en dos etapas: en la primera se produce una mezcla de virus e iones de aluminio, y en la segunda, luego de la aglutinación ocurre la sedimentación de los flóculos.

La reducción del contenido de virus en el agua llega hasta 98%, y 90% de la absorción de estos corresponde a los primeros 5 minutos de tiempo de contacto.

Debe tenerse en cuenta que este proceso de inactivación de virus por la adherencia de la arcilla es irreversible, de tal manera que debe estudiarse cuidadosamente el manejo de estos lodos, por el impacto que puede producir su vertimiento a cursos de agua superficial.

4.1.3 La filtración

Los filtros lentos pueden llegar a remover 96% de bacterias, cuando el agua no presenta más de 100 ppm de materias en suspensión y 200 bacterias por mililitro.

Los filtros rápidos pueden llegar hasta 98% de eficiencia en la remoción de bacterias.

La filtración es muy efectiva en la retención de los microorganismos grandes, como las algas y diatomeas; pero los olores y sabores asociados a ellos no son eliminados a menos que se consideren otros procesos específicos para este fin.

4.1.4 El calor

Debido a la gran sensibilidad de los microorganismos a las temperaturas altas, la ebullición del agua es muy efectiva para su eliminación.

El hervido del agua es una práctica doméstica segura y recomendable, cuando existen dudas sobre la calidad del agua potable. El método más simple para preparar agua para consumo humano, segura desde el punto de vista microbiológico, es hervirla durante unos minutos y luego almacenarla adecuadamente.

4.1.5 La luz y los rayos ultravioleta

La luz ultravioleta (longitud de onda correspondiente a la máxima acción microbicida = 254 nm) mata las bacterias.

Sin embargo, la profundidad de penetración de esta radiación en el agua es limitada, lo que se traduce en que si se requiere eficiencia en la eliminación de microorganismos por rayos ultravioleta, se deben irradiar solo láminas delgadas de agua.

Su aplicación solo se reduce a aguas claras y no contaminadas.

Como cualquier proceso, la desinfección con rayos ultravioleta presenta ventajas y desventajas. Entre las ventajas se pueden citar las siguientes:

- a) Actúa sobre una amplia gama de microorganismos, ya que los rayos ultravioleta inactivan los ácidos nucleicos (ADN y ARN). Pueden eliminar bacterias comunes, esporulados y virus.
- b) No reacciona con los constituyentes del agua y, por tanto, no forma derivados ni cambia las condiciones organolépticas del agua.
- c) El proceso es sencillo y de bajo costo.
- d) El proceso no necesita tanques de mezcla o de contacto.

Entre las desventajas pueden mencionarse las siguientes:

- a) La penetración de los rayos en el agua está limitada por el color y la turbiedad, por lo que el agua debe ser completamente clara.
- b) Con el transcurso del tiempo, las lámparas pueden ensuciarse, lo que reducirá la capacidad de penetración de los rayos.
- c) La vida útil de las lámparas es muy limitada.
- d) Los rayos ultravioleta tienen efecto puntual, no dejan radiación residual para eliminar la contaminación posterior en la red, muy frecuente ya que a menudo se producen presiones negativas que pueden permitir el ingreso de aguas contaminadas.

4.2 Agentes químicos

Los compuestos químicos usados en la desinfección del agua son, por lo general, oxidantes fuertes que tienen gran eficiencia en la eliminación de los microorganismos y pueden dejar remanentes tóxicos en el agua, los cuales requieren un control estricto para evitar riesgos en la salud del consumidor.

Los más importantes son los siguientes:

- a) Los halógenos como el cloro, el bromo y el yodo. El efecto germicida y de penetración de estos aumenta con su peso atómico. Por ser los de mayor importancia, se hará mayor referencia a cada uno de ellos en las siguientes secciones.
- b) El ozono (O_3).
- c) El permanganato de potasio ($KMnO_4$).
- d) El agua oxigenada (H_2O_2) y los iones metálicos.

4.2.1 Características de un buen desinfectante químico

Para garantizar su efectividad, un buen desinfectante debe cumplir con una serie de requisitos. Los más importantes son los siguientes:

- a) Ser capaces de destruir, en un tiempo razonable, los organismos patógenos, independientemente de la cantidad en la que estén presentes y de las condiciones propias del agua.
- b) En las dosis usuales, no ser tóxicos para el hombre ni para los animales domésticos, ni presentar olor ni sabor en el agua.
- c) Tener un costo razonable; ser de manejo y dosificación seguros y fáciles.
- d) La determinación de la concentración en el agua debe ser fácil, rápida y económica (de preferencia, automática).
- e) Debe dejar residuales persistentes en el agua, de manera que estos actúen como una barrera sanitaria para posibles contaminaciones futuras.

4.2.2 Los agentes oligodinámicos de desinfección: Ag^+

Los iones plata deben su acción a la fuerza generada por “cantidades diminutas”, propias de ciertos metales al estado iónico.

Se usan generalmente en la desinfección de agua de piscinas a una concentración de 0,15 ppm.

En algunos países europeos, se utiliza este método para la desinfección de aguas industriales. También se lo utiliza ocasionalmente en filtros de agua domésticos de porcelana porosa, con relativo éxito.

Los iones de plata son usados principalmente para preservar la calidad bacteriológica de aguas embotelladas.

Para la preparación de pequeñas cantidades de agua de bebida, se aplica el conocido proceso Katadyn, en el cual los filtros de cartucho utilizados son cubiertos con cloruro de plata ($AgCl$), a través de los cuales pasa el agua, y se produce el intercambio iónico. Este método tiene las siguientes limitaciones:

- a) No es efectivo para eliminar virus.
- b) El efecto tóxico de los iones de plata libres limita su aplicación.
- c) La materia coloidal suspendida, los cloruros y el amoníaco interfieren la efectividad del ion plata.
- d) La eficiencia se controla mediante la determinación de la calidad bacteriológica del agua y no por el control de la concentración del desinfectante.
- e) Requiere un prolongado tiempo de contacto.

4.2.3 Los agentes oxidantes

Los microorganismos contienen enzimas que son catalizadores biológicos esenciales. Estas enzimas son muy vulnerables a la acción de agentes oxidantes fuertes, que puedan traspasar las paredes de la célula.

Los agentes químicos oxidan las enzimas y provocan la muerte de las bacterias.

Los virus también son atacados por los agentes oxidantes, aunque en forma no tan eficiente como lo son las bacterias. Para mejorar su efecto, se requiere una máxima eficiencia de los procesos de tratamiento previos.

A continuación se citan los principales agentes oxidantes usados en la desinfección del agua; por razones prácticas, se trata cada caso en comparación con el cloro.

- ***El ozono***

Es una forma alotrópica del oxígeno, en la cual tres átomos del elemento se combinan para formar una molécula.

El ozono es inestable y se descompone con cierta facilidad en oxígeno normal y oxígeno nascente, que es un fuerte oxidante. Debido a esta característica, actúa con gran eficiencia como desinfectante y se constituye como el más serio competidor del cloro.

El ozono es un gas ligeramente azul, de olor característico, que se puede percibir después de las tempestades. Es poco soluble en el agua y muy volátil. Se mantiene en el agua solo algunos minutos; en su aplicación, se pierde aproximadamente el 10% por volatilización.

Las dosis necesarias para desinfectar el agua varían según la calidad de la misma de la siguiente manera:

- Para aguas superficiales de buena calidad bacteriológica, luego de la filtración, se requieren de 2 a 3 mg/L de ozono.
- Para aguas superficiales contaminadas, luego de la filtración, se debe aplicar entre 2,5 y 5 mg/L de ozono.

Se considera que el ozono es el desinfectante de mayor eficiencia microbicida y requiere tiempos de contacto bastante cortos. Se ha demostrado que cuando el ozono es transferido al agua mediante un mezclador en línea sin movimiento, las bacterias son destruidas en dos segundos. Por ello, el tiempo de contacto en la ozonización no tiene mayor importancia.

La velocidad con que el ozono mata a las bacterias es bastante mayor que la del cloro, debido a que, si bien ambos son oxidantes, el mecanismo de acción es

diferente. El ozono mata a la bacteria por medio de la ruptura de la membrana celular. Este proceso, conocido como *destrucción de células por lisina*, produce la dispersión del citoplasma celular en el agua. En cambio, el cloro debe introducirse a través de la pared celular de la bacteria y difundirse dentro del citoplasma, acción que depende en alto grado del tiempo de contacto.

Debido a su gran poder oxidante, su uso puede ser recomendable en el pretratamiento de aguas para la reducción de metales disueltos y la remoción de materia orgánica, lo que permite un ahorro en coagulantes y tiempos de retención. Experimentalmente, se ha demostrado que se requiere menos cantidad de ozono que de cloro en procesos similares de pretratamiento. El ozono, además de atacar a los precursores de los trihalometanos y reducir su concentración en el agua, destruye a estos compuestos ya formados.

Otra ventaja frente al cloro es que no imparte al agua color, olor ni sabor.

La desventaja más importante del ozono como desinfectante del agua radica en que no tiene poder residual, además de la limitada información sobre la toxicidad de sus productos derivados como los aldehídos, los ácidos carboxílicos, los bromatos, los bromometanos, las cetonas, etcétera.

- **Los halógenos**

La siguiente tabla muestra algunas propiedades de los halógenos:

Cuadro 10-2. Propiedades de los halógenos

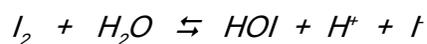
Halógeno	Peso atómico	Peso molecular	Potencial de oxidación	Solubilidad en agua (mol/L)
Flúor	19,0	38	-2,85 volt.	
Cloro	35,5	70,9	-1,36 volt.	0,0900
Bromo	79,9	159,8	-1,06 volt.	0,2100
Yodo	126,9	253,8	-0,54 volt.	0,0013

— ***El yodo***

Es el halógeno de mayor peso atómico; por su bajo poder de oxidación, resulta más estable. Por esta razón, sus residuales se conservan por mucho más tiempo que el cloro.

Como se podrá observar en la tabla anterior, el yodo es poco soluble en el agua, y puede reaccionar como molécula (I_2) o como ion (I^-); es eficaz cuando la molécula se encuentra asociada a alguna molécula orgánica.

El yodo se disocia en el agua formando ácido hipoyodoso:



$$\frac{I_2}{HOI} = K$$

El valor de K depende del pH y la concentración de yodo, como se muestra en la figura 10-4:

Una de las características del yodo es que no forma yodaminas en presencia del amoniac.

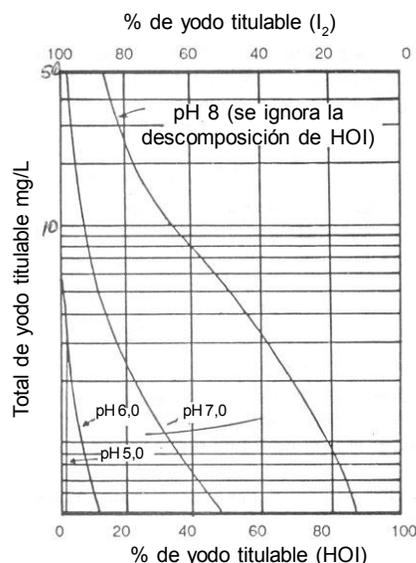


Figura 10-4. Distribución de I_2 y HOI a 25 °C y a diferentes pH

A diferencia del cloro, no reacciona con los fenoles, pero cuando estos están en concentraciones mayores que 1 mg/L, imparte al agua un sabor medicinal.

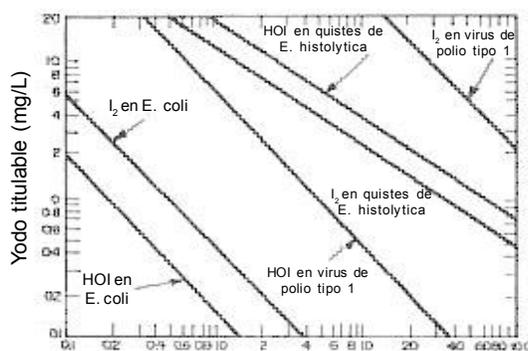


Figura 10-5. Relación entre la concentración-tiempo para destruir 99,99% de microorganismos con I_2 y HOI a 18 °C

La figura 10-5 muestra la eficiencia del yodo en la eliminación de *E. coli*. Con un tiempo de contacto mayor, pero aun práctico, puede eliminar al virus de la polio tipo 1, cuando está bajo su forma ácida HOY. Sin embargo, su eficiencia es muy baja cuando se encuentra bajo la forma de yodo molecular.

La mayor desventaja del yodo como desinfectante del agua radica en su costo, pues es más caro que el cloro.

