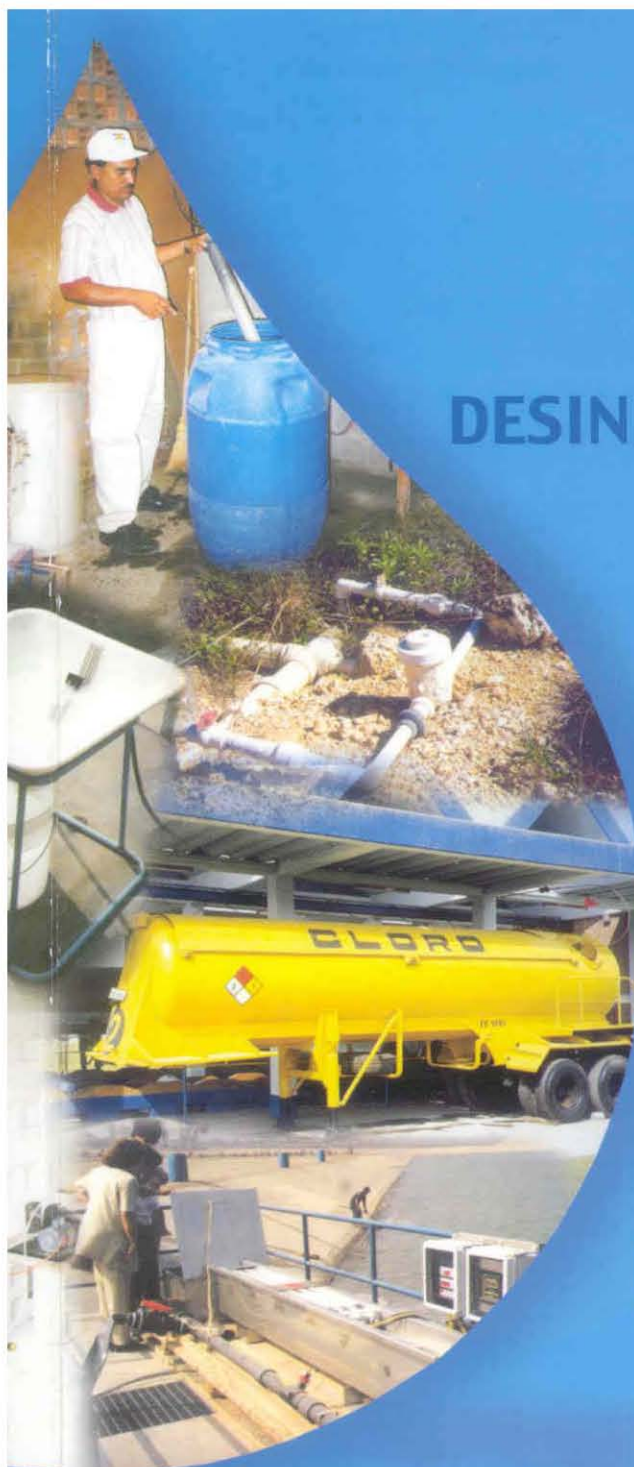


OPS/CEPIS/PUB/02.83
Original: español

DESINFECCIÓN DEL AGUA

Felipe Solsona
Juan Pablo Méndez



Con el auspicio de la Agencia Ambiental de los
Estados Unidos de América –USEPA–



DESINFECCIÓN DEL AGUA

Felipe Solsona

Asesor Regional en Calidad del Agua
CEPIS-OPS/OMS

Juan Pablo Méndez

Consultor



Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente
División de Salud y Ambiente
Organización Panamericana de la Salud
Oficina Sanitaria Panamericana, Oficina Regional de la
Organización Mundial de la Salud

ACERCA DE LOS AUTORES

FELIPE SOLSONA

Argentino, Ingeniero Sanitario y Magíster en Química de la Universidad de Buenos Aires, Argentina. Ha trabajado extensamente en tecnología apropiada y saneamiento básico con énfasis en el tratamiento de agua y el control de su calidad.

