

CAPÍTULO 6
SALA DE CLORACIÓN

1. INTRODUCCIÓN

Las estaciones de cloración merecen mucha atención desde la etapa de diseño, por la importancia que este proceso tiene en la producción de agua segura y por los riesgos que involucran la operación y mantenimiento de las estaciones.

En el proceso de diseño de las estaciones de cloración, podemos considerar cuatro etapas:

- almacenamiento del cloro;
- sistemas de medición y control;
- sistemas de inyección;
- sistemas de seguridad.

2. CRITERIOS GENERALES DE DISEÑO

- El cloro es proporcionado en cilindros metálicos resistentes, de 50 a 1.000 kilogramos, en contenedores. Puede ser utilizado en forma líquida o gaseosa. Los cilindros tienen las siguientes características:
 - a) Son de acero.
 - b) La máxima densidad de llenado es 125%. Se define así a la razón de porcentaje entre el peso del gas en el cilindro o contenedor y el peso del agua que puede contener a una temperatura de 15,6 °C (70 °F).
 - c) Se equipan con sistemas de seguridad (válvulas, protectores).
 - d) Se someten a pruebas de presión a intervalos regulares, de acuerdo con las normas correspondientes.
- De acuerdo con la capacidad de los cilindros, se puede extraer mayor o menor cantidad de cloro de cada uno de ellos. Véase el cuadro 6-1.

Cuadro 6-1. Características de los cilindros de cloro (1)

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

- El consumo de cloro necesario para la desinfección del agua se estima en 5 mg/L, con un mínimo de 1,0 mg/L. Para la oxidación y preparación de compuestos, se estima de acuerdo con las necesidades de tratamiento.
- Instalaciones con un consumo superior a 50 kg/d deben prever el uso de cilindros de una tonelada y para el traslado de los cilindros deben considerarse dispositivos que permitan hacer esta tarea bajo condiciones de seguridad.
- Debe preverse un almacenamiento de cloro suficiente para atender por lo menos 10 días de consumo máximo. En instalaciones con capacidad inferior a 10.000 m³/d o 100 l/s debe preverse un almacenamiento para periodos mínimos de 30 días.
- El número de envases de cloro en uso dependerá básicamente del máximo flujo que se pueda obtener de cada cilindro. El cuadro 6-2 indica la cantidad mínima de cilindros que debe haber en servicio, vacíos y de reserva, a fin de mantener un suministro continuo de cloro en la planta.



Figura 6-1. Contenedores de cloro expuestos al Sol (2)

Cuadro 6-2. Número de cilindros necesarios según la capacidad requerida (1)

Cilindro de 75 kg				Cilindros de 1.000 kg			
Capacidad requerida kg/día	En servicio	Vacíos	Reserva mínima	Capacidad requerida kg/día	En servicio	Vacíos	Reserva mínima
0–18	1	2	3	54–180	1	1	2
18–36	2	4	6	180–360	2	2	4
36–54	3	6	9	360–540	3	3	6
54–72	4	8	12	540–720	4	4	8
72–90	5	10	15	720–900	5	5	10
90–100	6	12	18	900–1.000	6	6	12
				>1.000	Usar evaporador		

- En instalaciones situadas en localidades distantes de los centros productores de cloro, el almacenamiento debe tener en cuenta las dificultades para la compra y transporte del producto.
- En instalaciones con consumo de hasta 50 kg/día, los cilindros y los equipos de cloración pueden instalarse en la misma área.
- En instalaciones de consumo mayor, deben instalarse en áreas separadas.
- El área de almacenamiento de cloro debe ser abierta (figura 6-2). Si se proyectara cerrada, con paredes en todo el contorno (figura 6-3), la habitación debe ser ventilada mediante:
 - a) Ventilación natural por medio de aberturas que deben llegar hasta el piso.

**Figura 6-2.** Almacén de cloro abierto para cilindros de una tonelada (2)

- b) Además de ventilación natural, debe haber ventilación forzada, producida por un extractor o insuflador, dispuesto de modo de obligar al aire a atravesar a nivel del piso todo el ambiente y con capacidad para renovar todo el aire del recinto en un tiempo máximo de 4 minutos.



Figura 6-3. Almacén de cloro cerrado con ventilación artificial (2)

- c) Las llaves o interruptores de los equipos deben quedar del lado de afuera del recinto.

- d) Las salidas de ventilación deben ubicarse de tal modo que disipen las eventuales fugas de cloro a la parte externa de la casa de química (si la sala de cloración ha sido incorporada a esta estructura). Esta ventilación no debe incidir sobre la ventilación de otras áreas ni sobre áreas externas confinadas, aunque solo sea parcialmente.



Figura 6-4. Forma de almacenar cilindros de una tonelada (2)

- e) Los cilindros deben estar protegidos de la incidencia de la luz solar.
- El área de localización de los equipos cloradores debe contar con los medios de seguridad previstos para la sala de almacenamiento de cloro.



Figura 6-5. Almacén de cilindros pequeños (2)

posición horizontal, en una sola hilera, fijados por medios adecuados, con un espaciamiento mínimo de 0,20 metros entre los cilindros y un ancho mínimo de un metro entre los corredores de circulación.

- Los cilindros con capacidad igual o inferior a 75 kilogramos de cloro deben ser almacenados o utilizados en posición vertical, directamente sobre una balanza. Deben contar con una cadena o barra de seguridad que evite el volteo en caso de una explosión o sismo (figura 6-5).



Figura 6-6. El almacén de cloro utilizado como depósito (2)

- El control de la cantidad de cloro disponible debe ser hecho por pesaje continuo o por un dispositivo que indique la presión de los cilindros en uso.
- Las áreas utilizadas para depósito o dosificación de cloro deben contar solamente con productos químicos y equipos relacionados con la cloración. No deben utilizarse para almacenar otro tipo de materiales (figuras 6-6 y 6-7).

- El área de almacenamiento de cloro y la de instalación de los cloradores deben tener puertas que se abran hacia afuera, con vidrio en la parte superior, y estar dotadas de aberturas de ventilación sobre el pórtico.
- Los cilindros de cloro de una tonelada deben ser almacenados o utilizados en

- El uso de hipoclorito de calcio o sodio, por ser 10 veces más caro que el cloro líquido envasado a presión en cilindros, debe quedar restringido a instalaciones de capacidad inferior a 10 L/s, o solo cuando se demuestre que es la mejor alternativa.



Figura 6-7. El almacén de cloro utilizado como depósito (2)

- El almacenamiento de hipoclorito de sodio debe hacerse en un lugar techado, ventilado, seco y libre de materiales combustibles. Este producto es muy inestable; el periodo de almacenamiento no debe ser mayor de un mes.
- El hipoclorito de sodio debe utilizarse directamente del recipiente en que es transportado.
- El hipoclorito de calcio se expende en forma granular en tambores de 45 a 50 kilogramos. Debe ser disuelto previamente en agua para ser dosificado por vía húmeda, tomando en cuenta lo siguiente:
 - La concentración máxima de la solución debe ser inferior a 10 %.
 - Deben existir dos tanques de disolución, con capacidad mínima individual para 12 horas de operación.

3. ALMACENAMIENTO

3.1 Criterios para el dimensionamiento

Es necesario conocer el consumo del producto de acuerdo con la capacidad de la planta. La información necesaria es la siguiente:

- caudal del proyecto (Q en L/s);
- dosificación esperada (dosis mínima y máxima en mg/L);

- c) tiempo de almacenamiento seleccionado. Ver en el cuadro 3 criterios basados en la experiencia.

Cuadro 6-3. Criterios para el almacenamiento de productos desinfectantes (3)

Producto	Tiempo de almacenamiento (meses)	Dosis en mg/L		Concentración de la solución (mg/L)
		Mínima	Máxima	
Cloro en cilindros a presión	3 – 6	1	3	3.500
Hipoclorito de calcio	3 – 6	1,4	4,3	10.000 – 50.000
Hipoclorito de sodio	< 1 mes	1,7	23,1	10.000 – 50.000

Notas:

- Las dosis mínima y máxima se basan en un porcentaje de cloro disponible de 70% para el hipoclorito de calcio y de 13% para el hipoclorito de sodio.
- Las dosis indicadas corresponden a la práctica usual; para la determinación precisa de la dosificación, se requiere efectuar el ensayo de demanda de cloro o curva al punto de quiebre (figura 6-8).

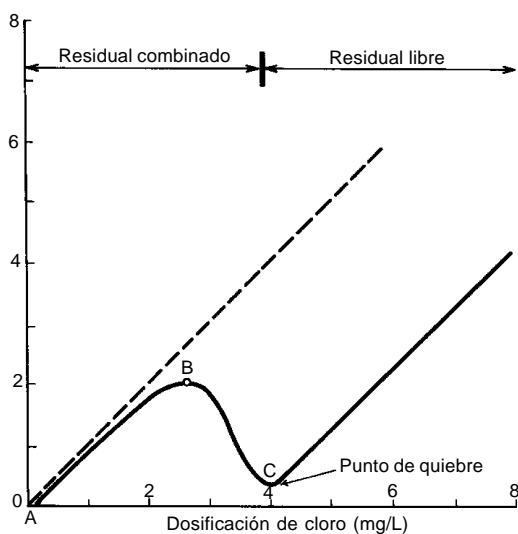


Figura 6-8. Curva al punto de quiebre (4)

- Para mayores detalles sobre dosificación, se puede consultar la sección “Dosificación” en el capítulo 1 de este mismo manual.

La ecuación de balance de masas permite diseñar, evaluar y operar estos sistemas:

$$Q \cdot D = q \cdot C = P \quad (1)$$

Donde:

Q = caudal máximo de diseño en L/s.
 D = dosis promedio de desinfectante =

$$(D_M + D_m)/2 \text{ (mg/L)} \quad (2)$$

D_M = dosis máxima (mg/L)

D_m = dosis mínima (mg/L)

q = caudal de solución de cloro (L/s)

P = peso requerido del desinfectante (mg/s o kg/d)

C = concentración de la solución (mg/L)

Nota: 1 mg/s = 0,0864 kg/d



Figura 6-9. Sistema de grúa para cilindros grandes (2)

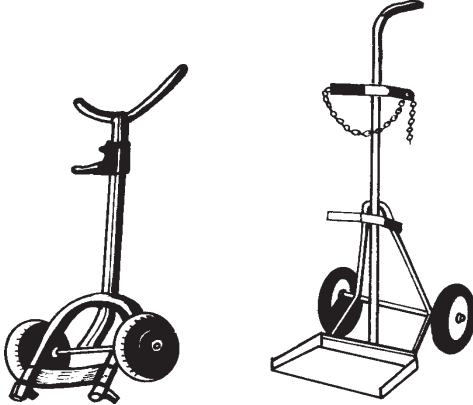


Figura 6-10. Carretillas para transportar cilindros pequeños (3)

Dependiendo de la capacidad de producción de la planta, el almacén deberá incluir un equipo de grúa para movilizar el cilindro en el caso del cloro líquido embotellado a presión, en cilindros de una tonelada. Cuando se trata de sistemas pequeños que usan cilindros de 75 kilogramos, se considerará el empleo de carretillas para efectuar el transporte en forma manual (figura 6-10). En el cuadro 6-4 presentamos un ejemplo para el cálculo de un almacén de cilindros de cloro.