La tintura de yodo (6,5 g/100 mL de yodo), de expendio en farmacias, puede ser usada en la desinfección de aguas para uso doméstico. Bastarán 3 gotas por litro de agua, con un tiempo de contacto de 15 minutos.

— ***El bromo***

Reacciona con el agua en forma de ácido hipobromoso:



Si bien su efectividad es, en algunos aspectos, similar a la del cloro o yodo, su costo es más alto, por lo que su uso se limita, en términos prácticos, a la desinfección de aguas de piscinas de natación, ya que posee también propiedades alguicidas.

Su ventaja frente al cloro en la desinfección del agua de piscinas es que la dosis mínima residual recomendada de 0,4 g/m³ no imparte olor al agua ni provoca irritación en los ojos, independientemente del valor de pH.

— ***El cloro***

Como es un tema del siguiente capítulo, se citan los compuestos clorados que tienen propiedades desinfectantes:

- El cloro (Cl₂) en forma líquida, envasado en cilindros a presión.
- Hipoclorito de sodio (NaClO) con un contenido de cloro activo de 10% a 15%.
- Hipoclorito de calcio [Ca(OCl)₂], también conocido como HTH (*high test hypochlorite*) con 70% de cloro disponible.
- Dióxido de cloro (ClO₂) producido en la misma planta de tratamiento de acuerdo con la siguiente reacción:

$$5 NaClO_2 + 4 HCl \rightleftharpoons 4 ClO_2 + 5 NaCl + 2 H_2O$$
- Monocloramina (NH₂Cl), formada por la adición de cloro y amonio al agua que va a ser desinfectada.

4.2.4 Estabilidad de los desinfectantes químicos

La estabilidad del agente desinfectante es importante, debido a que se requiere una concentración mínima del desinfectante durante un tiempo o periodo de contacto para destruir los microorganismos.

Las monocloraminas, el dióxido de cloro y el permanganato de potasio no se descomponen significativamente en el agua pura durante varios días.

El ácido hipocloroso y el ion hipoclorito se descomponen en pocos días. Como referencia, en el cuadro 10-3, se consigna el comportamiento del cloro a lo largo del tiempo.

Cuadro 10-3. Descomposición del cloro con el tiempo

Tiempo	0 horas	3 horas	5 horas	1 día	2 días	4 días
Cloro residual (mg/L)	0,6	0,5	0,45	0,3	0,2	0,05

5. LA CLORACIÓN

El cloro, oxidante poderoso, es, sin duda alguna, el desinfectante más importante que existe, debido a que reúne todas las ventajas requeridas, incluyendo su fácil dosificación y costo conveniente.

Sin embargo, presenta algunas desventajas:

- a) Es muy corrosivo.
- b) Puede producir sabor desagradable en el agua, incluso en concentraciones que no significan riesgo para el consumidor.
- c) Su manejo y almacenamiento requiere ciertas normas de seguridad, para evitar riesgos en la salud de los operadores.

El cloro, en condiciones normales de presión y temperatura, es un gas verde, dos y media veces más pesado que el aire.

Algunas de sus sales también tienen poder desinfectante. Las más usadas son el hipoclorito de calcio y el hipoclorito de sodio, cuya eficiencia bactericida es idéntica a la del cloro y que producen reacciones similares en el agua. Se emplean en plantas pequeñas, piscinas y pozos, pues los hipocloradores son más sencillos y económicos.

En términos generales, el costo del hipoclorito es más alto que el de la cloración con cloro gaseoso, pero en lugares donde no se pueden transportar cilindros de cloro o en situaciones de emergencia es la única alternativa posible.

5.1 Características del cloro como desinfectante

- a) Destruye los organismos patógenos del agua en condiciones ambientales y en un tiempo corto.
- b) Es de fácil aplicación, manejo sencillo y bajo costo.
- c) La determinación de su concentración en el agua es sencilla y de bajo costo.
- d) En las dosis utilizadas en la desinfección de las aguas, no constituye riesgo para el hombre ni para los animales.
- e) Deja un efecto residual que protege el agua de una posterior contaminación en la red de distribución.

5.2 Comportamiento del cloro en el agua

El cloro disuelto en el agua se disocia de acuerdo con las siguientes ecuaciones:



A pH mayores de 4, las especies predominantes son el HOCl (ácido hipocloroso) y OCl⁻ (ion hipoclorito). Más aún, el porcentaje de cloro presente como HOCl depende fuertemente del pH, ya que este es un ácido débil, como muestran la figura 10-5 y el cuadro 10-4.

Cuadro 10-4. Relación del pH y la temperatura en la producción de HOCl (%)

Temperatura	pH							
	4	5	6	7	8	9	10	11
10 °C	100	100	98	83	32	3	1	1
20 °C	100	100	96	75	23	4	1	1

La figura 10-5 muestra la influencia del pH en la disociación del ácido hipocloroso para aguas con temperaturas entre 0 y 20 °C. Se puede observar que para valores de pH superiores a 6, disminuye la cantidad de HOCl y aumenta el ion ClO⁻.

El pH de las aguas naturales se encuentra normalmente dentro de unos límites en que se presenta tanto el ácido hipocloroso como el ion hipoclorito.

Por ejemplo, para un pH de 8, se tiene cerca de 22% de HOCl y 78% de ClO⁻. Ambos compuestos poseen acción desinfectante y oxidante, pero el ácido hipocloroso es más eficiente que el ion hipoclorito en la destrucción de los organismos en general.

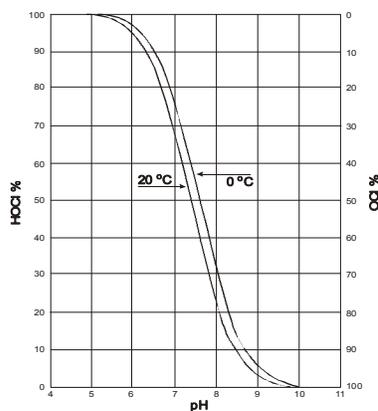
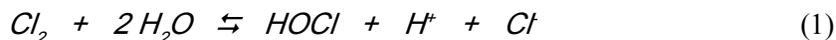


Figura 10-5 Cantidades relativas de HOCl y ClO⁻ en diferentes valores de pH

5.2.1 Reacciones del cloro en el agua

El cloro, al entrar en contacto con el agua, reacciona formando el ácido hipocloroso (HOCl) y el ácido clorhídrico (HCl) según la siguiente reacción:



Esta es una reacción reversible de hidrólisis que se produce en fracciones de segundo.

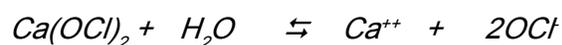
El ácido hipocloroso se disocia en iones de hidrógeno y iones de hipoclorito (OCl^-):



El ácido hipocloroso (HOCl) y el ion hipoclorito (OCl^-) forman el denominado *cloro activo libre*.

Por su naturaleza, el HOCl es el desinfectante por excelencia y su poder es mucho mayor que el del ion hipoclorito (OCl^-). Para efectos prácticos, este último no es considerado como desinfectante.

Las soluciones de hipoclorito establecen el mismo equilibrio de ionización en el agua. Por ejemplo:



Las reacciones (1) y (2) dependen del pH del agua.

Así, la primera predomina con valores bajos de pH y la segunda con valores altos. Las cantidades de ácido hipocloroso y de iones de hipoclorito formados en las reacciones anteriores equivalen, en capacidad oxidante, a la cantidad de cloro original.

Las proporciones de ácido hipocloroso y de iones hipoclorito en el agua clorada, en relación con distintos valores de pH, aparecen en la figura 10-5.

Cuando el pH es menor de 4, el cloro está en forma de cloro molecular. A pH 5,0 y 6,0, el cloro existente está bajo la forma de ácido hipocloroso. Por encima de pH 6,0, hay iones hipoclorito, los cuales predominan cuando el pH supera el pH 7,5. Debido a esto, se comprueba que la desinfección por cloración del agua es óptima cuando el pH es bajo.

Debido a este comportamiento, al agregarse cloro al agua, también se reduce la alcalinidad. Así, una parte por millón de cloro en el agua neutralizará no menos de 0,7 ppm de alcalinidad como carbonato de calcio y puede neutralizar

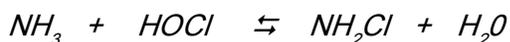
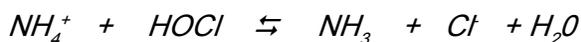
hasta 1,4 ppm de carbonato, lo que depende del grado de ionización del ácido hipocloroso y el grado en el que el cloro sea consumido por reacciones con otras sustancias existentes en el agua.

5.2.2 Reacciones del cloro con el amoníaco

Uno de los componentes frecuentes del agua es el amoníaco. Cuando se agrega cloro al agua que lo contiene, se producen las siguientes reacciones:

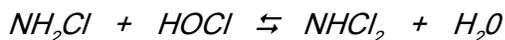


I. Formación de monocloraminas (NH_2Cl):



Cuando se agrega más cloro que el requerido para convertir completamente el amoníaco en monocloraminas, se produce la segunda reacción.

II. Formación de dicloraminas (NHCl_2)



Las dicloraminas formadas no son estables y se descomponen de acuerdo con la ecuación III.

III. $2 \text{NHCl}_2 \rightleftharpoons \text{N}_2 + \text{Cl}_2 + 2 \text{H}^+ + 2 \text{Cl}^-$

Esto significa que el ion NH_4^+ es oxidado por el cloro a N_2 .

A la ecuación completa resultante de la suma de estas ecuaciones parciales se la conoce como *reacción al punto de quiebre*.

Cuando se agrega cloro en exceso, se forma la tricloramina, de sabor amargo y, por tanto, no deseable en el agua:



Las cloraminas monocloramina (NH_2Cl), dicloramina (NHCl_2) y, en ciertas circunstancias, el tricloruro de nitrógeno (NCl_3), forman el denominado *cloro combinado utilizable*.

5.2.3 Reacciones del cloro con otros componentes del agua

El cloro también reacciona con otros componentes del agua como sustancias orgánicas proteicas, aminoácidos, etcétera. También lo hace con otras sustancias químicas (Fe, Mn, NO_2 , H_2S). Con cada una de ellas genera distintos compuestos que no tienen ninguna relación con la desinfección. Por esta razón, al cloro “gastado” en estas reacciones se le conoce con el nombre de *demanda de cloro*.

5.2.4 Resumen de las reacciones del cloro en el agua y su relación con el proceso de cloración

El cuadro 10-5 resume los tipos de reacción del cloro en el agua y su efecto en el proceso de desinfección.

Cuadro 10-5. Tipos de reacción del cloro en el agua

Reaccionantes	Productos	Nombre	Efecto desinfectante
Agua	HOCl , OCl^-	Cloro libre	Potente
Nitrógeno amoniacal	Cloraminas	Cloro combinado	Pobre
Materia orgánica, Fe, Mn, SO_2 , H_2S , etc.		Demanda Cloro consumido	Nulo

Las cloraminas, productos del cloro combinado, son responsables de la desinfección como cloro residual, por ser más estables que el ácido hipocloroso o el hipoclorito. Tienen condicionada su formación, también al pH del agua, lo que se observa en la figura 10-6.

Los residuales de las cloraminas, por ser relativamente estables, tienen una acción desinfectante más lenta. Esta capacidad decrece con el menor contenido de cloro en su molécula; es decir, la dicloramina es más activa que la monocloramina.

El diagrama siguiente permite entender que la cantidad de cloro que debe considerarse para la eliminación de microorganismos no forma parte de la denominada demanda sino del cloro residual (libre y combinado). Esto significa que la eliminación de los microorganismos no produce una disminución sensible de la cantidad de cloro residual, el que, además de ejercer su acción bactericida, protege al agua contra posteriores contaminaciones.