Ha vivido 12 años en la Patagonia Argentina, 5 años en el Brasil y 5 en África.

Cuenta con cerca de un centenar de manuales, artículos y documentos escritos.

Actualmente es el Asesor Regional en Calidad de Aguas de la OPS/CEPIS, con sede en Lima, Perú.

JUAN PABLO MÉNDEZ VEGA

Peruano, Ingeniero Sanitario de la Universidad Nacional de Ingeniería, Lima, Perú, con especialización en la Escuela de Administración de Negocios para Graduados (ESAN). Colaborador de la OPS/CEPIS en aspectos de planificación estratégica para poblaciones de bajo riesgo sanitario y ambiental, educación sanitaria y evaluación de proyectos. Cuenta con experiencia en manejo y gestión de residuos sólidos urbanos. Actualmente se desempeña como consultor ligado al sector saneamiento del Gobierno del Perú para aspectos de medio ambiente y planificación estratégica.

Crédito de las fotografías

Las fotografías de este documento son colaboración de:

ALLDOS International AG (Alemania)

ZENON ENVIRONMENTAL INC (Canadá)

TECNOLOGÍA DELTA SA de CV (México)

Felipe Solsona, OPS/CEPIS

Lidia Vargas, OPS/CEPIS

UNATSABAR, OPS/CEPIS

© Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente, 2002

El Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente (OPS/CEPIS) se reserva todos los derechos. El contenido de este documento puede ser reseñado, reproducido o traducido, total o parcialmente, sin autorización previa, a condición de que se especifique la fuente y de que no se use para fines comerciales.

OPS/CEPIS es una agencia especializada de la Organización Panamericana de la Salud (OPS/OMS).

Los Pinos 259, Lima, Perú

Casilla de correo 4337, Lima 100, Perú

Teléfono : (511) 437-1077

Fax : (511) 437-8289

cepis@cepis.ops-oms.org

<http://www.cepis.ops-oms.org>

CONTENIDO

PREFACIO	v	3 = Cloro	31
1 = La desinfección	1	Introducción	33
Introducción	3	Propiedades de los productos del cloro y descripción del método	35
Consideraciones sobre la desinfección	6	Mecanismos de la desinfección con cloro	40
Características del Manual	11	Subproductos de la desinfección con cloro	42
Fuentes de información	13	Equipos	43
2 = Desinfección solar	15	Equipos dosificadores de cloro gaseoso	44
Introducción	17	Cloradores gaseosos de funcionamiento al vacío	44
Propiedades de la desinfección solar y descripción del método	17	Cloradores gaseosos de funcionamiento a presión	45
Mecanismos de la desinfección solar	18	Dosificadores de hipoclorito bajo presión atmosférica	50
Subproductos de la desinfección	20	Sistema de tanque con válvula de flotador	51
Equipos	20	Sistema de tubo con orificio en flotador	52
Calentadores solares	20	Sistema de vaso/botella	54
Cocinas solares	21	Dosificadores de hipoclorito bajo presión positiva o negativa	56
Concentradores solares	23	Sistema de dosificación con bomba de diafragma	57
Destiladores solares	23	Dosificador por succión (tipo Venturi)	61
Proceso combinado de precalentamiento y destilación solares	24	Electrólisis de cloruro de sodio in situ	63
Desinfección en botellas y recipientes pequeños	25	Dosificadores de hipoclorito de calcio sólido	66
Requerimientos de instalación	26		
Operación y mantenimiento	27		
Monitoreo	27		
Ventajas y desventajas de la desinfección solar	28		
Costos de equipos y de operación y mantenimiento	29		
Fuentes de información	29		