Cuadro 6-4. Cálculo del área del almacén de cloro (3)

N.º	Datos	Unidad	Criterios	Cálculos	Resultados	Unidad
1	Dosis máxima $D_M = 3,0$	mg/L	$D = (D_M + D_m)/2$	$D = (1 + 3)/2$ $D = 2$	Dosis promedio	mg/L ó g/m ³
	Dosis mínima $D_m = 1$	mg/L				
2	Tiempo de almacenamiento $T = 90$	d	$W = Q \cdot T \cdot D$	$W = (8.690 \times 2 \times 90)/1.000$ $W = 1.555$	Peso de cloro requerido en el periodo de almacenamiento seleccionado	kg
	Caudal de diseño $Q = 100$ $Q = 8.640$	L/s m ³ /d				
3	Peso de un cilindro de cloro $P = 67,0$	kg	$N = W/P$	$N = 1.555/67,0$ $N = 23$	Número de cilindros que se almacenarán	unidad
4	Área que ocupa un cilindro chico $A_c = 0,071$	m ²	$At = 1,25$ $Ac \cdot N$	$At = 1,25 \times 0,071 \times 23$ $At = 2$	Área ocupada por los cilindros	m ²

3.2 Recomendaciones para el proyecto

- La figura 6-11 indica las dimensiones de los cilindros de una tonelada: entre 2,16 y 2,21 metros de largo y entre 0,75 y 0,81 metros de diámetro.

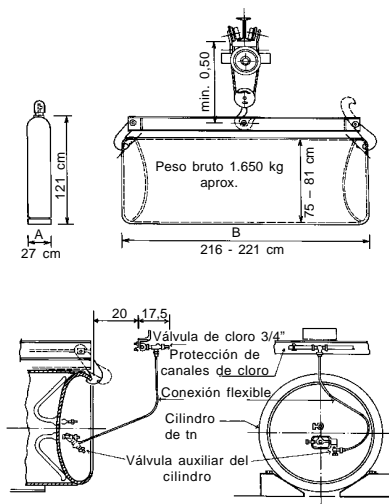


Figura 6-11. Cilindros de cloro de una tonelada de peso (4)

- La figura 6-12 presenta ideas sobre cómo distribuir el almacén, de acuerdo con las recomendaciones de algunos fabricantes.
- Cualquiera que sea el recipiente de cloro que se use, si se requieren varias unidades, hay que conectarlas a una tubería matriz, como indica la figura 6-13.

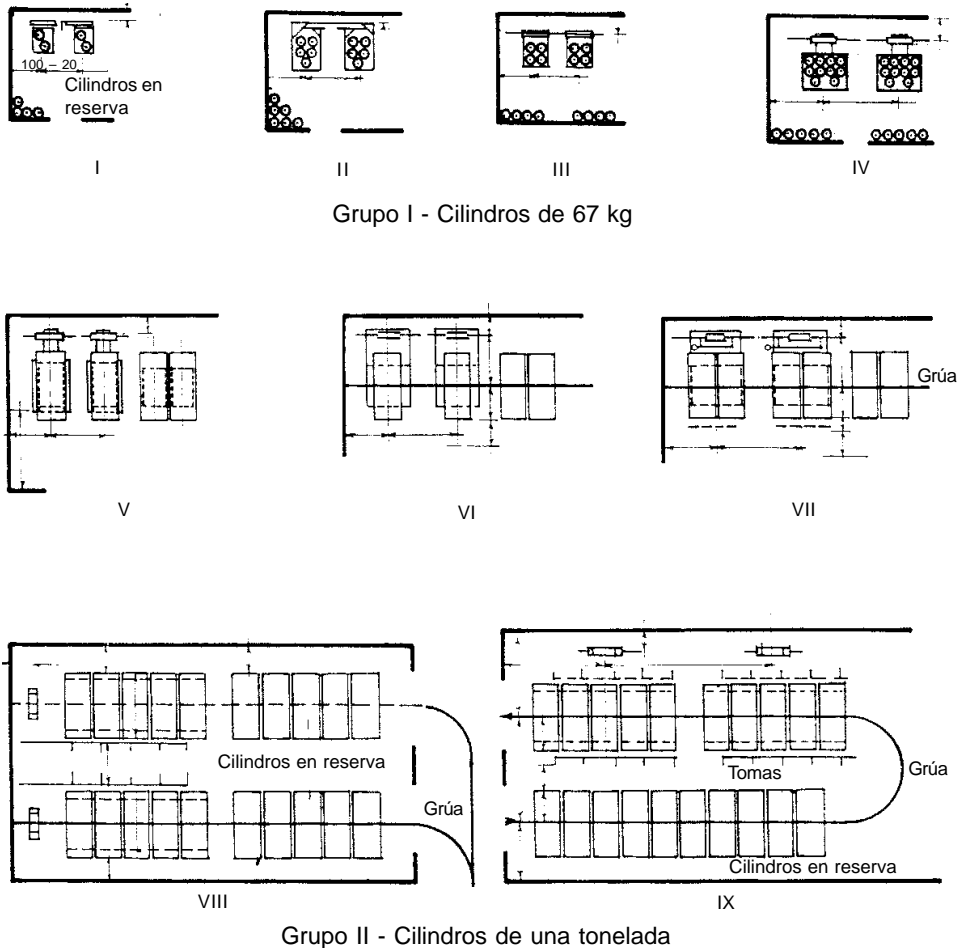


Figura 6-12. Almacenamiento de cilindros de cloro (3)

El diseño de esta matriz es muy importante para lograr un flujo sin obstrucciones. Los cilindros de cloro llenos tienen 85 % de cloro líquido y 15 % en estado gaseoso. Al extraer este último, disminuye la temperatura del envase y aparece

escarcha en la superficie del cilindro por condensación de la humedad, lo que indica que el gas se está evaporando rápidamente.

Para que el flujo no se interrumpa, la temperatura en los cilindros debe ser más alta o igual a la temperatura en las tuberías aductoras, pues si estas se enfrían más rápidamente que el cilindro, aunque sea muy pequeña la diferencia térmica, el gas se puede relicuar en las líneas de conducción y producir obstrucciones en los cloradores.

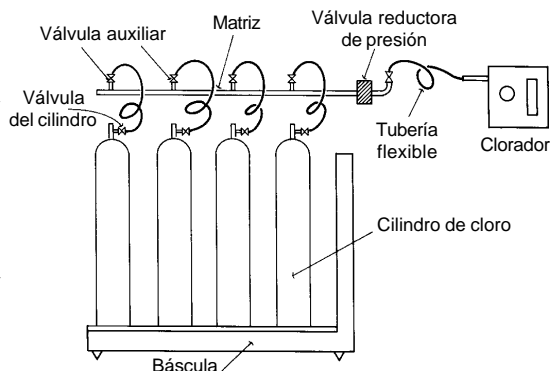


Figura 6-13. Sistema de conexión de cilindros de cloro (1)

4. EQUIPOS DE MEDICIÓN Y CONTROL

Los equipos de cloración se fabrican en un rango de 1,5 a 4.500 kg/día de cloro gaseoso y dosificadores de cloro líquido desde 20 hasta 2.000 L/día. Es necesario determinar la capacidad del equipo que se necesita. Para calcular la capacidad (C) del clorador, utilizaremos nuevamente la ecuación de balance de masas, teniendo en cuenta que el equipo se calcula con el caudal y la dosis máxima.

$$C = QD \times 86,4$$

$$Q = \text{m}^3/\text{s}$$

$$D = \text{mg/L}$$

El caudal máximo es el del final del periodo de diseño. Cuando el diseño de la planta se hace por módulos, la estación de cloración debe centralizarse y satisfacer la producción de todos ellos. En este caso, el clorador debe satisfacer también la capacidad mínima requerida por un solo módulo.

Las características de los equipos dependen de la forma de cloro que vamos a utilizar, hipocloritos en solución o cloro líquido envasado en cilindros a presión.

4.1 Equipos para aplicar hipoclorito en solución

Puede utilizarse cualquier tipo de dosificador para productos químicos en solución que sea resistente a la acción corrosiva del hipoclorito. Los más comunes son las bombas dosificadoras y los sistemas de orificio de carga constante. Para la medición, se utilizan rotámetros o las escalas del equipo dosificador.

Las bombas dosificadoras empleadas son de tipo diafragma o pistón-diafragma, ambas de desplazamiento positivo. En todos estos equipos debe poder calibrarse la dosificación.

Los hay con diferente rango de ajuste; los más usados tienen un rango de 10:1.

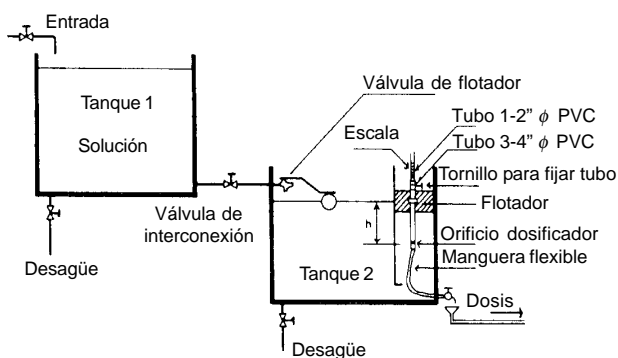


Figura 6-14. Sistema de aplicación por gravedad (3)

Si la aplicación requiere una operación automática —dosificación proporcional al caudal, a la demanda de cloro o a ambos—, existen en el mercado equipos que pueden cubrir este tipo de funciones, como veremos más adelante. El rango de trabajo de estos equipos puede variar entre 20 L/día y 800 L/día. Ellos son capaces de inyectar la solución desde vacío hasta 28 kg/cm².

4.2 Hipoclorador de orificio de carga constante

El hipoclorito en solución se utiliza principalmente en instalaciones para localidades pequeñas, donde, por lo general, no hay condiciones apropiadas para operar y mantener un equipo automático. Sin embargo, en la industria o en el caso de una urbanización o un hotel de lujo, podría justificarse la inversión.

Los sistemas de orificio de carga constante, por su bajo costo y porque funcionan por gravedad, son muy empleados en localidades pequeñas.

Se pueden fabricar artesanalmente, no requieren energía eléctrica y con muy poco mantenimiento se puede obtener una operación constante. También se

consideran en los sistemas grandes, como alternativa para eventuales situaciones de emergencia (figuras 6-15 y 6-16).

4.3 Equipos para aplicar cloro gaseoso



Figura 6-15. Hipoclorador (2)

Estos tipos de cloradores son los más utilizados en las plantas de tratamiento, porque son más eficientes que los hipocloradores. Por su forma de operar, podemos distinguir dos tipos de unidades: cloradores de gas directo y cloradores al vacío en solución.