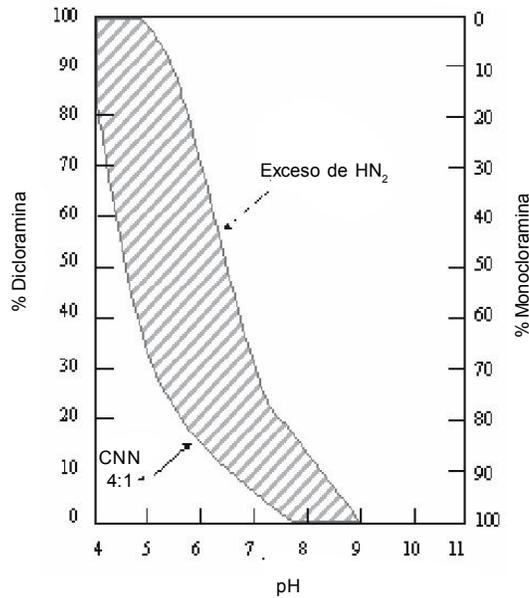


Figura 10-6. Distribución de mono- y dicloramina en función del pH

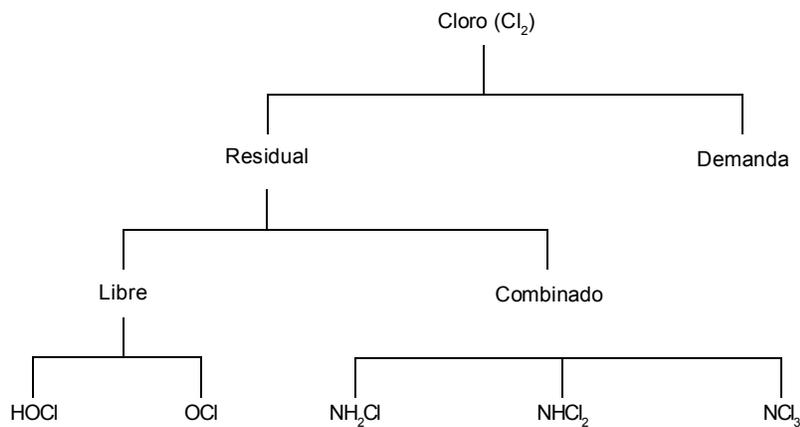


Figura 10-7. Formas importantes de cloro en la cloración del agua

5.3 Otros compuestos de cloro

5.3.1 Cal clorada

Se la conoce como *cloruro de cal*, *polvo para blanquear* o *hipoclorito de cal*. La cal clorada es una combinación de cal apagada y gas cloro.

El oxiclورو de calcio (CaCOCl_2) es el componente básico del cloruro de cal seco. Al disolverse en el agua, se descompone en hipoclorito de calcio y cloruro de calcio:



El hipoclorito de calcio, $\text{Ca}(\text{OCl})_2$, formado es el compuesto activo responsable de la desinfección del agua.

La cal clorada se expende en forma de polvo blanco, seco, con un leve olor a cloro o ácido hipocloroso. Contiene de 30 a 70% de cloro disponible cuando el producto es de reciente fabricación.

5.3.2 Hipoclorito de calcio

El hipoclorito de calcio difiere de la cal clorada en que el cloruro de calcio inerte ya ha sido eliminado en gran parte. Por esta razón, el hipoclorito de calcio puede prepararse para contener concentraciones altas de cloro disponible.

Este polvo puede mantenerse estable hasta el año, si las condiciones de almacenamiento son adecuadas. Mantiene su solubilidad en el agua y deja poco sedimento.

El hipoclorito de calcio es un agente potente oxidante. Por esta razón, debe almacenarse en un lugar aislado, seguro, fresco y seco, pues en contacto con materiales combustibles puede ocasionar incendios.

Debido a que su contenido de cloro activo puede variar en el tiempo y con las condiciones ambientales, es recomendable determinar el cloro activo antes de preparar la solución de hipoclorito de calcio para el proceso de desinfección.

5.3.3 Hipoclorito de sodio

Es un líquido de color amarillento, con un promedio de 15% de cloro activo.

En el Perú, el hipoclorito de sodio contiene de 1 a 10%. Se vende en depósitos de plásticos o botellones de vidrio.

De igual manera que el caso anterior, su estabilidad depende de las condiciones de almacenamiento, en especial, de su contacto con la luz. Por ser una solución, la estabilidad es menor y puede llegar a los tres meses.

Por lo general, se produce clorando el hidróxido de sodio (soda cáustica) de acuerdo con la siguiente reacción:



5.3.4 Dióxido de cloro

Es un gas muy oxidante que no puede ser transportado en estado líquido como el cloro y necesita ser fabricado en el propio local donde se lo emplea.

Es producto de la reacción entre una solución de ácido clorhídrico sobre una solución acuosa de clorito de sodio.

El dióxido de cloro posee propiedades bactericidas, esporicidas y también destruye virus y, en algunos casos, compuestos orgánicos nocivos. El uso del dióxido de cloro permite una rápida eliminación de bacterias en un rango de pH superior al del cloro, lo que lo hace particularmente recomendable para aguas alcalinas, donde su velocidad de desinfección es superior a la del cloro.

El dióxido de cloro es más estable que el cloro y el ozono. Así, el agua tratada con 0,35 mg/L de dióxido de cloro a 20 °C y conservado en la oscuridad contiene todavía este compuesto luego de 48 horas en cantidades que van de 0,20 a 0,25 mg/L. Entre tanto, el cloro, en las mismas condiciones, prácticamente desaparece luego de algunas horas.

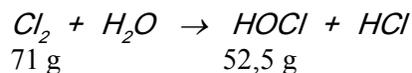
Se ha encontrado que el dióxido de cloro es más efectivo para la inactivación de los quistes de *Giardia* que el cloro, pero menos efectivo contra *E. coli* y rotavirus. A diferencia del cloro, la eficiencia del dióxido de cloro no depende del

pH ni de la presencia del amonio. El dióxido de cloro se descompone rápidamente y no tiene buen efecto residual. Debido a su peligro explosivo, debe ser fabricado en el punto de uso.

5.4 Cálculo de la cantidad de cloro activo de acuerdo con las especies usadas

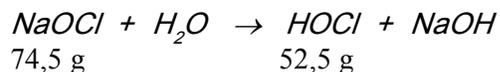
Mediante cálculos químicos simples a partir de la ecuación respectiva, es posible determinar la cantidad de cloro activo en cada caso.

a) Cloro líquido



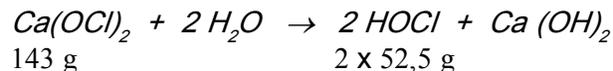
Es decir, 1 kg de cloro líquido produce 0,739 kg de ácido hipocloroso (HOCl).

b) Hipoclorito de sodio



Es decir, 1 kg de NaOCl produce 0,705 kg de HOCl.

c) Hipoclorito de calcio



Es decir, 1 kg de $Ca(OCl)_2$ produce 0,734 kg de HOCl.

5.5 El gráfico del punto de quiebre

El cálculo de la dosis necesaria para una efectiva cloración se hace mediante una prueba de laboratorio que consiste en determinar el punto de quiebre.

La figura 10-8 ilustra lo que ocurre en el proceso de cloración en el punto de quiebre.

El cloro total disponible se da como una función de la dosis de cloro y se define como la suma del cloro libre y del cloro combinado.

El residual de cloro libre disponible es la suma de ácido hipocloroso (HOCl) y del ion hipoclorito (OCl⁻), expresado como mg.Cl₂/L.

El residual de cloro combinado es la suma de las monocloraminas (NH₂Cl), de las dicloraminas (NHCl₂) y de las tricloraminas (NCl₃), expresada como mg.Cl₂/L.

Normalmente, el cloro libre es mucho más eficiente (requiere una dosis menor en un tiempo de contacto también menor) que las cloraminas. Por lo anterior, en el tratamiento del agua, cuando el cloro es el único desinfectante aplicado y cuando las aguas están muy contaminadas, se recomienda la cloración al punto de quiebre, lo cual significa que la dosis de cloro aplicada es suficiente para superar ese punto y, por lo tanto, ha sido oxidado todo el amoníaco (NH₃) presente, con un residual de HOCl, de OCl⁻ o una combinación de ambos según sea el pH del agua.

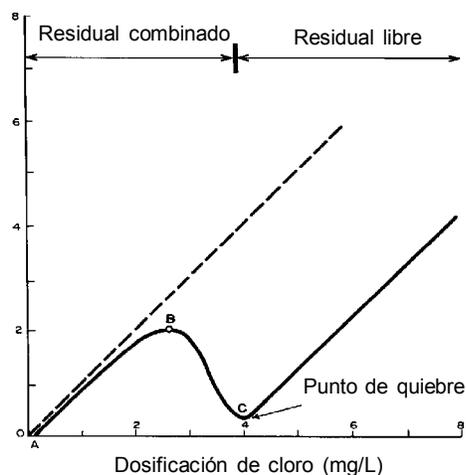


Figura 10-8. Curva del punto de quiebre

5.6 Eficacia del cloro

Se puede decir que hay un consenso en afirmar que el orden de dificultad para la desinfección es el siguiente:

Bacterias < virus < quistes.

A su vez, la dificultad de eliminación aumenta en desagües o en aguas contaminadas con desagües.

El grado de destrucción de los patógenos por cloración depende de la temperatura del agua, del pH, del tiempo de contacto, del grado de mezcla, de la

turbiedad, de la presencia de sustancias interfirientes y de la concentración del cloro disponible.

Las cloraminas que se forman con la presencia del amonio son desinfectantes mucho menos efectivos.

Así, tenemos que a valores normales de pH se necesita 40 veces más cloramina que cloro libre para producir casi el 100% de muerte de *E. coli* en el mismo periodo de tiempo. Para *Salmonella typhi*, el rango es, aproximadamente, de 25:1.

En cuanto al tiempo de contacto, las cloraminas, a una misma concentración que el cloro activo, necesitarán un tiempo 100 veces mayor que el cloro activo para tener el mismo efecto.

En la figura 10-9 podemos apreciar la resistencia relativa de diversos microorganismos a diferentes concentraciones de cloro libre residual, diferentes tiempos de contacto y pH. Se puede ver claramente que el orden de sensibilidad al cloro anteriormente señalado se confirma; son más sensibles las bacterias (*E. coli*, *S. dysenteriae*) seguidas de los virus (*Poliovirus*, *Coxsackie A 2*, *hepatitis*) y luego los quistes de protozoarios (*Entamoeba histolytica*). Se hace la salvedad de que el *Bacillus anthracis* es una bacteria esporulada y, por lo tanto, muy resistente.

En la figura 10-10 vemos la resistencia de otros tres virus y de la *E. coli* a la cloración.

Se encontró que un tipo de *Adenovirus* era más sensible que la *E. coli*; sin embargo, los otros virus estudiados —*Coxsackie virus* y poliovirus— demostraron ser más resistentes. A la concentración de 0,10 mg/L de HOCl, 99% de la población de *E. coli* fue inactivada en cerca de 99 segundos. La misma cantidad de Adenovirus lo fue en un tercio de ese tiempo. A la misma concentración de HOCl la misma cantidad de poliovirus requirió casi 5 veces más y el *Coxsackie virus* 24 veces más que la *E. coli*.

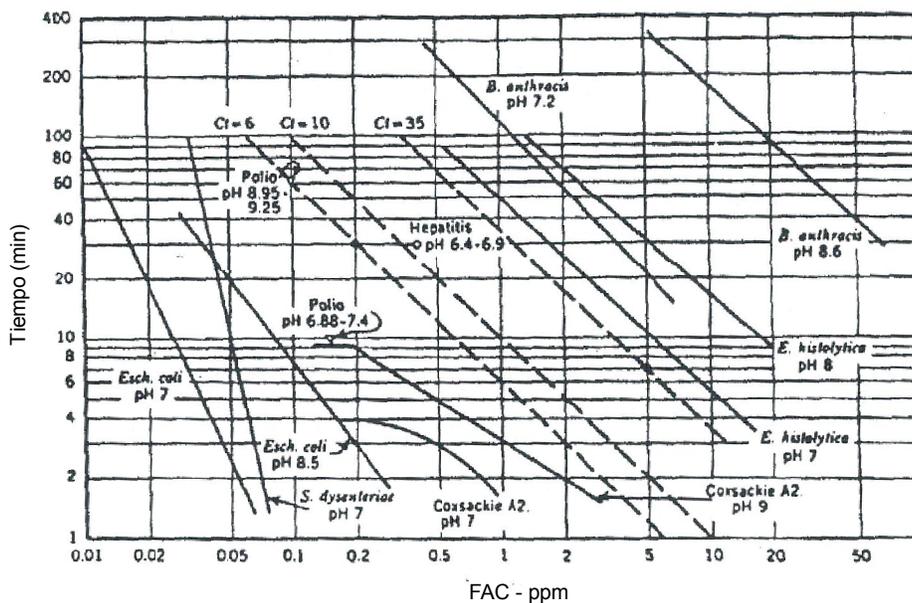


Figura 10-9. Desinfección versus cloro libre residual

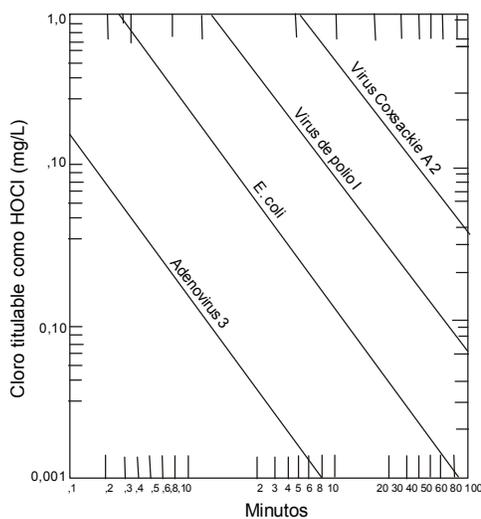


Figura 10-10. Relación entre la concentración de HOCl y el tiempo

El cuadro 10-6 compara la efectividad de los desinfectantes más comunes. De su lectura se desprenderá que el cloro como HOCl es un buen desinfectante, aunque no muy efectivo contra quistes de protozoarios. El ozono es un excelente desinfectante contra todos los microorganismos, pero no es posible tenerlo de forma residual en el sistema de distribución. El dióxido de cloro es efectivo, pero su uso es limitado por traer problemas de sabor y olor en el agua potable; además, no tiene un efecto comprobado contra quistes de protozoarios. Por último, las cloraminas tienen un excelente poder residual pero no la misma eficiencia como desinfectante primario.