Dosificador por erosión de tabletas y de píldoras	67	Ventajas y desventajas de la filtración lenta	106
Ventajas y desventajas de los métodos	69	Costos de equipo y de la operación y mantenimiento	106
Monitoreo de los compuestos de cloro y sus derivados	71	Fuentes de información	107
		6 = Ozono	109
Costos de equipos y de operación y mantenimiento	72	Introducción	111
Fuentes de información	75	Propiedades del ozono como desinfectante y descripción del método	111
4 = Radiación ultravioleta	77		
Introducción	79	Mecanismos de la desinfección con ozono	112
Propiedades de la radiación ultravioleta	80	Subproductos de la desinfección con ozono	113
Mecanismos de la desinfección por radiación ultravioleta	81	Equipos	113
Subproductos de la desinfección con rayos ultravioleta	83	Instalación y requerimientos	119
Equipos	83	Monitoreo	120
Instalación y requerimientos	87	Ventajas y desventajas	122
Operación y mantenimiento	88	Costos	123
Monitoreo	88	Fuentes de información	124
Ventajas y desventajas	89	7 = Dióxido de cloro	125
Costos	90	Introducción	127
Fuentes de información	91	Propiedades del dióxido de cloro como desinfectante y descripción del método	127
5 = Filtración lenta	93		
Introducción	95	Mecanismos de desinfección del dióxido de cloro	129
Propiedades	95	Subproductos de la desinfección con dióxido de cloro	130
Mecanismos	97	Equipos	130
Subproductos de la desinfección	99	Instalación y requerimientos	135
Equipos	100	Operación y mantenimiento	135
Requerimientos para la instalación	102	Monitoreo	135
Operación y mantenimiento	104	Ventajas y desventajas	136
Criterios para el monitoreo y evaluación	105		

Contenido

Costos	136	Desinfección con Dicloro Isocianurato de sodio (NaDCC)	163
Fuentes de información	137		
8 = Minifiltración	139	Desinfección con mezcla de gases oxidantes	166
Introducción	141	Desinfección por radiación	169
Propiedades de la minifiltración		Métodos de desinfección sinérgicos	170
como desinfectante y descripción del método	141	Filtros de nivel familiar	172
Mecanismos de la desinfección con minifiltración	143	Fuentes de información	175
Subproductos de la desinfección con minifiltración	143	10 = Desinfección especial y de emergencia	177
Equipos	143	Pozos excavados	179
Instalación y requerimientos de instalación	148	Tanques nuevos	181
Operación y mantenimiento	150	Cisternas y tanques rodantes	182
Monitoreo	150	Redes y tuberías nuevas	183
Ventajas y desventajas	150	Tanques domiciliarios	183
Costos	151	Desinfección del agua en situaciones de emergencia	187
Fuentes de información	152	11 = Datos comparativos sobre técnicas de desinfección	191
9 = Métodos alternativos de desinfección	153	Introducción	193
Introducción	155	Resumen de las técnicas de desinfección	193
Desinfección con bromo	156	Cuadros comparativos de las técnicas de desinfección	209
Desinfección con plata	158		
Desinfección con yodo	161	Fuentes de información	209

PREFACIO

Desde hace varias décadas, la Organización Mundial de la Salud (OMS) y la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos de América (USEPA) llevan a cabo acciones conjuntas en el área de la salud ambiental. Las *Guías OMS para la calidad del agua de bebida* constituyen uno de los productos de esa tradicional y fructífera relación.

En el ámbito regional, el trabajo mancomunado de la USEPA con la Organización Panamericana de la Salud (OPS), Oficina Regional de la OMS para las Américas, también ha sido fecundo. En América Central, luego del huracán Mitch se han firmado acuerdos para mejorar, implementar y acreditar laboratorios; para evaluar plantas de tratamiento de agua y mejorar las fuentes; y para capacitar en inspecciones sanitarias, protección de fuentes y promoción de planes de mejoramiento de la calidad del agua para consumo humano.