4.3.1 Cloradores de aplicación directa

Este tipo de clorador opera con la presión del cilindro, por lo que adolece de serias limitaciones. Su uso se recomienda solo cuando no hay otra alternativa. Normalmente se emplean en zonas donde no hay suministro continuo de energía eléctrica.



Figura 6-17. Clorador de aplicación directa a una tubería (2)

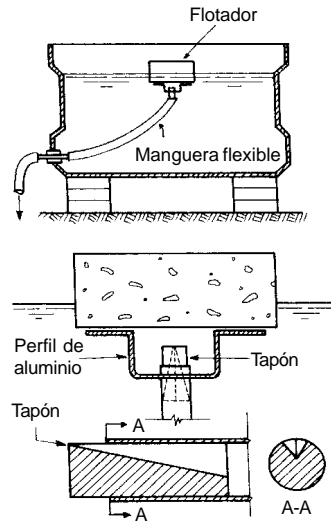


Figura 6-16. Hipoclorador de orificio de carga constante (4)

La principal desventaja de estos equipos es que la dosis varía con la presión del cilindro.

Se fabrican en capacidades que van desde 9 hasta 150 kg/día. Véanse las figuras 6-17 y 6-18.



Figura 6-18. Punto de aplicación en la tubería (2)

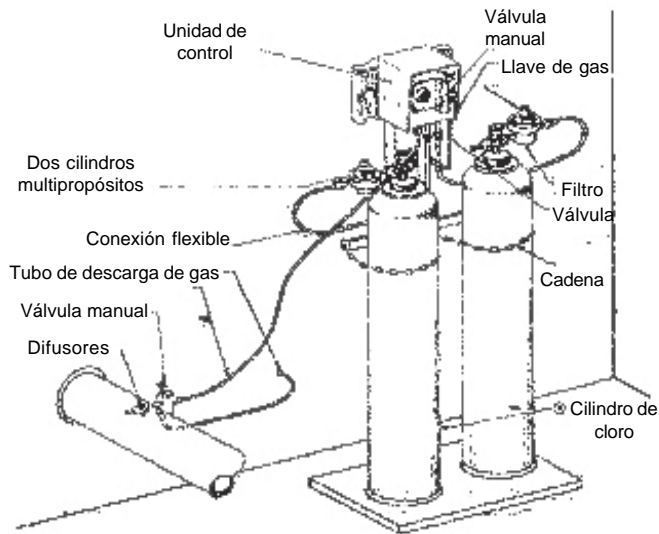


Figura 6-19. Clorador de aplicación directa (5)

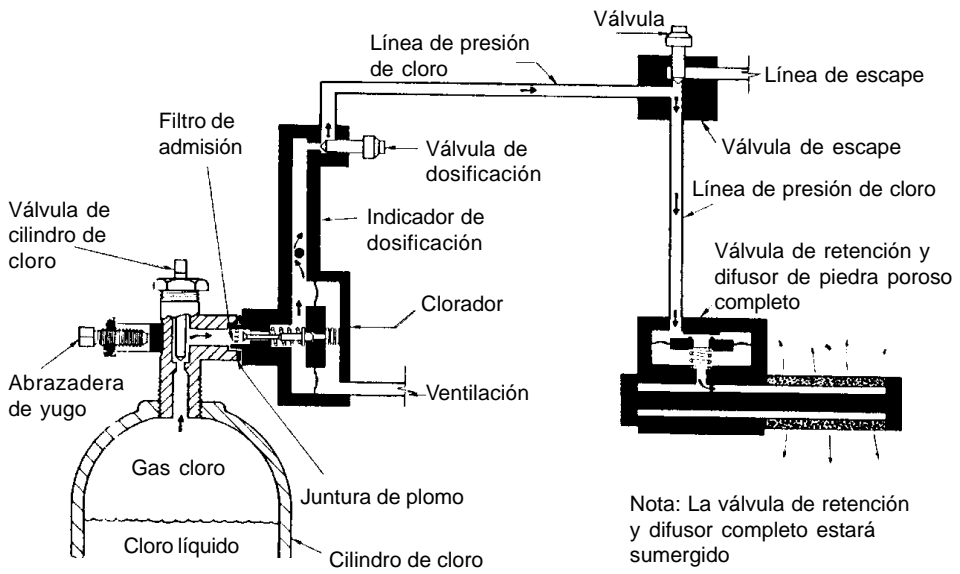
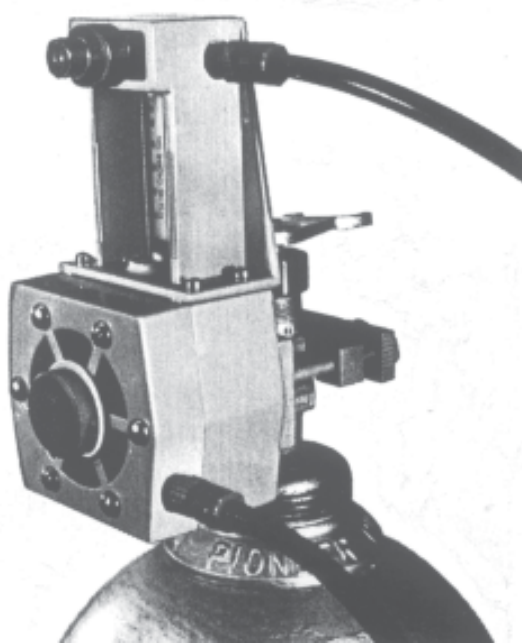


Figura 6-20. Diagrama de flujo de un clorador de aplicación directa

4.3.2 Cloradores de aplicación al vacío

Este tipo de equipo es el más confiable y seguro de operar.

a) Descripción

Un clorador de aplicación al vacío está integrado por tres componentes fundamentales: un inyector, una válvula de ajuste de la dosificación y un medidor de caudal.

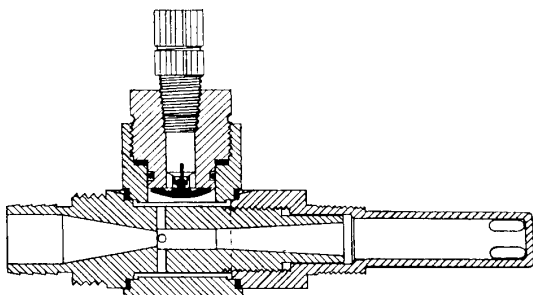


Figura 6-21. Sistema de inyección (3)

El inyector. El inyector es un Venturi mediante el cual se ejerce una succión determinada (130 milímetros de agua), por medio del cual se succiona el cloro a través del equipo. Este inyector también sirve como cámara de mezcla entre el cloro y el agua que sirvió para ejercer el vacío (figura 6-21).

Las condiciones hidráulicas de la bomba de agua son muy importantes, pues tanto la presión como el caudal son determinantes en el funcionamiento del inyector. Por ello es muy importante consultar las recomendaciones del fabricante, porque cada uno tiene condiciones específicas, a partir de las cuales se han diseñado los equipos. Es preferible que dejemos el cálculo de las condiciones de operación de la bomba al fabricante.

Válvula de control. Las válvulas de control merecen muy especial atención, pues con facilidad se taponan con las impurezas del cloro. Para garantizar mayor confiabilidad en la operación, se recomienda especificar orificios o vástagos ranurados en lugar de las válvulas de aguja convencionales.

Medidor de caudal. El medidor de caudal es un rotámetro, un tubo de vidrio que indicará el paso del gas a través del equipo. La medición de un gas se ve afectada por las condiciones de temperatura y presión. Cuando la presión está por debajo de la atmosférica, como en este caso, el efecto es mayor. Por esta



Figura 6-22. Cloración al vacío, equipos de pared (2)

razón, el equipo cuenta con válvulas reguladoras de presión y de vacío a la entrada y a la salida del dispositivo de medición.

Operar el proceso a presiones por debajo de la atmosférica presenta una serie de ventajas que permiten que el cloro, un gas extremadamente corrosivo y venenoso, pueda ser manipulado casi por cualquier persona. Al someterlo al vacío dentro del equipo, se aprovecha este para, mediante diafragmas

venteados, cerrar automáticamente todo puerto o ducto factible de ruptura al dejar de ejercer la presión debajo de la atmosférica. La presión del cloro dentro del cilindro no se requiere para la operación, porque estamos succionando el gas con el inyector y estas condiciones siempre van a prevalecer a lo largo del circuito dentro del equipo.

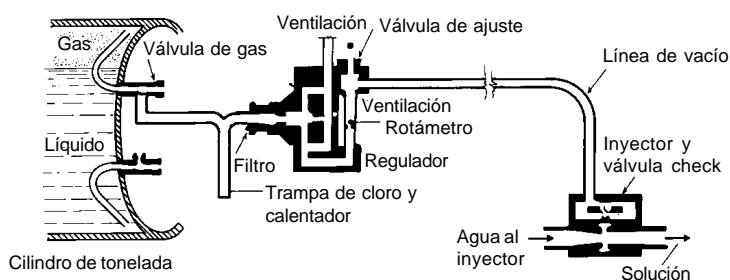


Figura 6-23. Clorador con inyector para cilindro de una tonelada (3)

También debemos tener presente que el cloro viene de un cilindro bajo presión donde se encuentra licuado y que no podemos extraerlo en forma indiscriminada cuando el gas está en forma líquida dentro del recipiente, porque la presión de vapor del gas a las condiciones ambientales de temperatura producirá una velocidad de evaporación tal que podemos llegar a congelar el cilindro y su contenido. El cuadro 6-1 indica el máximo flujo de cloro que se puede extraer de un cilindro, dependiendo de su tamaño.

Los sistemas con inyector son los más usados debido a que presentan las siguientes ventajas:

- Ofrecen alta precisión en la dosificación.
- No son influenciados por los cambios de temperatura.
- Son equipos durables y de costo inferior a los de alimentación o aplicación directa.



Figura 6-24. Cloradores de consola (2)

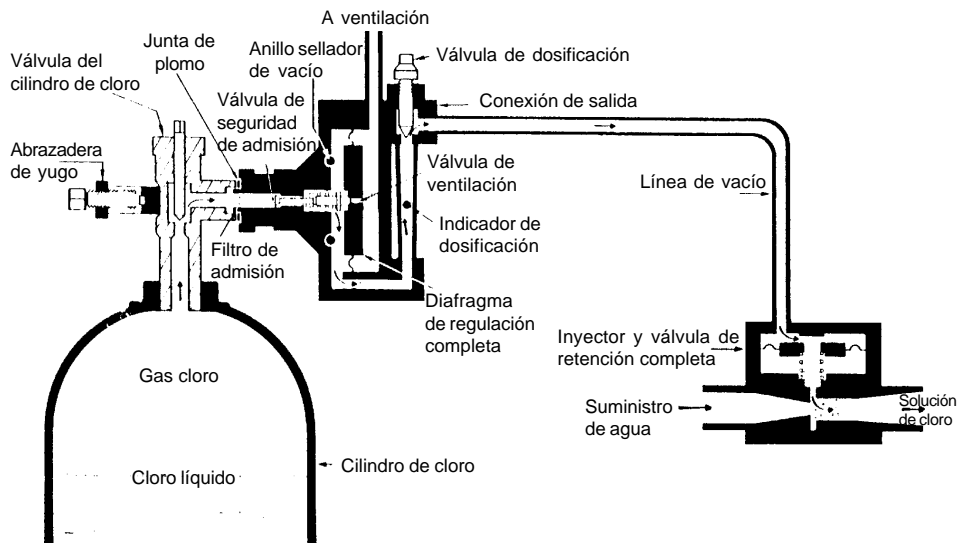
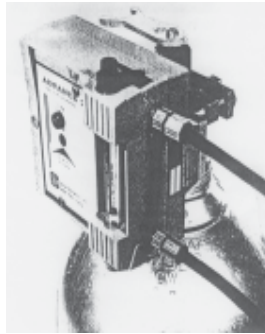


Figura 6-25. Diagrama de flujo de un clorador de aplicación al vacío (3)

Sin embargo, debe tenerse en cuenta que para la operación de los inyectores, se requiere el suministro de agua a presión y, por lo tanto, se debe incluir un equipo de bombeo en el sistema.