Cuadro 10-6. Efectividad de los desinfectantes más comunes para agua potable

Agente desinfectante	Eficacia como biocida			Residual en el sistema
	Bacteria	Virus	Quistes protozoarios	
HClO	Excelente	Excelente	Moderada	Bueno
OCl ⁻	Bueno	Moderado	DNR	
Ozono	Excelente	Excelente	Excelente	No tiene
ClO ₂	Excelente	Excelente	DNR	Bueno*
Cloraminas	Moderado	Bajo	Bajo	Excelente

*Puede tener efecto tóxico.

DNR: datos no registrados.

Fuente: *Handbook of public water system*, 1986.

5.7 Algunos aspectos toxicológicos de la cloración

5.7.1 Los trihalometanos

Los trihalometanos son los productos más conocidos que se derivan de la desinfección. Sin embargo, aportan solamente 10% del total de compuestos halogenados formados por la cloración, aunque en algunas condiciones (como pH ácido o neutro) pueden predominar.

Los trihalometanos se forman por la cloración acuosa de las sustancias húmicas, compuestos solubles secretados por algas y compuestos naturales nitrogenados.

Los principales trihalometanos son el cloroformo (que también puede formarse con la desinfección con cloraminas, pero en concentraciones mucho menores), el bromodiclorometano, el dibromoclorometano y el bromoformo.

Cuando el bromuro está presente en el agua clorada, se produce la siguiente relación:



La concentración de trihalometanos en agua potable varía desde niveles no detectables hasta 1,0 mg/L o más. Se encuentran niveles más altos en aguas superficiales que en aguas de subsuelo y sus concentraciones tienden a aumentar con el incremento de la temperatura, el pH y las dosis de cloro. Se puede minimizar la formación de trihalometanos evitando la precloración y mediante procesos efectivos de coagulación, sedimentación, filtración, y reduciendo los niveles de precursores orgánicos antes de la desinfección final.

Los trihalometanos bromurados se forman por la presencia de bromuro durante la cloración. Debido a su alto contenido natural de bromuro, las aguas del subsuelo clorinadas presentan una mayor concentración de trihalometanos bromurados que las aguas superficiales tratadas.

5.7.2 Clorofenoles

Los clorofenoles se presentan en el agua potable por la reacción del cloro con compuestos fenólicos como biocidas o como productos de la degradación de fenoxi-herbicidas. Sin embargo, debido a su alta incidencia en el sabor del agua, pueden provocar rechazo en el consumidor a concentraciones muy pequeñas. Las concentraciones usualmente encontradas en el agua están por debajo de 0,001 mg/L.

5.7.3 Cloraminas y sus derivados

Las cloraminas son formadas por la reacción del cloro con el amonio o aminas orgánicas. Se pueden formar monocloraminas, dicloraminas y tricloraminas. Sin embargo, las dicloraminas y, principalmente, las tricloraminas son compuestos olorosos y, por lo tanto, su formación en el agua potable no es deseada.

Las cloraminas no reaccionan significativamente con la materia orgánica para formar trihalometanos y, por esta razón, se ha incrementado su uso. El principal producto formado por el uso de la cloramina es el cloruro cianógeno (CNCl). El CNCl es rápidamente metabolizado en el cuerpo humano como cianuro; de allí que el valor guía para monocloraminas en el agua establecido por la OMS en 1993 sea 3,0 mg/L, sobre la base de los efectos tóxicos del cianuro.

5.7.4 Dióxido de cloro

En su reacción con sustancias orgánicas, no forma trihalometanos de manera significativa. Tampoco reacciona con el amonio para formar cloraminas. Sus principales productos derivados son el cloruro, el clorato y el clorito. Existe un valor guía para clorito de 0,20 mg/L, que se considera adecuado para proteger el agua de la potencial toxicidad del dióxido de cloro.

5.8 Estaciones de cloración

Las instalaciones de cloración comprenden los siguientes componentes:

- almacén;
- sala de cloración;
- cámara de contacto.

5.8.1 Almacén

Las características del almacén dependerán de la forma en que el cloro se almacene: sólido, líquido o gaseoso, y de las características de los envases.

a) Cloro gaseoso

El cloro gaseoso se obtiene comercialmente envasado a presión en forma líquida, en cilindros metálicos de diferentes capacidades. El máximo flujo de gas que se puede extraer de un cilindro depende del tamaño del mismo, como se indica en el cuadro 10-7.

El número de cilindros que se deben mantener en planta dependerá del grado de facilidad y confiabilidad del suministro de cloro en el país. La reserva que se puede mantener en almacén puede variar según el caso. Adicionalmente, hay que tener en cuenta los cilindros vacíos que están en espera y los llenos que están en camino.

Si (Q) es el consumo de cloro, en kg/día, (t) el tiempo de almacenaje en días considerado seguro y (C) la capacidad del cilindro de cloro (75 kg ó 1.000 kg), el número (N) de cilindros que deben adquirirse se podría hallar con la siguiente expresión:

$$N = \frac{1,25 Qt}{C} + 6$$

Cuadro 10-7. Características de los cilindros de cloro

Peso del contenido del cilindro		Peso del cilindro solo		Peso total del cilindro		Máximo flujo de cloro que se puede extraer de un cilindro	
lb	kg	lb	kg	lb	kg	lb/día	kg/día
100	50	73	33	173	83	26	11,7
150	75	90-130	50-59	240-280	115-134	40	18,2
2.000	1.000	1.500	680	3.500	1.680	400	182

A partir de estos datos, se puede establecer el espacio disponible que se necesita tener para el almacenaje y la forma de hacerlo. Cuando se trata de cilindros pequeños de 50 y 75 kg, cuyo peso total lleno es de 83 a 117 kg, el manejo de los envases puede hacerse manualmente. En cambio, cuando se usan cilindros de una tonelada, cuyo peso total lleno alcanza 1.680 kg, se necesita emplear poleas montadas sobre rieles y ganchos especiales, como lo muestra la figura 10-11.

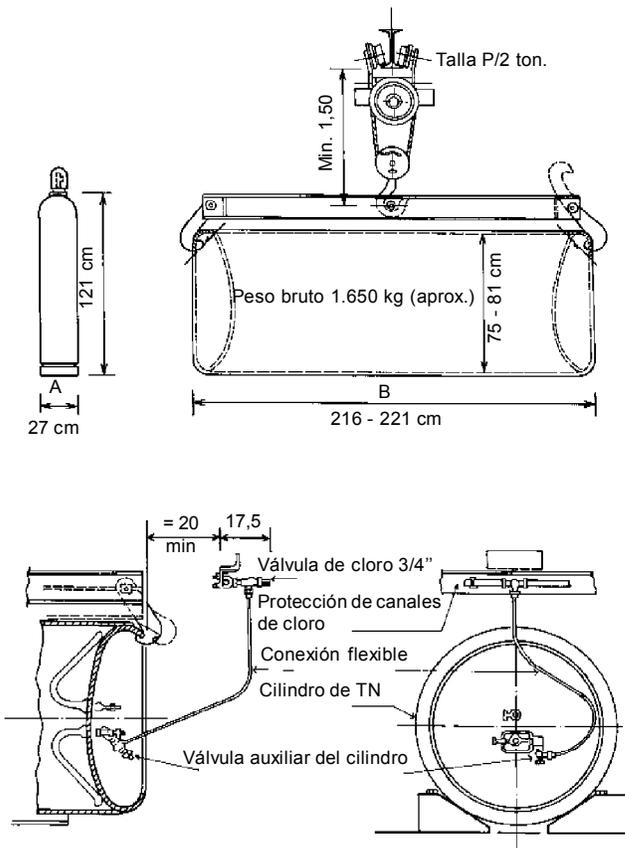


Figura 10-11. Cilindros de cloro gas

Recomendaciones

— El almacén debe tener techo, para evitar que los cilindros se recalienten; las paredes deben tener orificios en la parte inferior o, mejor aún, podrían ser de malla metálica para conseguir el máximo de ventilación.

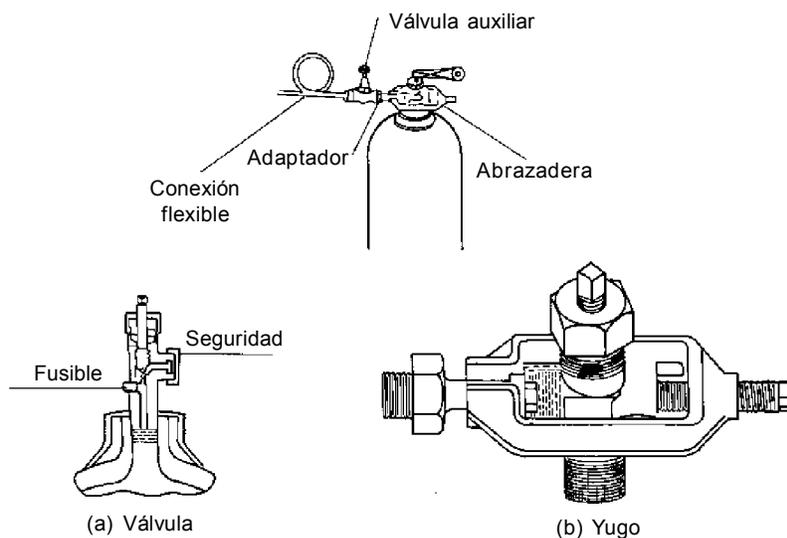


Figura 10-12. Accesorios del clorador

— Todos los tipos de cilindros están equipados con un fusible que se funde entre 70-75 °C, en caso de que el envase de cloro se haya recalentado por cualquier motivo. En los cilindros de 50 y 75 kg, dicho fusible está colocado en la válvula de salida del cloro. En cambio, en los cilindros de una tonelada, hay tres fusibles colocados en cada extremo del envase. Por ningún motivo deben bloquearse o inutilizarse estos fusibles (véase la figura 10-12).

— Los cilindros pequeños —esto es, los de 50 y 75 kg— siempre deben almacenarse y utilizarse en posición vertical. En cambio, los cilindros de una tonelada siempre deben usarse en posición horizontal, colocados sobre soportes de rodachines para que se puedan girar con facilidad.

— Los cilindros pequeños de 50 a 75 kg que se encuentran almacenados, así como los que están en operación, deben asegurarse con cadenas o barras metálicas para evitar volcaduras en caso de sismos o explosiones.

— No debe incluirse en el almacén ningún equipo ni efectuar actividades que produzcan fuego o chispas, ya que si una llama se aproxima a los cilindros, el cloro podría alimentar la combustión del acero. Asimismo, dado el poder corrosivo del cloro, cualquier equipo o instalación metálica ubicado en este ambiente estaría en peligro de deteriorarse con rapidez, debido al riesgo potencial de que se produzca una fuga.

b) *Compuestos de cloro*

Se utilizan en lugares de difícil acceso, normalmente en zonas rurales, en donde no es posible disponer de cloro gas en cilindros. Entre los más conocidos están la cal clorada y el hipoclorito de calcio que se expende en polvo, el hipoclorito de sodio en solución y el dióxido de cloro, y la halazona.

Los compuestos de cloro en polvo vienen en tambores metálicos o plásticos de diferentes tamaños. Si estos productos se almacenan en lugares frescos y secos, la pérdida de cloro activo no sobrepasará 10% por mes. En atmósferas calientes y húmedas, la degradación del producto será más rápida.