A partir del año 2001, se coordina el proyecto de “Mejoramiento de la calidad del agua en Centro América”, con el apoyo de la USEPA y la ejecución directa del Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente, OPS/CEPIS. El proyecto tiene seis componentes que se están desarrollando en El Salvador, Honduras y Nicaragua: 1) Programas de vigilancia y control de calidad del agua; 2) Estudios epidemiológicos de vinculación de riesgos sanitarios con enfermedades hídricas; 3) Legislación y normas de calidad del agua; 4) Análisis del comportamiento sanitario de escolares en relación con la calidad del agua; 5) Creación de una Biblioteca Electrónica, y 6) Transferencia de tecnologías de desinfección y su implementación en el medio rural.

En el último componente se había previsto la preparación de una herramienta idónea que facilitara la esperada transferencia. Se trataba de producir un manual exhaustivo y con nivel científico, pero también realista y atractivo. Se pretendía un documento que condensara el cúmulo de información disponible en varias obras similares, presentado de forma didáctica, tanto para el ingeniero como para el técnico que buscan datos concretos y sugerencias para implementar, operar y mantener sistemas de desinfección del agua en plantas de tratamiento de poblaciones medianas y pequeñas.

La labor de los ingenieros sanitarios Felipe Solsona, asesor regional en calidad del agua, de la OPS/CEPIS, y Juan Pablo Méndez, consultor ligado al sector del saneamiento en el Perú, ha permitido contar con la obra propuesta, cuyo alcance subregional inicial ha sido ampliado para que pueda ser aplicado en diversas condiciones locales. Con suma satisfacción ponemos a disposición de los expertos y organismos dedicados a la producción del agua potable esta obra que servirá para mejorar la calidad de vida y la salud de las poblaciones rurales de los países en vías de desarrollo.

Ing. Sergio A. Caporali
Director del CEPIS

Capítulo 1

LA DESINFECCIÓN



Introducción

La historia del desarrollo humano está asociada, en gran medida, al estado sanitario de los distintos grupos que han habitado este planeta. En ocasiones, pestes y plagas, muchas veces aleatorias, coyunturales y únicas, han diezmado a países o regiones enteras. Sin embargo, hay enfermedades que parecen ser tan antiguas como el ser humano y su vigencia y protagonismo son parte de la vida cotidiana. Se trata de las enfermedades diarreicas.

El “*Reporte de Salud Mundial*” de la Organización Mundial de la Salud de fin de siglo XX, ubica a las diarreas como la séptima causa de muerte en el mundo después de las enfermedades coronarias, los accidentes cerebro vasculares, las infecciones respiratorias agudas, el HIV/SIDA, las obstrucciones crónicas pulmonares y las condiciones adversas perinatales. Si bien esa colocación evidencia la importancia de las mismas, el dato de séptima causa de mortalidad queda empalidecido cuando la misma Organización Mundial de la Salud reporta que las diarreas son, de lejos, la primera causa de morbilidad en el ser humano, con cuatro mil millones de casos anuales. Se estima que en todo momento, casi la mitad de la población que habita el mundo en desarrollo está soportando un episodio de diarrea.

Infelizmente, esa prolongada presencia en la vida de los seres humanos ha hecho que se pierda de vista la magnitud y el peso que la misma representa sobre la salud y la calidad de vida de los individuos y sobre la economía de la humanidad en su conjunto. Las diarreas tienen como causas, una deficiente nutrición, la inapropiada disposición de excretas, inadecuadas prácticas higiénicas, y una mala calidad del agua de bebida. Las primeras de esas causas podrían englobarse dentro del contexto de pobreza y de pautas culturales inapropiadas que aquejan a tantos, mientras que el último punto, el de la mala calidad del agua de consumo aparece como una responsabilidad de la ingeniería sanitaria y de otras ciencias asociadas.