Componentes de un sistema de cloración con inyector. Un sistema con inyector incluye básicamente los siguientes componentes:

- Balanza.
- Clorador (de pared o montaje directo), con manguera de ventilación.
- Cadena de protección.
- Tubería de abastecimiento con válvula de paso, manómetro, filtro “Y”, adaptador para montaje del inyector y el difusor a fin de aplicar la solución de cloro al agua.
- Mascarilla de protección tipo *canister*.
- Juego de repuestos con *canister* para la mascarilla de protección, empaques de plomo para el montaje del clorador y otros repuestos recomendados por el fabricante para efectuar el mantenimiento adecuado del equipo.
- Equipo para la detección de fugas: botella de amoniaco con tapa de apertura rápida.
- Cilindros de reserva (como mínimo, tres para plantas pequeñas). Véase el cuadro 6-2 para plantas de medianas a grandes.
- Comparador para medir cloro residual.

b) Criterios de diseño

- El caudal mínimo de agua para el funcionamiento del inyector se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$q = Q \cdot D_M / C \quad (3)$$

Donde:

D_M = dosis máxima, normalmente se asume igual a 5,0 mg/L.

C = concentración de la solución clorada, normalmente se asume igual a 3.500 mg/L.



Figura 6-26. Cloradores de consola (2)

Usar caudales de agua mayores que q no ofrece problemas en la dosificación y a menudo es necesario tomar caudales mayores para ajustarse a los tamaños comerciales de los equipos de bombeo. Los equipos de bombeo pueden evitarse, cuando la planta cuenta con un suministro de agua con presión suficiente para el funcionamiento del inyector. Usualmente, la mínima presión necesaria es 30 metros de columna de agua (mca), más las pérdidas calculadas en la tubería de abastecimiento.

- La potencia mínima del equipo de bombeo se calcula con la siguiente ecuación:

$$P = \delta Q H / 75 E \quad (4)$$

Donde:

- δ = peso específico del agua ($\sim 1.000 \text{ kg/m}^3$)
- H = carga dinámica total (mca)
- E = eficiencia del equipo de bombeo

Para el cálculo de H se utilizan los siguientes criterios:

$$H = h + H_o + H_m \quad (5)$$

Donde:

- h = presión requerida por el inyector (mca)
- H_o = pérdidas por fricción (mca)
- H_m = pérdidas menores (mca)

$$H_o = f \cdot L / \varnothing \cdot V^2 / 2g \quad (\text{fórmula de Darcy Weisbach}) \quad (6)$$

Donde:

- f = 0,030 (coeficiente de fricción)
- L = longitud de la tubería (m)
- \varnothing = diámetro de la tubería (m)
- V = 0,60 a 1,20 m/s (velocidad del agua)
- g = aceleración de la gravedad.

Nota: También es correcto emplear fórmulas como la de Hazen Williams y la de Flamant (9).

$$H_m = \sum K v^2 / 2g \quad (7)$$

Donde $\sum K$ = suma de coeficientes de pérdida de carga en accesorios. Los usuales se indican en el cuadro 6-5.

Cuadro 6-5. Coeficientes de pérdida de carga menores (3)

Accesorios	K
Codo	0,40
Te de paso directo	0,25
Válvula de compuerta	0,30
Filtro "Y"	3,50
Total $\sum K =$	4,45

Nota: La suma de K debe ajustarse de acuerdo con el diseño de cada sistema.

- Capacidad requerida del equipo

$$W = Q \cdot D_M \quad (8)$$

Donde:

W = capacidad requerida en g/h.

Con este dato entramos a los catálogos de los fabricantes y seleccionamos un equipo cuya capacidad sea igual o inmediatamente superior a la requerida. El cuadro 6-6 ofrece información tomada de los catálogos (2).

Cuadro 6-6. Tamaños comerciales de cloradores (3)

Capacidad del clorador ^a		Temperatura ambiente mínima ^b	
g/h	lb/día	°C	°F
—	100	24,0	75
1.400	75	13,3	56
750	40	2,0	36
280	15	- 3,0	26
120	6	- 5,0	23
50	2	- 5,6	22

Nota:

^a La dosificación mínima es 1/20 de la máxima.

^b Estimación razonable de la temperatura ambiente mínima para una dosificación continua.

c) Aplicación

Se desea proyectar una estación de cloración para un caudal de 100 L/s, un rango de dosificación de 1 a 3 mg/L y una dosis normal de 1,5 mg/L.

La dosis normal se selecciona sobre la base de una curva de demanda de cloro (o curva al punto de quiebre) del agua por tratar. La dosis mínima es la que supera la dosis al punto de quiebre (1,4 mg/L para el caso de la figura 6-8).

El cuadro 6-7 resume el cálculo del ejemplo de aplicación propuesto.

Cuadro 6-7. Cálculo de una estación de cloración (3)

N.º	Datos	Unidad	Criterios	Cálculos	Resultados	Unidad
1	Caudal de diseño	L/s	$q = Q D_M / C$	$q = 100 \times 3 / 3.500 (10)^3$ $q = 0,086 (10)^{-3}$	Caudal mínimo de agua requerido para la operación del inyector	m ³ /s
	$Q = 100$					
	Dosis máxima	mg/L				
	Concentración de la solución	mg/L	$W = Q D_M$	$W = (100 \times 3 \times 3.600) / (10)^3$ $W = 1.080$	Capacidad requerida del equipo	g/h
	$C = 3.500$					
2						
3	En el cuadro 6-6 seleccionamos el equipo que nos pueda dar la capacidad requerida. $W_{máx} = 1.400$	g/h		$W_{min} = \frac{1.400}{20}$ $W_{min} = 19,45$	Capacidad mínima del clorador	g/h
4	Velocidad en la tubería de alimentación de agua $V = 0,90$	m/s	$A = q / V$	$A = (0,086 (10)^{-3}) / 0,90$ $A = 9,6 (10)^{-5}$	Área de la tubería	m ²
5	Longitud de la tubería de alimentación de agua $L = 4$	m	$\phi = \sqrt[4]{4 A / \pi}$	$\phi = \sqrt[4]{4 \times 9,6 (10)^{-5} / 3,1416}$ $\phi = 0,011 \approx 1/2''$	Diámetro de la tubería de alimentación de agua	m
6	Coefficiente de fricción $f = 0,03$		$H_o = f \cdot L / \phi \cdot V^2 / 2g$	$H_o = (0,03) [(4) / (0,0127)] / (0,9)^2 / 19,62$; $H_o = 0,38$	Pérdidas de carga por fricción	m
7	Pérdida de carga total por accesorios, $K = 4,45$		$H_m = K V^2 / 2g$	$H_m = 4,45 (0,90)^2 / 19,6$ $H_m = 0,18$	Pérdidas de carga menores	m
8	Presión requerida por el inyector, $h = 30$	m	$H = h + H_o + H_m$	$H = 30 + 0,38 + 0,18$ $H = 30,56$	Carga dinámica total	m
9	Peso específico del agua $\delta = 1.000$ $E = 0,85$	kg/m ³	$P = \delta \cdot q \cdot H / 75E$	$P = [(10)^3 (0,086) (10)^{-3} (30,56)] / 75 (0,85)$	$P = 0,041$	HP
10	Tiempo de contacto $T = 25$	min	$Vol. Tc = QT$	$Vol. Tc = [(100)(25) (60)] / 1.000$ $Vol. Tc = 150$	Volumen del tanque de contacto	m ³

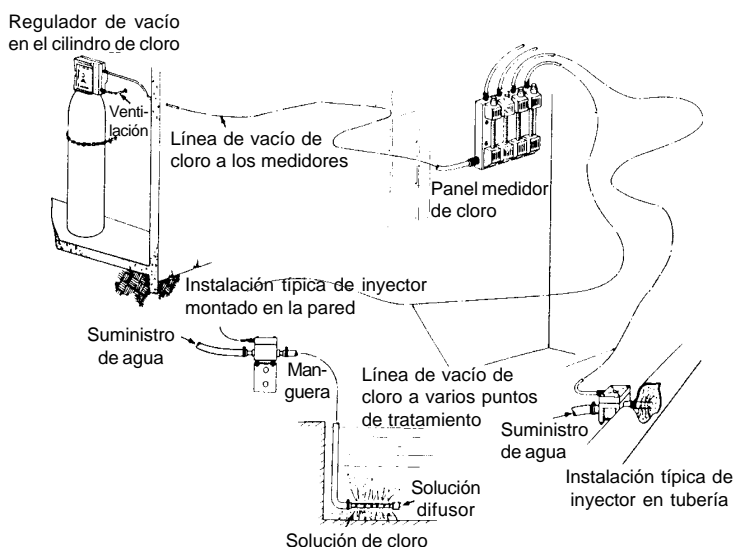


Figura 6-27. Clorador con inyector, colocación múltiple de medidor de cloro (3)

4.4 Evaporadores

Las estaciones de cloración grandes, donde se gastan más de 1.000 kg/día, requieren el uso simultáneo de varios 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 de los cilindros en lugar de gas, lo que supone las siguientes ventajas:

- Disminuye el número de cilindros en servicio requeridos para alimentar el clorador, debido a que la extracción de cloro líquido no plantea las mismas limitaciones que la de 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 de cloración es significativa.

Los evaporadores que van montados lo más cerca posible de los equipos de cloración consisten en un tanque 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 es llevado 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 los 65 °C. También es necesario considerar lo siguiente:

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

La figura 6-28 muestra una estación de cloración para 6 m³/s con evaporadores (hilera de la derecha) y cloradores (fila del fondo).



Figura 6-28. Evaporadores para operar con cloro líquido (2)

4.5 Sistemas de control

Para los sistemas de control, debemos hacer uso de todo nuestro ingenio para no llegar a sofisticaciones innecesarias. El caso más común se presenta cuando se tiene caudal de agua constante y demanda constante de cloro; aquí todo se reduce a instalar un sistema de cloración con ajuste de dosificación manual y alguna forma de parar el equipo cuando sea necesario.