El hipoclorito de calcio es, principalmente, un fuerte agente oxidante, por lo que no debe almacenarse en contacto con materiales combustibles porque puede producir incendios. Deben taparse bien los envases luego de haber sido abiertos, pues la acción de la luz y la humedad aceleran mucho la descomposición del producto.

5.8.2 *Sala de cloración*

Cloro gaseoso

Normalmente, en sistemas de medianos a pequeños, en este ambiente se encuentra todo el sistema de medición y control, y los cilindros en operación con su respectiva báscula. Figuras 10-13 y 10-14.

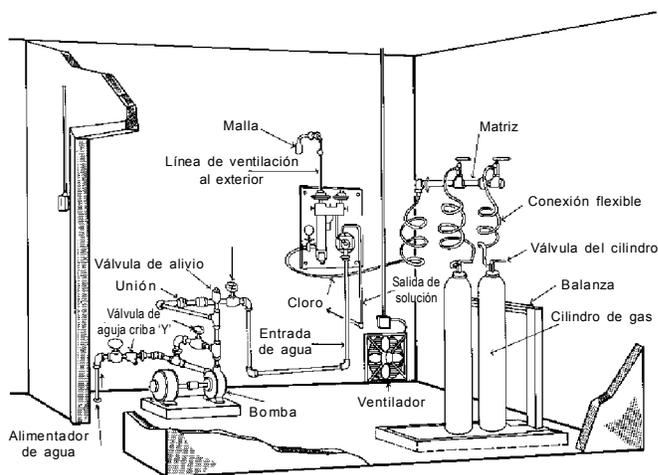
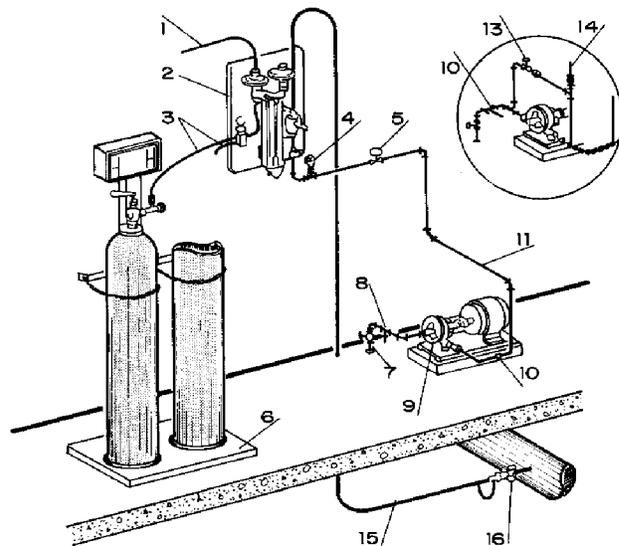


Figura 10-13. Sala de cloración

Por lo general, en sistemas grandes solo se incluyen el sistema de medición y control y los cilindros en operación, sobre todo cuando son de 2.000 lb, permanecen en el almacén, desde donde alimentan al clorador (figura 10-15). Este ambiente debe ser amplio, bien ventilado y con destinación exclusiva. Pequeñas instalaciones pueden ser ventiladas solamente con ventanas colocadas en la parte inferior de los muros, ya que el cloro, por ser más pesado que el aire, tiende a quedar depositado sobre el suelo. Estaciones de cloración más grandes requieren, además de ventilación natural, el empleo de extractores de aire colocados en la parte baja de la habitación y operables desde el exterior de ella.

En estos sistemas se recomienda un cambio total del volumen de aire cada 15 minutos en tiempo normal, y cada 3 minutos cuando existe posibilidad de fugas de cloro. Los extractores deben calcularse de acuerdo con esta norma.

Al escoger la ubicación de los cloradores y demás equipos, debe ponerse especial cuidado en que todas las líneas de tubería queden a la vista, sujetas contra la pared y situadas en lugares accesibles que permitan su fácil inspección y reparación. Véase la figura 10-13.



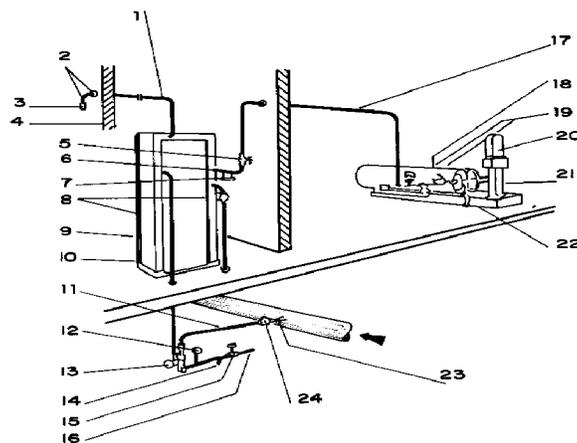
- | | |
|-------------------------------|--|
| 1. Salida a la atmósfera | 10. Válvula <i>check</i> |
| 2. Clorador | 11. Línea de agua |
| 3. Tubos flexibles | 12. Filtro |
| 4. Manómetro de agua | 13. Válvula reguladora de presión |
| 5. Registro | 14. Válvula de alivio |
| 6. Balanza para dos cilindros | 15. Línea de descarga de solución de cloro en el punto de aplicación |
| 7. Línea de succión de bomba | 16. Conexión principal |
| 8. Filtro | |
| 9. Bomba tipo Booster | |

Figura 10-14. Instalación típica para sistemas de poca capacidad

a) Sistema de medición y control

Estos sistemas pueden variar mucho, dependiendo de la forma en que se utilice el cloro: gas envasado en cilindros o compuestos de cloro en polvo, o en solución.

Existe una gran variedad de equipos para aplicar gas cloro, pero, en general, se pueden considerar dos tipos básicos: los de presión y los de vacío (cuadro 10-8). En los primeros, el gas se inyecta directamente y se utiliza para ello la presión de los cilindros. En el segundo tipo, la constricción creada por el tubo Venturi del inyector produce un vacío que se transmite a través de todos los dispositivos internos de los cloradores y las líneas de aducción. Estos equipos pueden colocarse directamente sobre el cilindro, sobre todo los de menor capacidad, así como en la pared o sobre un pedestal o caja separada, de acuerdo con su tamaño y su marca.



- | | |
|------------------------------------|---|
| 1. Línea de plástico | 13. Inyector |
| 2. Salida a la atmósfera | 14. Filtro |
| 3. Criba | 15. Registro |
| 4. Pared | 16. Agua de operación |
| 5. Registro | 17. Línea de acero |
| 6. Unión | 18. Gas cloro-manómetro |
| 7. Filtro | 19. Cilindros de cloro |
| 8. Conduit para 115 V. | 20. Balanza |
| 9. Línea de succión del inyector Y | 21. Múltiple |
| 10. Clorador V 800 | 22. Válvula reductora de presión de cloro |
| 11. Línea de descarga de solución | 23. Punto de aplicación |
| 12. Manómetro de agua | 24. Conexión principal |

Figura 10-15. Instalación típica para sistemas de gran capacidad

En todos estos equipos el cloro se transporta y se mide como gas seco, excluyendo el contacto directo con la humedad. Solamente a partir del inyector o del punto de inyección, el gas se mezcla con el agua.

Cuadro 10-8. Clasificación de aparatos cloradores

Tipo	Sistema de montaje	Capacidades	
		kg/día	lb/día
De presión	En pedestal	2 a 140	4 a 300
	Directamente en los cilindros	1 a 34	2 a 75
	En pedestal	2 a 8.000	4 a 8.000
De vacío	En la pared	1,4 a 100	3 a 200
	Directamente en los cilindros	1,4 a 230	3 a 500

El gas cloro seco es poco corrosivo; por este motivo, los cilindros de cloro son metálicos. En cambio, dado que la solución acuosa es altamente destructiva, resulta más conveniente el uso de materiales como el PVC, el teflón, el caucho y el polietileno.

Cloradores de alimentación directa a presión

Los sistemas de alimentación directa son más costosos que los de alimentación al vacío, pero tienen la ventaja de que es la presión del gas del cilindro la que hace funcionar el clorador, y no se necesita, por tanto, suministro adicional de agua ni energía eléctrica, como en los otros tipos de cloradores, lo que los hace especialmente adaptables a lugares donde existen limitaciones.

Los cloradores de alimentación directa (figura 10-16) funcionan de la siguiente forma: el gas cloro entra a la presión normal a que está en el cilindro, que es de 5,3 a 6,3 kg/cm² y llega a la válvula reguladora de presión del gas A, en la cual esta se reduce a 1,4 kg/cm². La contrapresión en el punto de inyección no puede ser mayor de la mitad de este valor. De allí pasa por el medidor de caudal C, que suele ser un rotámetro calibrado en lb/día o kg/h. Después del rotámetro, el gas pasa por un sistema de ajuste D, que permite fijar la tasa de flujo con que se quiere hacer trabajar el clorador y por último un sistema E que regula automáticamente la presión. En algunas marcas, esta es solamente una válvula de retención. El cloro se inyecta a la tubería por medio de un difusor F. Una válvula de seguridad impide que el exceso de presión pueda causar un accidente.

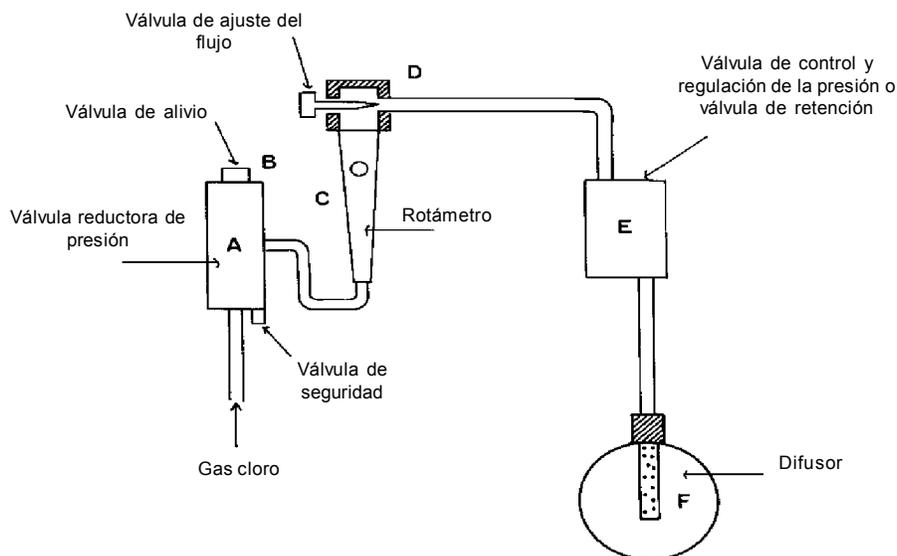


Figura 10-16. Esquema de un clorador a presión

Según el fabricante, los dispositivos anteriores pueden ser piezas independientes montadas en un pedestal o integradas en un solo conjunto para ser puestas directamente en los cilindros de cloro. En estos casos, se incluye, además, una válvula de alivio *B* de acción manual que permite extraer el cloro que haya quedado en el aparato antes de hacer el cambio de envases. Estos equipos se usan poco por no ser muy seguros.

Cloradores de alimentación al vacío

Los cloradores de alimentación al vacío son más seguros y confiables que los cloradores a presión. Por ello, su uso está bastante extendido, a pesar de que necesitan suministro adicional de agua para su funcionamiento.

La operación de este tipo de cloradores está basada en el vacío parcial creado por una válvula llamada *inyector* o *eyector*, que se coloca inmediatamente antes del punto de inyección del cloro al agua, la cual tiene una constricción por la que se hace pasar un flujo de agua, lo que crea una subpresión que se comunica a todas las válvulas y conductos del clorador e induce la apertura del regulador inicial del gas. Esto hace que todas las válvulas y conductos se llenen de cloro gaseoso, el cual circula a una presión inferior a la atmosférica.