Tal como ocurre en los países desarrollados, el tratamiento adecuado y la entrega en condiciones favorables de agua segura, representan uno de los caminos más idóneos para reducir en gran medida las tasas expuestas por la OMS. Dentro de este marco, la desinfección del agua de bebida es clave para la solución del problema. No solo representa un mecanismo apropiado para ello, sino que es un elemento vital dentro de lo que en la visión moderna del tratamiento de agua se conoce como “buena práctica” y también dentro del análisis de riesgo y puntos críticos de control o ARPCC (HACCP en inglés). Ambas propuestas de acción significan que cada etapa del tratamiento del agua debe ser evaluada individualmente y que se deben determinar los puntos críticos o de riesgo para poder controlarlos y eliminar o disminuir su peligro inherente. En ese contexto, la desinfección representa la última etapa del tratamiento. Si se habla de “barreras múltiples”, la desinfección es el postrer resguardo que tiene la salud pública en la producción y distribución del agua de bebida. En los países desarrollados, esta etapa del tratamiento siempre se ha tenido como eje de la calidad microbiológica del agua que se entrega y los resultados han sido claros. Las tasas de esos países son inferiores en varios órdenes de magnitud a las de los países en vías de desarrollo. Como ejemplo pueden citarse los valores de mortalidad por enfermedades diarreicas en Europa (3 por mil) y de África (12,4 por ciento).

Esto reconoce dos factores y dos comentarios. El primero es que en los países desarrollados es obvio que la desinfección está incorporada como un proceso ineludible, fijo y establecido. Es una rutina normal que se ejerce con todo el conocimiento y convicción de lo que representa. Como tal, en esos países, la ingeniería sanitaria, la química, la bioquímica y la toxicología evalúan, desde el punto de vista técnico y en profundidad, las mejores capacidades, las mayores eficiencias y los menores costos. Y desde el punto vista sanitario y toxicológico ahondan las

características y las relaciones que tienen los desinfectantes y los productos de la desinfección con la salud.

El segundo comentario es que en los países en desarrollo ocurre lo contrario. Los tratamientos de potabilización, sobretodo en áreas rurales, son imprecisos y la mala operación y el escaso mantenimiento están extendidos. Es así que los procesos de desinfección son pobres y no se respeta el papel que cumplen como protección de la salud pública. En 1995, la Organización Panamericana de la Salud realizó una encuesta en América Latina y comprobó que solo 41% de las aguas entregadas a la población por medio de sistemas de producción y distribución recibían una adecuada desinfección.

Dada esa situación, es claro que lo prioritario para unos difiere de lo que es importante para otros. En los países en desarrollo no son tan significativos la investigación ni el control de los productos de la desinfección, pero sí es importante el conocimiento de tecnologías simples, apropiadas y confiables que sean aceptables por los usuarios; con costos reducidos y operación y mantenimiento sencillos y económicos.

Si bien en el campo de la salud de la población, lo ideal es conseguir la perfección o estar lo más cerca de ella, en los países en desarrollo, el sentido común y los pies asentados en la tierra hacen ver que la búsqueda de tal perfección puede ser una utopía; algo casi imposible de lograr. Por ello, se ha incorporado un término que si bien puede generar críticas, es realista y apunta a la flexibilidad necesaria ante las condiciones técnicas, económicas y socioculturales imperantes. Este término es el de “mejoramiento de la calidad”, que tácitamente acepta que si no se puede lograr lo ideal, lo perfecto; entonces al menos un paso en la dirección correcta será mucho mejor que nada.

Lo perfecto en un país desarrollado está conformado por instalaciones impecables, por operadores capacitados y certificados, por un respaldo técnico asegurado y constante, por administraciones sustentables y por una tecnología elaborada, confiable y de última generación. Sin embargo, en las áreas rurales de los países en desarrollo, donde una pequeña población difícilmente tiene personal técnico idóneo, con posible aislamiento geográfico que deja fuera de contexto a respaldos técnicos imprescindibles, con conocimientos que solo permitirán una administración confusa y en general con escasos recursos; lo perfecto es, como se ha mencionado: utópico. Un paso tímido y no completo, pero de todos modos un “mejoramiento de la situación” será la utilización de prácticas de operación adecuadas al nivel cultural del lugar y el uso de tecnología verdaderamente apropiada.