4.5.1 Sistemas automáticos

El control automático de la cloración se basa en la medición, por medio de sensores, de la dosis de cloro residual en el efluente de la planta. El equipo envía una señal que puede ser interpretada por un receptor de la siguiente manera:



Figura 6-29. Sala de sistemas de control automático de la cloración (2)

- a) Accionar una alarma para que el operador corrija manualmente la dosis.
- b) Accionar el equipo de ajuste automático del rotámetro de acuerdo con la dosis prefijada en el sistema. Este sería un sistema totalmente automatizado.

Los equipos automáticos (figuras 6-30 y 6-31) usualmente incluyen sistemas analógicos, digitales o carta gráfica para mostrar y almacenar información sobre el proceso de dosificación.

Estos equipos tienen la ventaja de reducir el error humano en la dosificación, pero son de alto costo y requieren mantenimiento especializado.

Los principales casos de control automático se presentan en el cuadro 6-8.

Cuadro 6-8. Sistemas automáticos (5)

N.º	Caudal		Demanda
1	Constante		Constante
2	Variable	a) Variaciones continuas b) Variaciones por pasos	Constante
3	Constante		Variable
4	Variable	a) Variaciones continuas b) Variaciones por pasos	Variable

Los casos 3 y 4 son bastante raros y se puede decir que en agua potable no se dan. Solo se han visto situaciones como estas en los casos de aguas residuales.

Los casos 1 y 2 sí se presentan en agua potable, cuando el abastecimiento se realiza por pozos. Cuando se bombea directamente del pozo a la red, tendremos gasto variable de acuerdo con las horas del día y cuando tenemos un tanque regulador alimentado por una serie de pozos, se presenta el caso de variación por pasos, al operar uno, dos o varios pozos.

Para caudales variables, existen los medidores primarios del tipo Venturi o de orificio para el caso de ductos cerrados; para canales abiertos, se emplean los medidores Parshall y vertederos, instrumentos sencillos y fáciles de operar, capaces de enviar una señal al clorador para que obedezca en forma proporcional al gasto, aumentando o disminuyendo el caudal de solución por aplicar.

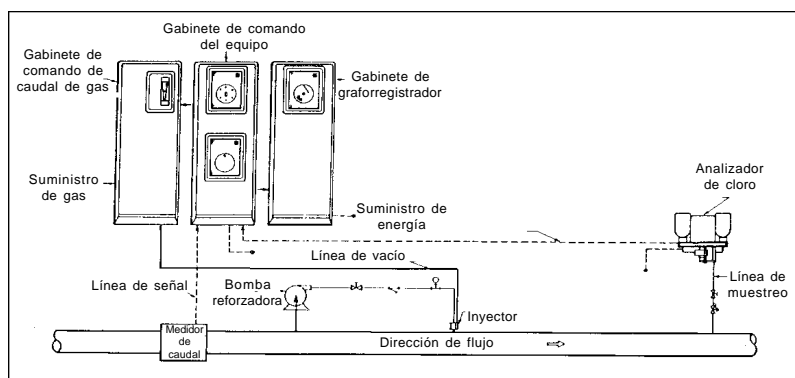


Figura 6-30. Sistema de control automático de lazo compuesto (3)

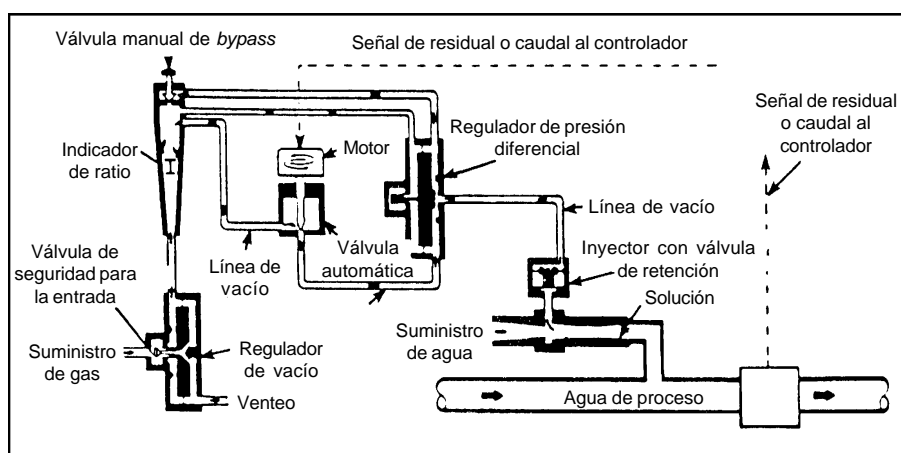


Figura 6-31. Diagrama de flujo, sistema de comando automático (3)

5. PUNTO DE APLICACIÓN

Normalmente, la solución de cloro se aplica en la cámara de salida de la planta de tratamiento, en una zona con una sumergencia no menor de un metro, con el fin de reducir el escape de cloro. Cuando se utiliza un clorador de alimentación directa, el difusor debe colocarse en el fondo de la cámara con sumergencia constante. No se recomienda un tanque con altura de agua variable, porque se perdería mucho gas en la atmósfera.

Es importante que la aplicación se haga mediante un difusor para difundir mejor el cloro en el punto apropiado. Se pueden dar tres casos en relación con el punto de aplicación del cloro:

- 1) aplicación en ducto cerrado;
- 2) aplicación en canal abierto;
- 3) aplicación en un tanque.

En el caso de ductos cerrados y si el diámetro es pequeño, solo debemos cuidar de que la solución no tenga contacto directo con el ducto en el punto mismo de aplicación. Esto se logra mediante difusores de plástico tipo bayoneta, introducidos a una profundidad de $1/3$ del diámetro del ducto.

Para el caso de canales abiertos, el cuidado estriba en no permitir que se pierda el cloro hacia la atmósfera, por efecto de una mala difusión en el caudal principal. Para esto, si se coloca un difusor en el fondo del canal, con orificios que permitan una distribución uniforme en todo el ancho del ducto, podemos garantizar un aprovechamiento óptimo (figura 6-32).

Cuando se requiera efectuar la aplicación de la solución clorada en tanques de almacenamiento o regulación, se presentan algunos casos tan sencillos como tener una entrada y una salida o múltiples entradas y salidas, y todas en diferentes puntos del tanque. En el primer caso, el problema se reduce a aplicar en ducto cerrado, ya sea a la entrada o a la salida; en el segundo, es prácticamente imposible lograr un buen diseño que garantice evitar las pérdidas de cloro a la atmósfera y la formación de zonas de alta y baja concentración de cloro dentro del tanque.

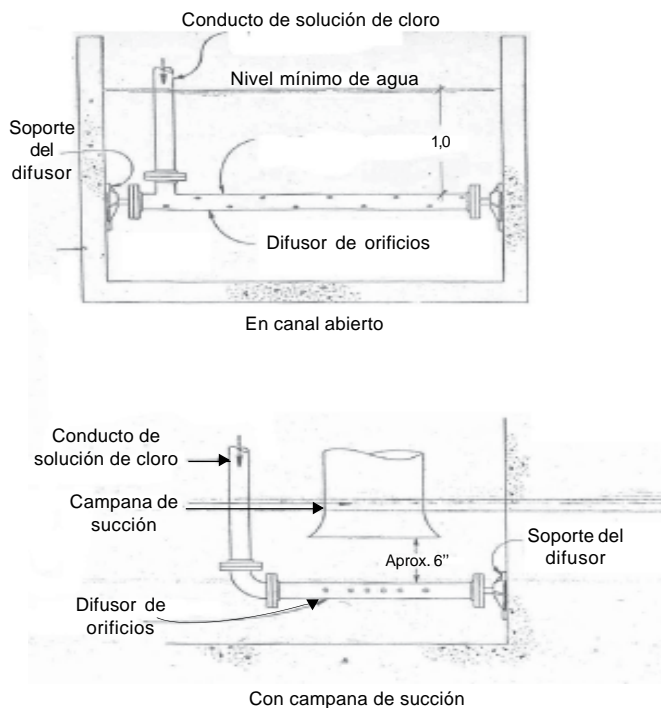


Figura 6-32. Soluciones para aplicación en canal abierto y cámara húmeda (4)

6. CÁMARA DE CONTACTO

La cámara de contacto tiene como función asegurar un tiempo de contacto fijo entre el agua y el cloro, de tal modo de asegurar la remoción de bacterias, virus y parásitos presentes en el agua.

6.1 Tiempo de contacto para la reducción de bacterias

Después de la aplicación del desinfectante para asegurar la remoción de bacterias, normalmente se ha venido aplicando al agua clorada un tiempo de contacto no menor de 20 a 30 minutos.

En el ejemplo desarrollado en el cuadro 6-7, se requiere una cámara de contacto de 150 m³. Para evitar cortocircuitos, es necesario colocar pantallas, de manera que el volumen quede dividido por lo menos en tres sectores. La cámara de contacto del ejemplo podría tener 2,50 metros de alto, 10 metros de largo y 6 metros de ancho.

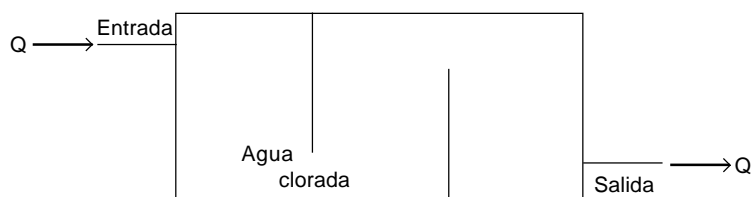


Figura 6-33. Esquema de cámara de contacto

6.2 Tiempo de contacto para la reducción de parásitos

La Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA) recomienda tener en cuenta criterios especiales para la reducción e inactivación de *Giardia* y virus. En nuestro medio, estos criterios deberían aplicarse por lo menos al diseñar los sistemas de cloración para las zonas de parasitosis endémica, normalmente las poblaciones ubicadas en la costa y en la selva.

Se recomienda la aplicación del producto del tiempo de contacto (T) en minutos, por la dosis o concentración de cloro (C) en mg/L requerida para cada caso, en función de la temperatura, del pH del agua y de la dosis de cloro libre seleccionada.

La máxima concentración de cloro (C) que puede aplicarse al agua, tomando en cuenta su eficacia y consideraciones estéticas (gusto y olor) es normalmen-

te de 2,5 mg/L como cloro residual libre. Por consiguiente, los ajustes en el tiempo de contacto ofrecen la mejor opción para la optimización de la desinfección.

Procedimiento:

- 1) Estimar el nivel total de reducción o inactivación logarítmica de *Giardia* que puede esperarse de los procesos de tratamiento de agua, a partir de la calidad del agua cruda y del posible nivel de operación y mantenimiento, de acuerdo con el grado de desarrollo y de los recursos localmente disponibles.