El funcionamiento de los cloradores al vacío está esquematizado en la figura 10-17 y consta de los siguientes elementos:

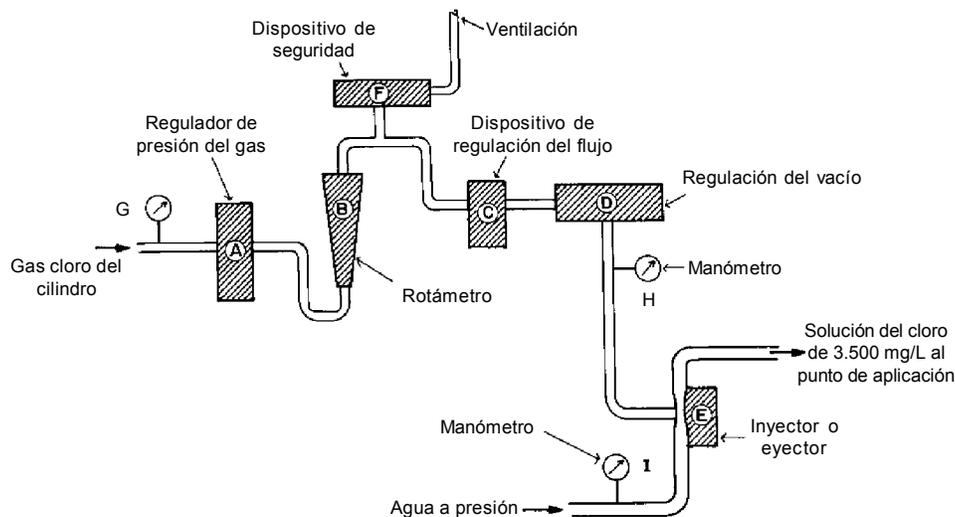


Figura 10-17. Esquema de un equipo de cloración al vacío

- **Regulador de presión del gas**

El gas que sale de los cilindros a través de la tubería matriz entra al clorador a través de la válvula *A*, que contiene un diafragma presionado por un muelle, y que regula y mantiene el vacío en el aparato.

El vacío en el clorador tiene que ser mayor que la fuerza que desarrolla el muelle para que el diafragma se abra y pueda entrar gas.

- **Rotámetro**

El gas cloro que sale de la válvula *A* pasa a través de un rotámetro *B* que mide el flujo que está pasando. Cada aparato tiene un juego de rotámetros que pueden instalarse para medir diferentes rangos de caudales. El rotámetro se debe solicitar según la capacidad del equipo que se requiera en la planta de tratamiento.

- **Dispositivo de regulación del flujo**

Como lo muestra la figura 10-18, los dispositivos de regulación del flujo varían según la marca y la clase de aparato. En algunos casos, se usa un orificio en V que puede desplazarse hacia arriba o hacia abajo, y aumentar o disminuir el área de paso. En otros, en cambio, se usa un cono dentro del caudal que mueve una pieza que puede aumentar o disminuir la sección. Por último, otros fabricantes incluyen un orificio regulado por una válvula de aguja. Estos dispositivos permiten controlar la tasa de flujo con la cual trabaja el clorador y pueden ser operados en forma manual o automática, según el modelo de que se trate.

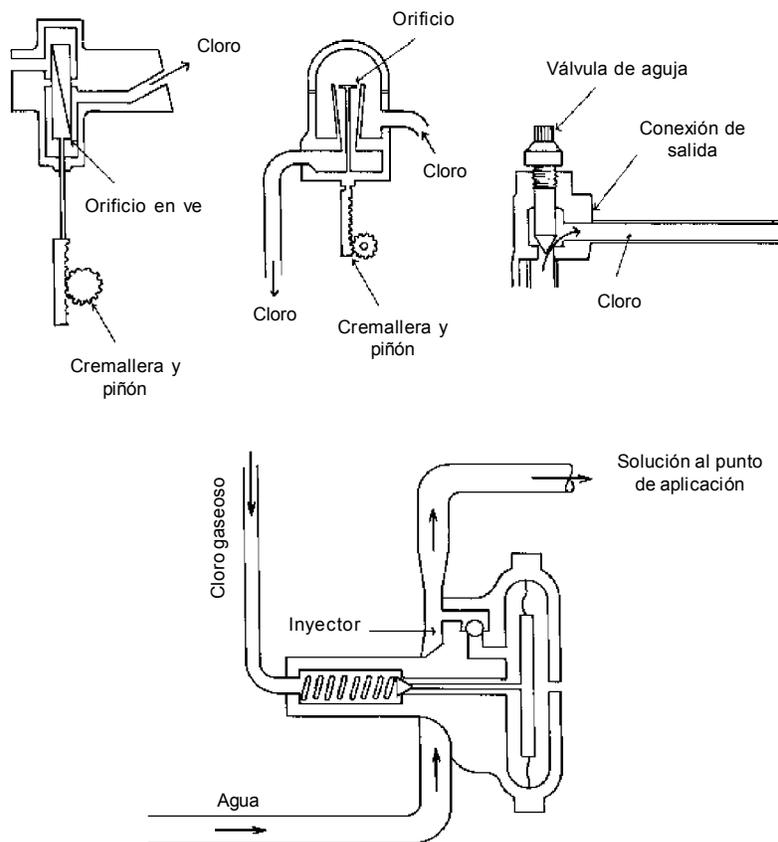


Figura 10-18. Dispositivos de regulación del flujo

- **Regulación del vacío**

Esta válvula tiene por objeto regular el vacío después del orificio medidor *C*. Consiste en una caja que contiene un diafragma operado por un muelle que regula la posición de aquel, de acuerdo con el vacío producido por el eyector.

- **Inyector o eyector**

Consiste en un tubo Venturi a través del cual pasa una corriente de agua, que crea una subpresión en un diafragma metálico, lo que obliga a este a desplazarse y crear un vacío parcial en todos los conductos y válvulas del clorador.

En el inyector o eyector, el gas cloro se mezcla con el agua y produce una solución cuya concentración debe ser de unos 3.500 mg/L. Véase la figura 10-17.

- **Dispositivos de seguridad**

Todos los aparatos cloradores deben tener diferentes dispositivos de seguridad que impidan la disminución o aumento excesivo del vacío o de la presión del agua, lo que podría dañar los equipos.

Entre estos dispositivos se cuentan los siguientes:

- La válvula de alivio (*F*), que se abre cuando el vacío excede de cierto límite o permite que el clorador succione aire para evitar que salga gas a la atmósfera.
- La válvula *check* que va junto al inyector o es parte de él, y que impide que penetre agua dentro del clorador y se mezcle con el gas, lo que podría dañar todos los elementos internos.

- **Controles del clorador**

Los cloradores suelen tener los siguientes aparatos de control:

- Manómetro de presión de entrada del gas.

- Manómetro de vacío.
 - Rotámetro con escala graduada para medir la tasa de flujo que está pasando por el clorador.
 - Perilla de ajuste que cambia la posición del orificio variable dentro del clorador y fija el flujo de gas cloro que se quiere aplicar.
- **Abastecimiento de agua**

Para alimentar el clorador, el agua debe —dentro de lo posible— tener baja turbiedad; no debe contener partículas en suspensión y, sobre todo, debe estar libre de arena. Salvo contados casos, se requiere instalar una bomba que suministre la presión que necesita el inyector. Dicha bomba debe ser capaz de producir altas presiones al trabajar con flujos pequeños. Los flujos se calculan teniendo en cuenta que la concentración de la solución debe ser de 3.500 mg/L. Para esto puede utilizarse el gráfico de la figura 10-19 o la siguiente expresión:

$$Q = \frac{C}{302}$$

donde:

- Q = flujo del inyector, en L/seg.
 C = capacidad del clorador, en kg/día.

Para el correcto funcionamiento del sistema de bombeo, deben incluirse los siguientes elementos:

- Válvula de cierre de la succión.
- Criba que retenga las impurezas que puedan bloquear el inyector y, al mismo tiempo, per-

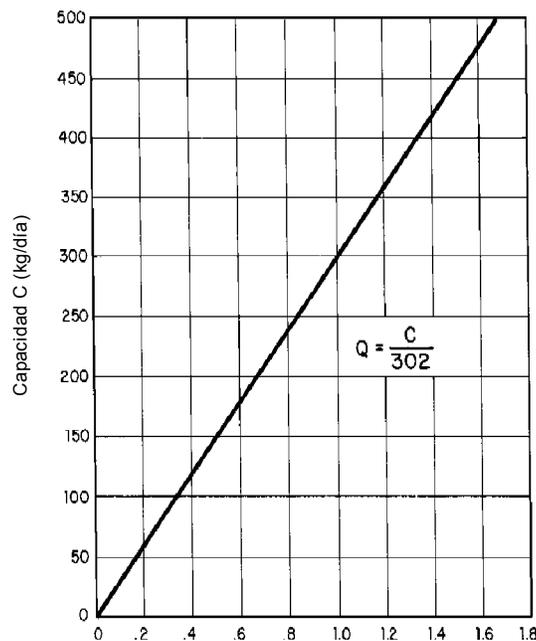


Figura 10-19. Abastecimiento de agua requerido por los cloradores de vacío para mantener la concentración de 3.500 mg/L de la solución

figura 10-21. El diseño de esta matriz es de mucha importancia para garantizar un flujo sin obstrucciones. Cuando se expenden los cilindros de cloro, contienen 85% de líquido y 15% de gas. Al extraer este último, disminuye la temperatura y algunas veces aparece escarcha en la superficie del cilindro por condensación de la humedad, lo que indica que el gas se está evaporando rápidamente.

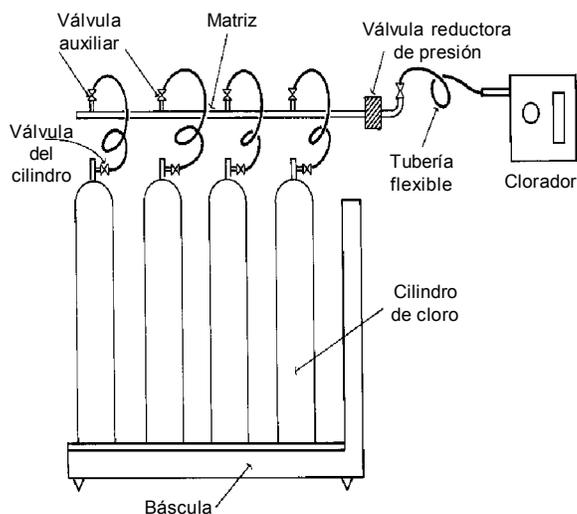


Figura 10-21. Sistema de conexión para varios cilindros

Ahora bien, para que el flujo no se interrumpa, la temperatura en ellos debe ser más alta o igual a la temperatura en las tuberías aductororas, pues si estas se enfrían más rápidamente que el cilindro (aunque la diferencia térmica sea pequeña), el gas se puede relicuar en las líneas de conducción y producir obstrucciones en los aparatos cloradores.

c) Evaporadores

En las grandes estaciones de cloración que gastan más de 1.000 kg/día se requiere el uso de muchos cilindros de cloro (más de seis) conectados a la misma matriz aductora para alimentar los cloradores. Como esto puede traer problemas operacionales, se suele incluir en el equipo un *evaporador* que permita extraer cloro líquido (en lugar de gas) de los cilindros, lo que tiene, entre otras, las siguientes ventajas:

- Disminuye el número de cilindros en servicio necesarios para alimentar el clorador, pues cuando se extrae cloro líquido no existe la misma limitación que cuando se extrae cloro gaseoso.
- Se evita la relicuefacción del cloro en las líneas de conducción. Esto es especialmente importante cuando la longitud de la tubería entre la sala de almacenamiento y la sala de cloración es larga.

Los evaporadores van montados lo más cerca posible de los equipos de cloración y consisten en un tanque metido dentro de un baño de agua caliente, cuya temperatura es controlada por un termostato a 70-75 °C. Esto hace que el cloro pase del estado líquido al gaseoso y en esta forma se lleve a los cloradores.

Para evitar que el cloro líquido pueda pasar al clorador y dañarlo, se incluye una válvula que se cierra automáticamente y hace sonar una alarma cuando la temperatura baja de 65 °C.

Además, es importante tener:

- Una criba para retener las impurezas del cloro y la posible formación de “nieblas” o condensación en gotitas del gas, lo que es perjudicial para los equipos.
- Una válvula reductora de presión en la tubería de salida del evaporador.

La figura 10-22 presenta un esquema de instalación de un evaporador. El cloro líquido debe conducirse en tuberías metálicas y no de PVC o plástico, pues ataca rápidamente estos materiales.

Cuando, por defectos de fabricación, existen en el cloro cantidades apreciables de tricloruro de nitrógeno, se pueden presentar explosiones en los evaporadores que constituyen un serio riesgo para los operadores y las instalaciones de la planta.

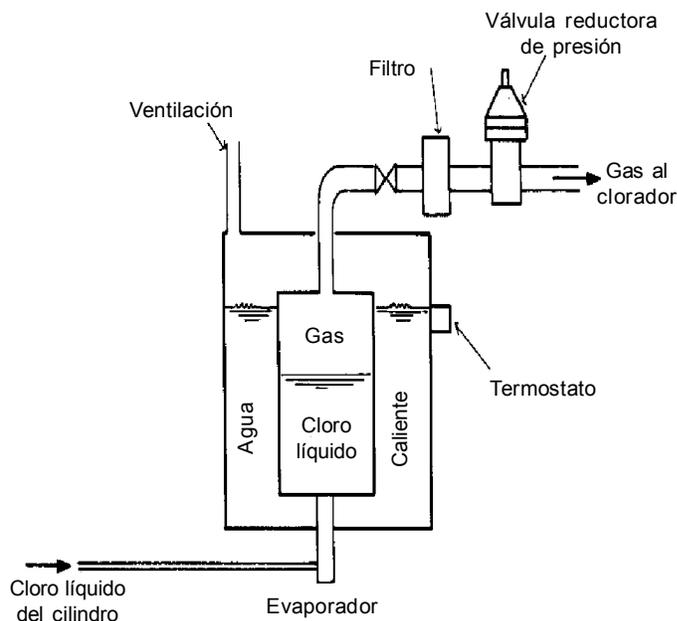


Figura 10-22. Instalación de un evaporador

d) Implementos de protección

Los implementos de protección más importantes son los siguientes:

- sistemas de alarma;
- máscaras;
- equipos para taponamiento de fugas;
- botellas de amoníaco.

- **Sistemas de alarma**

Existen varios tipos de alarmas que pueden incluirse en los diseños de los cuartos de cloración. Los más importantes son las alarmas de pared, los discos rompibles y las alarmas internas de los aparatos.

- Las alarmas de pared pueden ser de dos tipos. El primero consiste en un papel sensitivo impregnado en ortotolidina, cuya decoloración es analizada por una célula fotoeléctrica y los resultados transmitidos a un circuito de alarma; este último entra en funcionamiento cuando existe decoloración del papel.

El otro tipo consiste en una celda que detecta los cambios de conductividad en un cierto volumen de agua, por la que se hace circular una corriente de aire proveniente del ambiente por analizar. Si hay cloro presente en la muestra de aire, la alarma suena y permanece sonando hasta que se corrija la fuga.

- El Instituto de Cloro de Estados Unidos recomienda el uso de cámaras de expansión cada vez que se usen líneas largas de aducción del cloro entre los cilindros y los aparatos de cloración. Estas cámaras contienen un disco que se rompe a una presión de 100 a 400 lb/pulgada² y permite que el cloro se escape hacia una cámara de expansión donde hace sonar una alarma. Estas cámaras suelen instalarse algunas veces en combinación con válvulas de cierre automáticas que, tan pronto como se rompe el disco, cierran el flujo de cloro en las líneas de aducción.

También se pueden instalar discos rompibles a la salida de los cilindros de tonelada incluidos dentro de las bridas de una T de forma que, si la

presión del gas en ellos sube de un valor determinado, se rompan y dejen escapar el gas al exterior.

- Algunas marcas de cloradores especifican, además, alarmas internas dentro del aparato, acopladas a la válvula de alivio, que suenan cada vez que disminuye el vacío por debajo de un límite fijado o se incrementa por encima del nivel de operación. Lo primero puede ocurrir por una falla en el suministro de agua, por el taponamiento del inyector a causa del incremento de presión aguas abajo del inyector o por cualquier fuga en el sistema de vacío. Lo segundo puede pasar cuando existe una falla en el abastecimiento de cloro al clorador.

- **Máscaras**

A fin de que las fugas puedan ser reparadas sin peligro para los operadores, debe incluirse dentro del equipo de cloración máscaras protectoras. Desafortunadamente, este es un requisito que se descuida con demasiada frecuencia.

Básicamente, existen tres tipos de máscaras:

- La máscara tipo *canister*, que debe reemplazarse periódicamente y no sirve para altas concentraciones de cloro en el ambiente.
- La máscara con tanque de aire que permite trabajar hasta 35 minutos.
- La máscara de oxígeno que fabrica este elemento y tiene una duración de 45 minutos.

- **Equipo para taponamiento de fugas**

El Instituto de Cloro de Estados Unidos fabrica diferentes tipos de herramientas que vienen en cajas especiales y sirven para el taponamiento de fugas, tanto en cilindros de 150 lb como en los de una tonelada. Deben especificarse por lo menos dos equipos.

- **Botellas de amoniaco**

La botella de amoniaco es la forma más antigua y probablemente más común de detectar las fugas de cloro. Al destaparla y acercarla a los posibles escapes, se producen humos blancos que los ponen en evidencia. Por eso,

puede ser de mucha utilidad una cuidadosa inspección de las tuberías y demás elementos del cuarto de cloración con esta botella. Debe tenerse presente que cuando las fugas de cloro empiezan, pueden ser muy pequeñas, pero, a medida que continúa la formación de ácido clorhídrico en el punto de la fuga, va corroyendo el metal y ensanchando la abertura. De allí que sea tan necesario detectarlas en sus comienzos, antes de que puedan producir daños más graves.

Compuestos de cloro

Los compuestos clorados —ya sean líquidos o sólidos— son disueltos en agua y pueden ser dosificados y aplicados utilizando los siguientes equipos: bombas dosificadoras, hidroeyectores, así como sistemas de fabricación local.

- **Bombas dosificadoras**

Un buen número de fabricantes posee las bombas dosificadoras. Por tal motivo, se encuentran fácilmente en el mercado. El rango de trabajo de las bombas de línea normal de fabricación es muy amplio, y está comprendido entre un mínimo de un L/h y un máximo de 195 L/h de aplicación de la solución desinfectante, lo que corresponde a la desinfección de caudales de 3 hasta 540 L/s, con una solución de 1% de cloro activo y una dosificación de un mg/L.

Para bombear la solución de cal clorada, se recomienda no sobrepasar el 2% de concentración de cloro activo y, en el caso de la solución de hipoclorito de sodio, esta concentración será de 10% como máximo.

No es recomendable su uso, debido a su elevado costo, requerimientos de energía eléctrica o hidráulica y, sobre todo, a la dificultad de encontrar mano de obra y mantenimiento adecuados.

- **Hidroeyectores**

Este equipo (usado frecuentemente en el tratamiento de agua de piscinas) se ha constituido en una buena alternativa para la aplicación de soluciones desinfectantes en sistemas de abastecimiento de agua de pequeñas comunidades.

El rango de trabajo del hidroeyector de línea normal de fabricación está comprendido entre un mínimo de un L/h y un máximo de 25 L/h de aplicación de la solución desinfectante, lo que corresponde a la desinfección de caudales de 3 hasta 70 L/s, con una solución al 1% de cloro activo y una dosis de un mg/L.

Las concentraciones máximas de cloro activo en las soluciones de cal clorada y de hipoclorito de sodio son las mismas recomendadas anteriormente para el caso de las bombas dosificadoras.

Aunque son equipos de costo relativamente bajo, su aplicación es muy limitada debido a su difícil manejo, a que requieren alta presión hidráulica y a que el equipo puede ser afectado por depósitos e incrustaciones cuando existe elevada dureza en el agua.

- **Equipos de montaje local**

Usualmente son los más adecuados, debido a las siguientes características:

- bajo costo de construcción y mantenimiento;
- simplicidad en la concepción;
- tiempo de operación;
- no utilizan materiales atacables por el cloro;
- facilidad de adquisición del desinfectante;
- relativa exactitud en la dosificación, y
- facilidad de operación y mantenimiento.

A continuación se detallan los sistemas más usuales:

Utilización de botellones de vidrio tales como los que se muestran en las figuras 10-23 y 10-24.

También se pueden utilizar frascos de suero para este fin. Estas soluciones son de bajo costo y

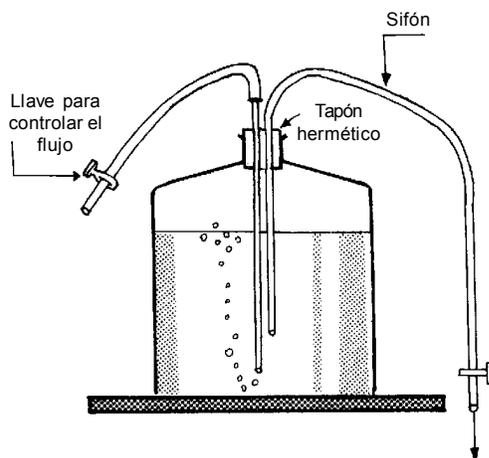


Figura 10-23. Hipoclorador de sifón

de fácil y rápida implementación, pero de poca exactitud y duración, por lo que normalmente se usan solo en situaciones de emergencia.

Otro tipo de hipoclorador muy difundido es el de orificio de carga constante, del cual se pueden encontrar infinidad de soluciones en diferentes materiales.

La figura 10-25 muestra una solución de este tipo, en la que el dispositivo de entrada está constituido por un tubo de vidrio fijado por debajo de un flotador, que propicia el paso de la solución de caudal constante, mientras el nivel desciende en el recipiente.

Al seleccionar la capacidad del recipiente, debe tenerse en cuenta una reserva de solución suficiente para un lapso adecuado de operación.

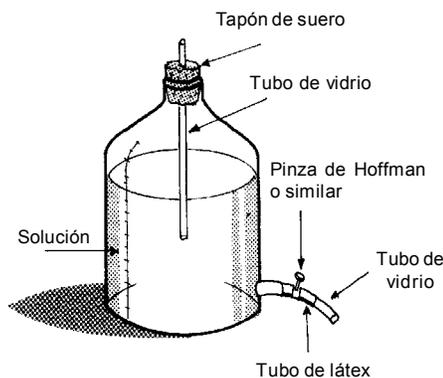


Figura 10-24. Frasco de Mariotte

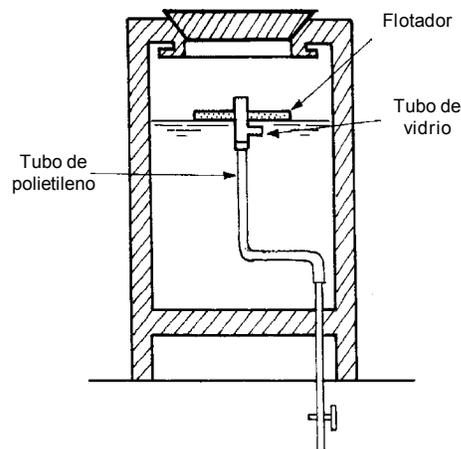


Figura 10-25. Hipoclorador de plataforma flotante

La figura 10-26 presenta una unidad del tipo de orificio con carga constante desarrollada en el IEOS, Ecuador. En este caso, el orificio está constituido por un tapón de aluminio con una incisión de sección variable, que va insertado en el extremo de una manguera flexible.

Se regula la dosis al variar la sección del orificio al extraer o introducir el tapón en la manguera y colocar marcas en este para calibrarlo. Entre las unidades de orificio, es aquella que en la práctica produce menos problemas de obstrucción.

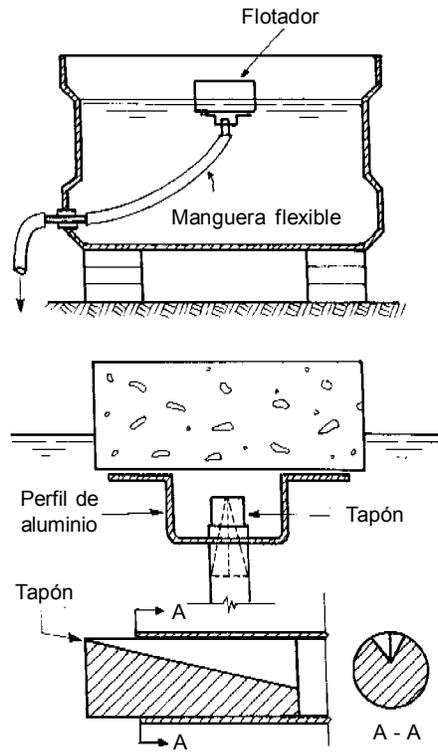


Figura 10-26. Hipoclorador de orificio calibrado

La figura 10-27 muestra otra unidad similar, de fácil construcción, constituida por niples y accesorios de PVC de 3/4". Se ha colocado dentro del tanque de solución una pantalla de asbesto-cemento para retener el sedimento y un grifo para retirarlo periódicamente.

Esta unidad fue desarrollada en Colombia dentro de un Programa de Investigación sobre Sistemas de Desinfección por Me-

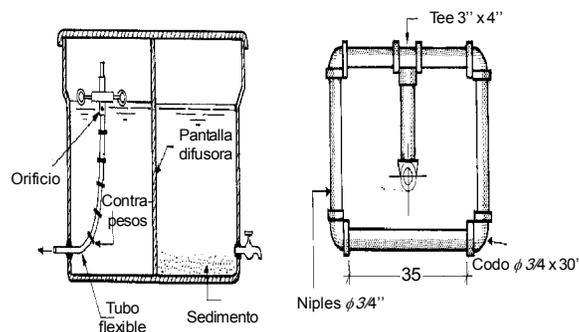


Figura 10-27. Clorador por gravedad

dios Hidráulicos para Pequeñas Localidades, promovido por el CEPIS/OPS en varios países latinoamericanos.