Generalmente, los requisitos de inactivación de *Giardia* son más difíciles de cumplir que los que se plantean para los virus; en consecuencia, los criterios para la inactivación de *Giardia* son los principales. El requisito estándar para una planta con buena eficiencia de remoción de partículas es de tres niveles logarítmicos de inactivación. Se pueden considerar cuatro niveles logarítmicos o más para un sistema sin protección de la fuente, expuesto a efluentes del tratamiento de aguas residuales o a descargas domésticas sin tratamiento, práctica todavía habitual en los países de América Latina.

- 2) Estimar el nivel de reducción logarítmica en función del tipo de planta que se va a proyectar. El cuadro 6-9 presenta la remoción esperada de *Giardia* y virus mediante los diversos tipos de plantas de filtración, en condiciones óptimas.

Cuadro 6-9. Remoción esperada de quistes de *Giardia* y virus mediante filtración (6)

Filtración	Remoción logarítmica	
	<i>Giardia</i>	Virus
Convencional	2,5	2,0
Directa	2,0	1,0
Lenta en arena	2,0	2,0
Tierra de diatomeas	2,0	1,0

- 3) Seleccionar un valor de tiempo de contacto por concentración de cloro (TC)¹, a partir de la capacidad de reducción logarítmica estimada para la

¹ Véanse en el anexo los valores de TC para la inactivación de *Giardia* y virus mediante Cl₂ libre.

planta (cuadro 6-9), el pH máximo, la temperatura mínima del agua tratada y el residual máximo de desinfectante estimado. El pH máximo y la temperatura mínima del agua tratada se consideran para asegurar la capacidad del sistema en las condiciones más desfavorables. Cuando se usa cloro como desinfectante, el residual máximo considerado es de 2,5 mg/L. Este límite se basa en investigaciones en las que se concluyó que el tiempo de retención es más importante que la concentración del desinfectante con cloro residual libre por encima de 2,5 mg/L, además de la tolerancia del consumidor a residuales mayores.

- 4) Calcular el tiempo de retención requerido para el TC seleccionado. La ecuación de cálculo es la siguiente:

$$T_{req} \text{ (mín)} = TC \text{ (mg/L - min)} / \text{desinfectante residual (mg/L)} \quad (9)$$

Donde:

T_{req} = tiempo requerido por el proceso de desinfección.

T_{Creq} = requisitos de TC a partir de los cuadros del anexo para condiciones de posdesinfección.

Desinfectante residual = residual de operación que deseamos se mantenga en la planta en el punto de salida del proceso de desinfección.

- 5) Seleccione un volumen efectivo para la cámara de contacto, descontando el volumen disponible en reservorios y tuberías de distribución. En el caso de los reservorios, si los proyectamos con pantallas interiores, como cámaras de contacto, podremos obtener un tiempo de contacto mayor. En el caso de que el reservorio sea ya existente, se deberá calcular el tiempo de contacto disponible en las condiciones más desfavorables de operación, con la profundidad mínima disponible. Lo más adecuado sería determinar el tiempo de contacto real del reservorio en las condiciones más desfavorables (ver el procedimiento en *Tratamiento de agua para consumo humano. Plantas de filtración rápida. Manual III: Evaluación*). Si no se dispone de esa información, el volumen efectivo se podrá obtener multiplicando por los factores indicados en el cuadro 6-10 el volumen total del reservorio. Se debe tener mucho cuidado para aplicar un factor mayor de 0,10 a un tanque sin compartimientos.

Cuadro 6-10. Factores para determinar el tiempo de contacto efectivo (6)

Condición de la compartimentalización	Factor	Descripción de la compartimentalización
Sin compartimientos	0,1	Ninguna, unidades con agitación, velocidad alta en la entrada y salida, nivel variable de agua.
Deficiente	0,3	Entrada y salida simple o múltiple, directa y sin pantallas. Sin compartimientos internos.
Promedio	0,5	Entrada y salida no directas, interrumpidas por algunos compartimientos internos.
Superior	0,7	Compartimientos perforados en la entrada, compartimientos perforados en forma de serpentín en el interior de la unidad, vertedero en la salida o vertedero perforado.
Excelente	0,9	Compartimientos en forma de serpentín a lo largo de toda la unidad.
Perfecta (flujo pistón)	1,0	Flujo de tubería.

- 6) Una vez calculado el tiempo de contacto disponible en el sistema antes del primer usuario, se descuenta del tiempo requerido (*Treq*), calculado con la ecuación (9), y la diferencia será el volumen con el que se deberá proyectar la cámara de contacto, para cumplir con el objetivo de inactivar huevos de parásitos y virus.

7. VENTILACIÓN Y EQUIPOS DE PROTECCIÓN

Todo el equipo de cloración debe montarse en un ambiente amplio, bien ventilado y de uso exclusivo. Las instalaciones pequeñas pueden ventilarse solamente con ventanas colocadas en la parte inferior de los muros, ya que por ser el cloro más pesado que el aire, tiende a quedarse depositado sobre el suelo. Las estaciones de cloración más grandes requieren, además, extractores de aire colocados en la parte baja de la sala, operables desde el exterior.



Figura 6-34. Sistemas de protección (2)

En estos sistemas se recomienda un cambio total del volumen de aire cada 15 minutos en tiempo normal y cada tres minutos cuando existe posibilidad de que se produzcan 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 tuberías queden a la vista, sujetas contra la pared y situadas en lugares accesibles que faciliten una rápida inspección y reparación.

Además, deben incluirse en el diseño todos los equipos de protección necesarios, para que se puedan detectar en cualquier momento los escapes de cloro y repararlos, sin peligro para los operadores de la planta.

Los implementos de protección más importantes son los siguientes:

- a) sistema de alarma;
- b) máscaras;
- c) equipos de taponamiento de fugas;
- d) botella de amoniaco.

7.1 Sistemas de alarma

Existen varios tipos de alarmas que pueden incluirse en los diseños de las estaciones de cloración. Las más importantes son las siguientes:

- alarmas de pared;
- discos rompibles;
- alarmas internas de los equipos.

Las alarmas de pared pueden ser de dos tipos. El primero consiste en un papel sensitivo impregnado de 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.



Figura 6-35. Alarmas de pared (2)

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

El Instituto del Cloro en Estados Unidos recomienda el uso de una cámara de expansión para tuberías largas de conducción de cloro, entre los cilindros y los aparatos de cloración. Estas cámaras contienen un disco que se rompe a una presión de 300 a 400 lb/pulgada² y permite que el cloro se escape hacia la cámara de expansión, donde hace sonar una alarma. Estas cámaras suelen instalarse a veces en combinación con válvulas de cierre automático que, en cuanto se rompe el disco, cierran el paso del flujo del cloro a las líneas de aducción.



Figura 6-36. Máscara de oxígeno (2)

7.2 Equipo de protección para los operadores

A fin de que las fugas puedan ser reparadas sin peligro para los operadores, deben incluirse máscaras protectoras dentro del equipo de cloración. Esto es algo que lamentablemente se descuida con mucha frecuencia.



Figura 6-37. Armarios con el equipo para atención de fugas (2)

Básicamente, hay 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 puede durar hasta 45 minutos.

El equipo para atención de emergencias en el caso de una fuga de cloro debe guardarse en armarios ubicados en la parte exterior de la estación. De preferencia, al pie de la puerta de entrada a la sala, para que el operador pueda acceder a él fácilmente.

Según las recomendaciones de la EPA, el operador debe hacer uso de este equipo cada vez que deba cambiar un cilindro de cloro. La operación debe estar a cargo de dos personas simultáneamente.



Figura 6-38. Vehículo equipado para emergencias originadas por el cloro (2)

El vehículo de la figura 6-38 está equipado con todo lo necesario para atender una fuga de importancia, inclusive un traje especial para proteger a los operadores contra el cloro.

Esta solución permite atender varias plantas que se encuentran dentro del perímetro de la ciudad atendida por esta empresa.

8. RECOMENDACIONES PARA EL PROYECTO

- La caseta de cloración debe estar aislada del resto de la casa de química o edificio de operaciones. En caso de que se produzca una fuga importante, no comprometerá otras instalaciones ubicadas a su alrededor.



Figura 6-39. Falta un clorador alternativo (2)

- Las paredes exteriores de la caseta deben construirse con ladrillo hueco para darle suficiente ventilación. Esto vale especialmente para la parte baja de los muros.

- Las partes metálicas (balanza, cadenas o barras de protección, etcétera) deben llevar protección anticorrosiva.
- Los equipos de protección para fugas deben estar ubicados fuera de la sala y muy cerca del ingreso.
- Los equipos de bombeo deben instalarse en una zona aislada de la caseta, para protegerlos de las fugas de gas.
- Las tuberías, válvulas y accesorios deben ser de plástico.
- Tanto los cilindros de reserva como los que están en uso deben tener una cadena o barra de sujeción para prevenir el volcamiento.

9. PROBLEMAS MÁS COMUNES

La cloración es el proceso que involucra más riesgos para el operador y es en la cloración que se suelen cometer más errores, desde la instalación de la caseta. A continuación se presentan los problemas más comunes al momento de proyectar una estación de cloración, a fin de estar preparados para evitarlos.



Figura 6-40. Falta un clorador alterno (2)



Figura 6-41. Sala de cloración mal ubicada e instalada (2)

- Uno de los defectos más comunes es encontrar que no se ha considerado un clorador alterno ni una bomba alterna para la alimentación de agua del equipo.

En cualquiera de ambos casos, si el equipo en operación se descompone, el proceso cae y la contaminación microbiológica podría salir a la red de distribución (véanse las figuras 6-39 y 6-40).

La figura 6-41 muestra un caso en el que no se tuvo en cuenta ninguna de las recomendaciones indicadas anteriormente.

La sala de cloración está dentro de la casa de química de la planta, frente al laboratorio y a muy poca distancia de la sala de dosificación, de tal manera que si se produjera una fuga, afectaría al personal que trabaja en estas dependencias y comprometería seriamente muchos equipos.



Figura 6-42. Sala de cloración defectuosa (2)

Además, se puede observar que no existe grúa para trasladar los cilindros sino que estos son transportados en un carrito por todo el edificio hasta llegar a destino y la sala carece totalmente de ventilación, lo que incrementa aún más el riesgo en caso de fuga.

La sala de cloración de la figura 6-42 es muy estrecha para cilindros de una tonelada. Los cilindros no están dispuestos y anclados adecuadamente. No hay grúa para izarlos. No se han dejado corredores para que los operadores se desplacen.

No hay balanza. No hay sistema de alarma ni equipo de protección para fugas de cloro.



Figura 6-43. Sala de cloración mal instalada (2)

La figura 6-43 muestra otra instalación defectuosa, en la que el proyectista no previó el área ni las facilidades necesarias: el equipo está colocado al pie de la puerta, lo que plantea el riesgo de que se caiga si no se tiene cuidado al entrar. No hay ventilación ni balanza ni equipo de cloración alterno.



Figura 6-44. Sala de cloración mal ventilada (2)



Figura 6-45. Sala de cloración incompleta (2)

La sala de cloración de la figura 6-44 tiene la ventilación en la parte alta. Evidentemente, el proyectista desconocía que el cloro es más pesado que el aire y tiende a depositarse a nivel del piso. Además, no había equipo de protección para fugas de cloro.

La sala de cloración de la figura 6-45 carece de equipo alternativo, de balanza, de equipo de protección para fugas de cloro, mientras que la ventilación considerada no llega hasta



Figura 6-46. Solución ingeniosa pero incompleta (2)

el nivel del piso, que es justamente donde se acumula el gas cloro.

Es evidente que la sala de cloración de la figura 6-46 está muy ventilada, pero no hay balanza y faltan clorador alternativo, equipo de protección para manipular los cilindros y barras de sujeción para los cilindros.



Figura 6-47. Entrada de una cámara de contacto de cloro (2)

La figura 6-47 muestra la entrada a una cámara de contacto de cloro. La tubería que se observa es la conducción de la solución de cloro, que se está vertiendo desde arriba y en forma puntual. El gas se perdía en la atmósfera y el olor del cloro se podía sentir a distancia.

La figura 6-48 muestra lo que tiene que hacer el personal de operación de una planta en cuyo proyecto se olvidó considerar la instalación de una grúa para izar los cilindros de una tonelada. El personal debe ejecutar una operación muy riesgosa,

en la que se dejan caer los cilindros desde la plataforma de un camión sobre unas llantas, para luego llevarlos rodando hasta el almacén.



Figura 6-48. Descarga inadecuada de cilindros de cloro de una tonelada (2)

REFERENCIAS

- (1) Arboleda Valencia, J. (1987) “Estaciones de cloración”, capítulo VIII del *Manual de desinfección del agua*. Memorias del Seminario Internacional sobre Tecnología Simplificada para Potabilización del Agua. Cali, ACODAL.
- (2) Canepa de Vargas, L. Estudios y fotos de archivo. Lima, CEPIS/OPS, 2004.
- (3) Rodríguez Araya, V (1992). *Manual V, Diseño*. Tomo IV, “Criterios de diseño para estaciones de cloración”. Programa Regional HPE/CEPIS/OPS de Mejoramiento de la Calidad del Agua para Consumo Humano. Lima, CEPIS.
- (4) Pacheco, V. (1992). *Manual III Teoría*. Tomo IV, “Desinfección”. Programa Regional HPE/CEPIS/OPS de Mejoramiento de la Calidad del Agua para Consumo Humano. Lima, CEPIS.
- (5) Peña Díaz, A. (1984). “Criterios generales para el diseño de sistemas de cloración”. Copias del Curso Internacional CEPIS/OPS de Procesos Unitarios y Anteproyectos de Plantas Potabilizadoras. Guadalajara.
- (6) Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA) (1998). *Optimización de la producción de plantas de tratamiento de agua mediante el Programa de Corrección Compuesto*. Lima, CEPIS.
- (7) Di Bernardo, L. (1993). *Métodos y técnicas de tratamiento de agua*. Vol. II. Río de Janeiro, ABES.
- (8) Normas Brasileñas. Projeto de Estação de Tratamento de Água para Abastecimiento Público. Procedimiento NB-592 JAN/1987.

Anexo A

Valores TC para la inactivación de Giardia y virus mediante Cl₂ libre y otros desinfectantes

Todos los cuadros de este anexo provienen del Guidance Manual for Compliance with the Filtration and Disinfection Requirements for Public Water Systems Using Surface Water Sources, Appendix E, Science and Technology Branch, Criteria and Standards Division, Office of Drinking Water, Washington, D. C., EPA, 1989.

Cuadro A-1. Valores CT para la inactivación de quistes de *Giardia* con cloro libre a 0,5 °C o menos

Concentración del cloro (mg/L)	pH <= 6,0					pH = 6,5					pH = 7,0					pH = 7,5								
	Log de inactivación					Log de inactivación					Log de inactivación					Log de inactivación								
	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0
<=0,4	23	46	69	91	114	137	27	54	82	109	136	163	33	65	98	130	163	195	40	79	119	158	198	237
0,6	24	47	71	94	118	141	28	56	84	112	140	168	33	67	100	133	167	200	40	80	120	159	199	239
0,8	24	48	73	97	121	145	29	57	86	115	143	172	34	68	103	137	171	205	41	82	123	164	205	246
1	25	49	74	99	123	148	29	59	88	117	147	176	35	70	105	140	175	210	42	84	127	169	211	253
1,2	25	51	76	101	127	152	30	60	90	120	150	180	36	72	108	143	179	215	43	86	130	173	216	259
1,4	26	52	78	103	129	155	31	61	92	123	153	184	37	74	111	147	184	221	44	89	133	177	222	266
1,6	26	52	79	105	131	157	32	63	95	126	158	189	38	75	113	151	188	226	46	91	137	182	228	273
1,8	27	54	81	108	135	162	32	64	97	129	161	193	39	77	116	154	193	231	47	93	140	186	233	279
2	28	55	83	110	138	165	33	66	99	131	164	197	39	79	118	157	197	236	48	95	143	191	238	286
2,2	28	56	85	113	141	169	34	67	101	134	168	201	40	81	121	161	202	242	50	99	149	198	248	297
2,4	29	57	86	115	143	172	34	68	103	137	171	205	41	82	124	165	206	247	50	99	149	199	248	298
2,6	29	58	88	117	146	175	35	70	105	139	174	209	42	84	126	168	210	252	51	101	152	203	253	304
2,8	30	59	89	119	148	178	36	71	107	142	178	213	43	86	129	171	214	257	52	103	155	207	258	310
3	30	60	91	121	151	181	36	72	109	145	181	217	44	87	131	174	218	261	53	105	158	211	263	316
Concentración del cloro (mg/L)	pH = 8,0					pH = 8,5					pH <=9,0													
	Log de inactivación					Log de inactivación					Log de inactivación													
	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0						
<=0,4	46	92	139	185	231	277	55	110	165	219	274	329	65	130	195	260	325	390						
0,6	48	95	143	191	238	286	57	114	171	228	285	342	68	136	204	271	339	407						
0,8	49	98	148	197	246	295	59	118	177	236	295	354	70	141	211	281	352	422						
1	51	101	152	203	253	304	61	122	183	243	304	365	73	146	219	291	364	437						
1,2	52	104	157	209	261	313	63	125	188	251	313	376	75	150	226	301	376	451						
1,4	54	107	161	214	268	321	65	129	194	258	323	387	77	155	232	309	387	464						
1,6	55	110	165	219	274	329	66	132	199	265	331	397	80	159	239	318	398	477						
1,8	56	113	169	225	282	338	68	136	204	271	339	407	82	163	245	326	408	489						
2	58	115	173	231	288	346	70	139	209	278	348	417	83	167	250	333	417	500						
2,2	59	118	177	235	294	353	71	142	213	284	355	426	85	170	256	341	426	511						
2,4	60	120	181	241	301	361	73	145	218	290	363	435	87	174	261	348	435	522						
2,6	61	123	184	245	307	368	74	148	222	296	370	444	89	178	267	355	444	533						
2,8	63	125	188	250	313	375	75	151	226	301	377	452	91	181	272	362	453	543						
3	64	127	191	255	318	382	77	153	230	307	383	460	92	184	276	368	460	552						

NOTA: CT 99,9 = CT para 3-log de inactivación.

Cuadro A-3. Valores CT para la inactivación de quistes de *Giardia* con cloro libre a 10 oC

Concentración del cloro (mg/L)	pH ≤ 6,0 Log de inactivación				pH = 6,5 Log de inactivación				pH = 7,0 Log de inactivación				pH = 7,5 Log de inactivación											
	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0						
<=0,4	12	24	37	49	61	73	15	29	44	59	73	88	17	35	52	69	87	104	21	42	63	83	104	125
0,6	13	25	38	50	63	75	15	30	45	60	75	90	18	36	54	71	89	107	21	43	64	85	107	128
0,8	13	26	39	52	65	78	15	31	46	61	77	92	18	37	55	73	92	110	22	44	66	87	109	131
1	13	26	40	53	66	79	16	31	47	63	78	94	19	37	56	75	93	112	22	45	67	89	112	134
1,2	13	27	40	53	67	80	16	32	48	63	79	95	19	38	57	76	95	114	23	46	69	91	114	137
1,4	14	27	41	55	68	82	16	33	49	65	82	98	19	39	58	77	97	116	23	47	70	93	117	140
1,6	14	28	42	55	69	83	17	33	50	66	83	99	20	40	60	79	99	119	24	48	72	96	120	144
1,8	14	29	43	57	72	86	17	34	51	67	84	101	20	41	61	81	102	122	25	49	74	98	123	147
2	15	29	44	58	73	87	17	35	52	69	87	104	21	41	62	83	103	124	25	50	75	100	125	150
2,2	15	30	45	59	74	89	18	35	53	70	88	105	21	42	64	85	106	127	26	51	77	102	128	153
2,4	15	30	45	60	75	90	18	36	54	71	89	107	22	43	65	86	108	129	26	52	79	105	131	157
2,6	15	31	46	61	77	92	18	37	55	73	92	110	22	44	66	87	109	131	27	53	80	107	133	160
2,8	16	31	47	62	78	93	19	37	56	74	93	111	22	45	67	89	112	134	27	54	82	109	136	163
3	16	32	48	63	79	95	19	38	57	75	94	113	23	46	69	91	114	137	28	55	83	111	138	166

Concentración del cloro (mg/L)	pH = 8,0 Log de inactivación				pH = 8,5 Log de inactivación				pH < 9,0 Log de inactivación									
	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0
<=0,4	25	50	75	99	124	149	30	59	89	118	148	177	35	70	105	139	174	209
0,6	26	51	77	102	128	153	31	61	92	122	153	183	36	73	109	145	182	218
0,8	26	53	79	105	132	158	32	63	95	126	158	189	38	75	113	151	188	226
1	27	54	81	108	135	162	33	65	98	130	163	195	39	78	117	156	195	234
1,2	28	55	83	111	138	166	33	67	100	133	167	200	40	80	120	160	200	240
1,4	28	57	85	113	142	170	34	69	103	137	172	206	41	82	124	165	206	247
1,6	29	58	87	116	145	174	35	70	106	141	176	211	42	84	127	169	211	243
1,8	30	60	90	119	149	179	36	72	108	143	179	215	43	86	130	173	216	259
2	30	61	91	121	152	182	37	74	111	147	184	221	44	88	133	177	221	265
2,2	31	62	93	124	155	186	38	75	113	150	188	225	45	90	136	181	226	271
2,4	32	63	95	127	158	190	38	77	115	153	192	230	46	92	138	184	230	276
2,6	32	65	97	129	162	194	39	78	117	156	195	234	47	94	141	187	234	281
2,8	33	66	99	131	164	197	40	80	120	159	199	239	48	96	144	191	239	287
3	34	67	101	134	168	201	41	81	122	162	203	243	49	97	146	195	243	292

NOTA: CT 99,9 = CT para 3-log de inactivación.