El dispositivo de la figura 10-28 fue desarrollado y evaluado en el Brasil. El funcionamiento de esta unidad es muy simple y la regulación se efectúa con carga de agua constante. Para aumentar o disminuir la dosis, basta deslizar la manguera en el soporte, bajando la punta; con el procedimiento inverso, se reduce el volumen. La entrada de la solución se efectúa por el extremo de la manguera que va sujeto a la boya. En todo momento se obtiene una carga de agua constante que produce una dosis constante, independientemente del volumen de agua en el tanque.

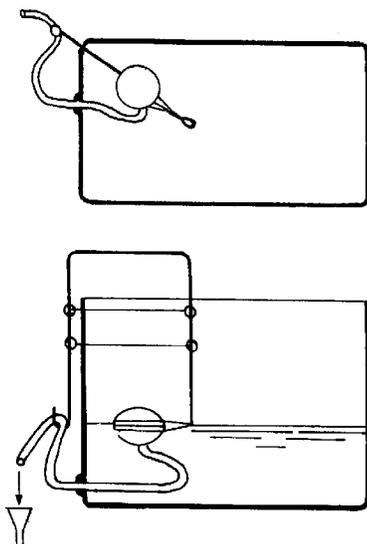


Figura 10-28. Hipoclorador de sifón

Lo que establece la dosis es la posición de la punta de la manguera. El apoyo del sifón debe situarse al mismo nivel del fondo de la boya, nunca más bajo que el punto de entrada. Se ha solucionado el problema de las obstrucciones mediante el uso de hipoclorito de sodio. Cuando se utiliza cal clorada o hipoclorito de calcio, se recomienda preparar y decantar la solución previamente.

La unidad de la figura 10-29 fue desarrollada y evaluada en Costa Rica, dentro del Programa de Investigación promovido por el CEPIS/OPS. Este dispositivo funciona hidráulicamente y produce primeramente la erosión de las pastillas con una porción del caudal total y la posterior difusión de la solución obtenida con el resto del caudal en una cámara de contacto. El caudal de agua necesario para erosionar las pastillas se regula con la válvula 1 (figura 10-29 [a]), para obtener la concentración de cloro requerida.

La válvula de boya tiene como función aumentar o disminuir el caudal de dilución, dependiendo de la demanda doméstica determinada por el nivel del tanque.

En el interior de la unidad hay una cámara de aquietamiento para eliminar la turbulencia que lleva el agua y a continuación se encuentra la cámara de erosión, donde se forma la solución concentrada que sale a través de un vertedero final.

Las pastillas se colocan en el cilindro portapastillas y es posible graduar la concentración de la solución si se gradúa la sumergencia de las pastillas, a través del número de vueltas que se dé al cilindro, por el número de tubos con pastillas que se coloquen y, por último, por el caudal regulado con la válvula 1.

Las pastillas requieren una compactación especial para que no se ablanden fácilmente (1.000 kg/cm^2), de tal modo que tengan 12 g de peso, con 25 mm de diámetro y 10 mm de alto.

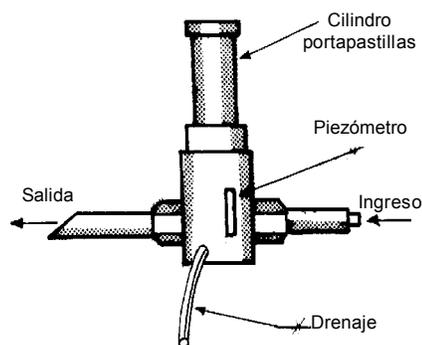


Figura 10-30. Detalles del hipoclorador de erosión-difusión

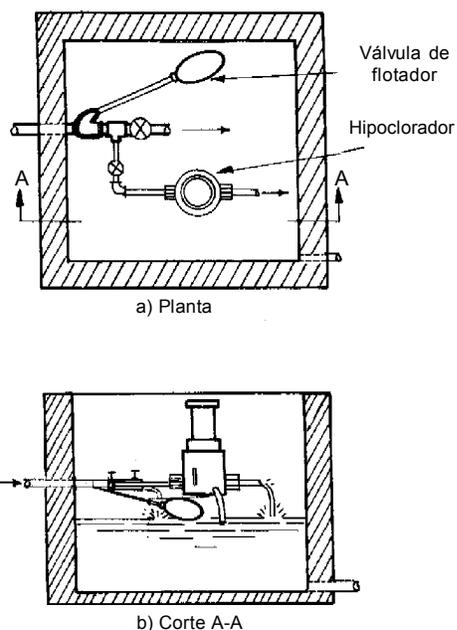


Figura 10-29. Hipoclorador de erosión-difusión

Esta unidad, operada adecuadamente, puede asegurar una buena precisión en la dosificación, por lo que se aconseja su uso en localidades donde se pueda contar con personal adiestrado.

5.8.3 Cámara de contacto (1)

La cámara de contacto tiene por finalidad promover el tiempo de contacto necesario para permitir la acción bactericida del cloro con un máximo de eficiencia.

Del mismo modo que para un floculador, las cámaras de contacto deben ser objeto de un diseño hidráulico cuidadoso.

a) Vista en planta

El difusor de cloro se ubica al inicio de la cámara, seguido de un resalto hidráulico para promover una mezcla interna entre el cloro y el agua (figura 10-31).

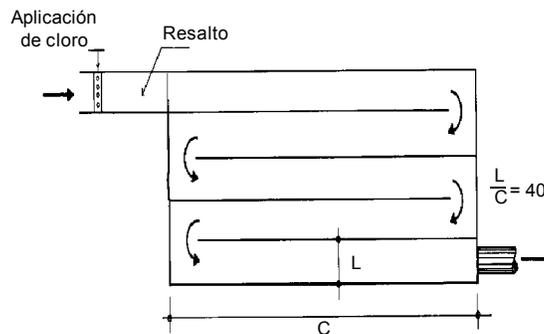


Figura 10-31. Cámara de contacto de cloro (vista en planta)

b) Detalle de ubicación del difusor en relación con el resalto hidráulico

Normalmente, los difusores se diseñan para un tiempo de contacto de 20 a 30 minutos. En la mayoría de casos, esto es suficiente; sin embargo, para aguas muy contaminadas y con elevado tenor de materia orgánica, el tiempo de contacto exigido puede ser mayor, dependiendo de la cantidad de cloro que se aplique, del pH del agua y de los compuestos resultantes (cloro libre o cloraminas).

El volumen de la cámara de contacto también puede variar si antes de los centros de consumo existen líneas muy largas de aducción o reservorios de distribución, que permitan un tiempo de contacto suficiente. En el diseño de la cámara de contacto se debe procurar obtener el máximo rendimiento hidráulico, de modo que el tiempo real de residencia se aproxime al tiempo nominal Q/V , con un mínimo de espacios muertos y con un flujo de características próximas al ideal-flujo de pistón.

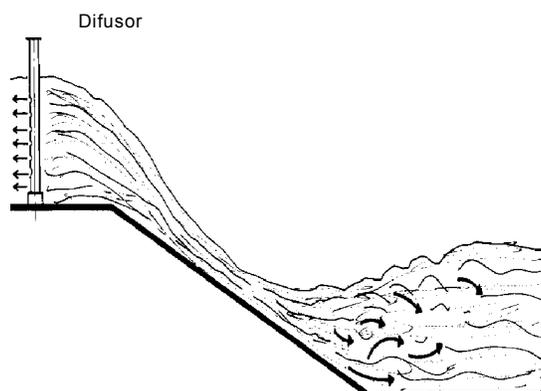


Figura 10-32. Ubicación del difusor en la cámara

La forma del tanque de contacto y la buena ubicación de las pantallas son esenciales para un buen rendimiento hidráulico. Las entradas y salidas bien situadas también son importantes para reducir las zonas muertas y los cortocircuitos.

Una cámara de contacto diseñada de modo semejante a un floculador hidráulico de pantallas puede tener una buena eficiencia, siempre que se tome la relación longitud/ancho de cada canal lo más alta posible.

Se ha encontrado que una relación de 40:1 es la necesaria para que se alcance el máximo rendimiento hidráulico, con un flujo de características próximas al ideal.

La semejanza de una cámara de contacto ideal con un floculador de pantallas reside apenas en la aproximación al flujo de pistón deseable. Por lo tanto, las cámaras de contacto no deben diseñarse como cámaras de mezcla. El cloro, como ya se enfatizó previamente, debe mezclarse totalmente con el agua en la entrada de la cámara de contacto y, como su acción bactericida es más eficiente a un pH bajo, la aplicación de un alcalinizante para la corrección del pH debe hacerse a la salida de la cámara de contacto.

- **Difusores**

Investigaciones recientes han demostrado que una segregación del cloro con las bacterias por un tiempo más o menos prolongado, conduce a resultados menos eficientes. La causa de este fenómeno aún no es bien conocida.

Se supone que los residuales que se forman inicialmente al reaccionar el cloro con el agua, son aparente-

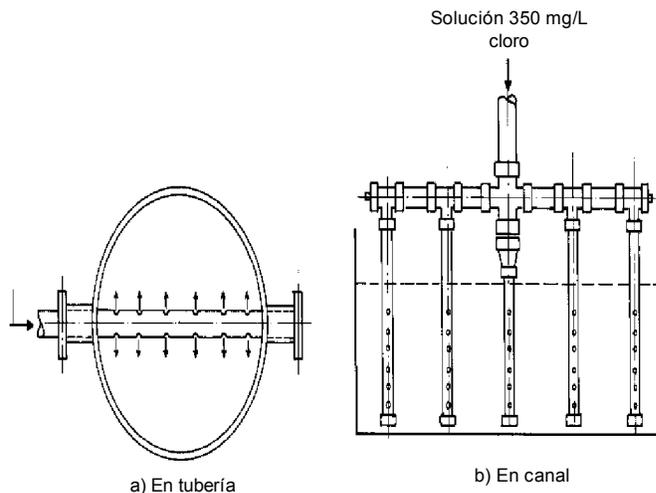


Figura 10-33. Difusores de cloro (1)

mente más activos que los compuestos formados después. Una rápida y perfecta dispersión del cloro permite el contacto de estos residuales más activos con las bacterias presentes en el agua, lo que aumenta la eficiencia de la cloración.

Se puede conseguir una buena dispersión si se colocan difusores en una tubería bajo presión o en canales abiertos. La figura 10-34(a) muestra una instalación típica de un difusor como dispositivo de mezcla en una tubería. Para los canales, se puede adoptar una solución como la indicada en la figura 10-34(b). Son dispositivos semejantes a los difusores utilizados para la aplicación de coagulantes y deben instalarse de preferencia inmediatamente antes de un resalto hidráulico.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) Richter, C. *Desinfección*. Manual DTIAPA C-5. Evaluación de Plantas de Tratamiento de Agua, tomo I. Lima, CEPIS, 1984.

BIBLIOGRAFÍA ADICIONAL

Arboleda V., Jorge. *Manual de desinfección del agua*. Bogotá, ACODAL, 1976.

Arboleda V., Jorge. *Seminario Latinoamericano sobre nuevos conceptos sobre diseños de plantas de tratamiento. Tomo 4. Teoría de la desinfección del agua*. Bogotá, Pontificia Universidad Javeriana- ACODAL-OPS, 1990.

AWWA-Chemical Manufacturers Association-EPA. *Chlorine dioxide; drinking water issues*. Denver, 1993.

Azevedo Netto, J. M. *Desinfecção de águas*. São Paulo, CETESB, 1978

Caceres, Óscar. *Desinfección del agua*. Lima, Ministerio de Salud del Perú- OPS/OMS, 1990

Castro, R. y Reiff, F. *Water quality in Latin America: Balancing the microbial and chemical risk in drinking water disinfection*. Buenos Aires, ILSI-Argentina, OPS/OMS, 1996.

Degremont. *Manual técnico del agua*. Cuarta edición. Bilbao, Grijelmo, 1979.

Geldreich, E. *Microbial quality issues for drinking water*. Security of Public Water Supply.

Pacheco, V. y Rodríguez, V. *Manual III. Filtración rápida y lenta*. Tomo IV: Desinfección. Lima, CEPIS/OPS, 1992.

Schippers, J. C. *Water quality and treatment*. Holanda, THDelft, 1985.