Cuadro A-4. Valores CT para la inactivación de quistes de *Giardia* con cloro libre a 15 °C

Concentración del cloro (mg/L)	pH <= 6,0 Log de inactivación				pH = 6,5 Log de inactivación				pH = 7,0 Log de inactivación				pH = 7,5 Log de inactivación					
	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0
<=0,4	16	25	33	41	49	1	20	30	39	49	59	12	23	35	47	58	70	83
0,6	17	25	33	42	50	1	20	30	40	50	60	12	24	36	48	60	72	86
0,8	9	17	26	35	43	1	20	31	41	51	61	12	24	37	49	61	73	88
1	9	18	27	35	44	11	21	32	42	53	63	13	25	38	50	63	75	90
1,2	9	18	27	36	45	11	21	32	43	53	64	13	25	38	51	63	76	92
1,4	9	18	28	37	46	11	22	33	43	54	65	13	26	39	52	65	78	94
1,6	9	19	28	37	47	11	22	33	44	55	66	13	26	40	53	66	79	96
1,8	10	19	29	38	48	11	23	34	45	57	68	14	27	41	54	68	81	98
2	10	19	29	39	48	12	23	35	46	58	69	14	28	42	55	69	83	100
2,2	10	20	30	39	49	12	23	35	47	58	70	14	28	43	57	71	85	102
2,4	10	20	30	40	50	12	24	36	48	60	72	14	29	43	57	72	86	105
2,6	10	20	31	41	51	12	24	37	49	61	73	15	29	44	59	73	88	107
2,8	10	21	31	41	52	12	25	37	49	62	74	15	30	45	59	74	89	109
3	11	21	32	42	53	13	25	38	51	63	76	15	30	46	61	76	91	111
Concentración del cloro (mg/L)	pH <= 6,0 Log de inactivación				pH = 6,5 Log de inactivación				pH = 7,0 Log de inactivación				pH = 7,5 Log de inactivación					
	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0
<=0,4	17	33	50	66	83	99	20	39	59	79	98	118	23	47	70	93	117	140
0,6	17	34	51	68	85	102	20	41	61	81	102	122	24	49	73	97	122	146
0,8	18	35	53	70	88	105	21	42	63	84	105	126	25	50	76	101	126	151
1	18	36	54	72	90	108	22	43	65	87	108	130	26	52	78	104	130	156
1,2	19	37	56	74	93	111	22	45	67	89	112	134	27	53	80	107	133	160
1,4	19	38	57	76	95	114	23	46	69	91	114	137	28	55	83	110	138	165
1,6	19	39	58	77	97	116	24	47	71	94	118	141	28	56	85	113	141	169
1,8	20	40	60	79	99	119	24	48	72	96	120	144	29	58	87	115	144	173
2	20	41	61	81	102	122	25	49	74	98	123	147	30	59	89	118	148	177
2,2	21	41	62	83	103	124	25	50	75	100	125	150	30	60	91	121	151	181
2,4	21	42	64	85	106	127	26	51	77	102	128	153	31	61	92	123	153	184
2,6	22	43	65	86	108	129	26	52	78	104	130	156	31	63	94	125	157	188
2,8	22	44	66	88	110	132	27	53	80	106	133	159	32	64	96	127	159	191
3	22	45	67	89	112	134	27	54	81	108	135	162	33	65	98	130	163	195

NOTA: CT 99,9 = CT para 3-log de inactivación.

Cuadro A-5. Valores CT para la inactivación de quistes de *Giardia* con cloro libre a 20 °C

Concentración del cloro (mg/L)	pH ≤ 6,0 Log de inactivación				pH = 6,5 Log de inactivación				pH = 7,0 Log de inactivación				pH = 7,5 Log de inactivación											
	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0						
<=0,4	6	12	18	24	30	36	7	15	22	29	37	44	9	17	26	35	43	52	10	21	31	41	52	62
0,6	6	13	19	25	32	38	8	15	23	30	38	45	9	18	27	36	45	54	11	21	32	43	53	64
0,8	7	13	20	26	33	39	8	15	23	31	38	46	9	18	28	37	46	55	11	22	33	44	55	66
1	7	13	20	26	33	39	8	16	24	31	39	47	9	19	28	37	47	56	11	22	34	45	56	67
1,2	7	13	20	27	33	40	8	16	24	32	40	48	10	19	29	38	48	57	12	23	35	46	58	69
1,4	7	14	21	27	34	41	8	16	25	33	41	49	10	19	29	39	48	58	12	23	35	47	58	70
1,6	7	14	21	28	35	42	8	17	25	33	42	50	10	20	30	39	49	59	12	24	36	48	60	72
1,8	7	14	22	29	36	43	9	17	26	34	43	52	10	21	31	41	51	61	12	25	37	49	62	74
2	7	15	22	29	37	44	9	17	26	35	43	52	10	21	31	41	52	62	13	25	38	50	63	75
2,2	7	15	22	29	37	44	9	18	27	35	44	53	11	21	32	42	53	63	13	26	39	51	64	77
2,4	8	15	23	30	38	45	9	18	27	36	45	54	11	22	33	43	54	65	13	26	39	52	65	78
2,6	8	15	23	31	38	46	9	18	28	37	46	55	11	22	33	44	55	66	13	27	40	53	67	80
2,8	8	16	24	31	39	47	9	19	28	37	47	56	11	22	34	45	56	67	14	27	41	54	68	81
3	8	16	24	31	39	47	10	19	29	38	48	57	11	23	34	45	57	68	14	28	42	55	69	83

Concentración del cloro (mg/L)	pH = 8,0 Log de inactivación				pH = 8,5 Log de inactivación				pH < 9,0 Log de inactivación															
	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0						
<=0,4	12	25	37	49	62	74	15	30	45	59	74	89	18	35	53	70	88	105	18	36	55	73	91	109
0,6	13	26	39	51	64	77	15	31	46	61	77	92	18	36	55	73	91	109	19	38	57	75	94	113
0,8	13	26	40	53	66	79	16	32	48	63	79	95	20	39	59	78	98	117	20	40	60	80	100	120
1	14	27	41	54	68	81	16	33	49	65	82	98	20	40	60	80	100	120	21	41	62	82	103	123
1,2	14	28	42	55	69	83	17	33	50	67	83	100	21	42	63	84	105	126	21	42	63	84	105	126
1,4	14	28	43	57	71	85	17	34	52	69	86	103	22	43	66	88	110	132	22	44	66	88	110	132
1,6	15	29	44	58	73	87	18	35	53	70	88	105	22	44	68	90	113	135	23	45	68	92	115	138
1,8	15	30	45	59	74	89	18	36	54	72	90	108	22	45	69	92	115	138	23	46	69	92	115	138
2	15	30	46	61	76	91	18	37	55	73	92	110	23	46	71	94	118	141	24	47	71	94	118	141
2,2	16	31	47	62	78	93	19	38	57	75	94	113	23	47	72	95	119	143	24	48	72	95	119	143
2,4	16	32	48	63	79	95	19	38	58	77	96	115	24	48	73	97	122	146	24	49	73	97	122	146
2,6	16	32	49	65	81	97	20	39	59	78	98	117	24	49	74	98	123	147	24	49	74	98	123	147
2,8	17	33	50	66	83	99	20	40	60	79	99	119	24	49	74	98	123	147	24	49	74	98	123	147
3	17	34	51	67	84	101	20	41	61	81	102	122	24	49	74	98	123	147	24	49	74	98	123	147

NOTA: CT 99,9 = CT para 3-log de inactivación.

Cuadro A-6. Valores CT para la inactivación de quistes de *Giardia* con Cloro libre a 25 °C

Concentración del cloro (mg/L)	pH <= 6,0				pH = 6,5				pH = 7,0				pH = 7,5											
	Log de inactivación				Log de inactivación				Log de inactivación				Log de inactivación											
	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0						
<=0,4	4	8	12	16	20	24	5	10	15	19	24	29	6	12	18	23	29	35	7	14	21	28	35	42
0,6	4	8	13	17	21	25	5	10	15	20	25	30	6	12	18	24	30	36	7	14	22	29	36	43
0,8	4	9	13	17	22	26	5	10	16	21	26	31	6	12	19	25	31	37	7	15	22	29	37	44
1	4	9	13	17	22	26	5	10	16	21	26	31	6	12	19	25	31	37	8	15	23	30	38	45
1,2	5	9	14	18	23	27	5	11	16	21	27	32	6	13	19	25	32	38	8	15	23	31	38	46
1,4	5	9	14	18	23	27	6	11	17	22	28	33	7	13	20	26	33	39	8	16	24	31	39	47
1,6	5	9	14	19	23	28	6	11	17	23	28	34	7	14	21	27	34	41	8	16	24	32	40	48
1,8	5	10	15	19	24	29	6	11	17	23	28	34	7	14	21	27	34	41	8	16	25	33	41	49
2	5	10	15	19	24	29	6	12	18	23	29	35	7	14	21	27	34	41	8	17	25	33	42	50
2,2	5	10	15	20	25	30	6	12	18	23	29	35	7	14	21	28	35	42	9	17	26	34	43	51
2,4	5	10	15	20	25	30	6	12	18	24	30	36	7	14	22	29	36	43	9	17	26	35	43	52
2,6	5	10	16	21	26	31	6	12	19	25	31	37	7	15	22	29	37	44	9	18	27	35	44	53
2,8	5	10	16	21	26	31	6	12	19	25	31	37	8	15	23	30	38	45	9	18	27	36	45	54
3	5	11	16	21	27	32	6	13	19	25	32	38	8	15	23	31	38	46	9	18	28	37	46	55

Concentración del cloro (mg/L)	pH = 8,0				pH = 8,5				pH <= 9,0									
	Log de inactivación				Log de inactivación				Log de inactivación									
	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0
<=0,4	8	17	25	33	42	50	10	20	30	39	49	59	12	23	35	47	58	70
0,6	9	17	26	34	43	51	11	20	31	41	51	61	12	24	37	49	61	73
0,8	9	18	27	35	44	53	11	21	32	42	53	63	13	25	38	50	63	75
1	9	18	27	36	45	54	11	22	33	43	54	65	13	26	39	52	65	78
1,2	9	18	28	37	46	55	11	22	34	45	56	67	13	27	40	53	67	80
1,4	10	19	29	38	48	57	12	23	35	46	58	69	14	27	41	55	68	82
1,6	10	19	29	39	48	58	12	23	35	47	58	70	14	28	42	56	70	84
1,8	10	20	30	40	50	60	12	24	36	48	60	72	14	29	43	57	72	86
2	10	20	31	41	51	61	12	25	37	49	62	74	15	29	44	59	73	88
2,2	10	21	31	41	52	62	13	25	38	50	63	75	15	30	45	60	75	90
2,4	11	21	32	42	53	63	13	26	39	51	64	77	15	31	46	61	77	92
2,6	11	22	33	43	54	65	13	26	39	52	65	78	16	31	47	63	78	94
2,8	11	22	33	44	55	66	13	27	40	53	67	80	16	32	48	64	80	96
3	11	22	34	45	56	67	14	27	41	54	68	81	16	32	49	65	81	97

NOTA: CT 99,9 = CT para 3-log de inactivación.