Frente a un equipo controlado por circuitos impresos, con leds de colores y que trabaja con errores de dosificación a la derecha de la coma; una caja de madera con una válvula de inodoro; una botella con un vaso de plástico dentro, un par de electrodos que generan hipoclorito a partir de sal de mesa; una botella colocada al sol; o un simple filtro de arena, son técnicas que pueden parecer ingenuas o pueden ser percibidas como excesivamente simples. Pero en rigor, ellas y otras que se presentarán en las páginas siguientes, son conspicuos representantes del gran caldero de la tecnología apropiada, que como se ha expresado, es un paso en la dirección correcta. Más aun, no debe confundirse su humildad y poco brillo con inseguridad o inaptitud.

Todos los artilugios que se presentan en este manual tienen denominadores comunes: han sido probados, tienen una larga historia de funcionamiento en diversidad de lugares y situaciones y son lo suficientemente precisos como para llevar a la desinfección (y a la calidad del agua) a un nivel de excelencia aceptable.

La propuesta de este libro no se limita a lo que es apropiado o alternativo. Como es un documento que trata no solo de transferencia sino también de información, se presentan además, las tecnologías que se están usando en otros lugares y que conforman parte del conocimiento tecnológico sobre la desinfección que todo experto debe poseer, aunque todavía no tengan aplicación inmediata en el tercer mundo.

Consideraciones sobre la desinfección

Tal como se ha expresado, la desinfección es un proceso clave en cualquier sistema de tratamiento de agua. Por ello, en la producción de agua segura para consumo humano es importante destacar consideraciones especiales antes de su implementación. En las líneas que siguen se habrán de detallar algunas.

Al diseñar un sistema de tratamiento de agua, en especial en el área rural, debe tomarse a la desinfección no como un elemento más, sino como un componente vital del sistema. En muchos casos, quien diseña un sistema de provisión de agua en una pequeña comunidad no solo toma a la ligera la desinfección, sino que hasta prioriza la producción de agua (cantidad), ante la seguridad de la misma (calidad).

Ya se ha comentado que ninguna opción válida dentro de la tecnología apropiada es desechable ni se puede desestimar. Pero sí es importante que en la selección de esa tecnología se tomen en cuenta condicionantes tales como los recursos disponibles y la posibilidad de soporte técnico en los aspectos sociales, económicos y culturales de la comunidad.

Cuando se está diseñando un sistema de desinfección debe entenderse que el mismo no puede estar disociado ni ser incongruente con la planta o sistema donde estará incluido. Por un lado, una planta de tratamiento de microfiltración con sistemas automatizados, energía eléctrica y personal capacitado para la operación y cuidado de la misma, podrá tener una bomba de diafragma o pistón manejada por un microprocesador. No sería en este caso “congruente” tener un sistema hecho con un flotador y un tubo de plástico agujereado dentro de un tanque de asbesto cemento. Por otro lado, si se trata de un sistema muy simple y rural, en donde ni siquiera se cuenta con energía eléctrica, no tendría sentido pensar en incorporar un generador de dióxido de cloro como sistema de desinfección.

Muchas veces, la falla de estos sistemas se debe a la dependencia de la “importación” de productos químicos de otros países o de otras localidades. Esto puede acarrear demoras y discontinuidad, que frecuentemente pasan de ser temporales a permanentes.

En la etapa de selección de la técnica y el sistema de desinfección se deben tener en cuenta sus características y contrastarlas con las características de la planta, el lugar y la comunidad. Es una buena receta tratar de complementar las mejores condiciones de la técnica y del sistema de desinfección con las de la fuente, lugar, sistema, población y sus características culturales. Esto es importante, pues la realidad indica que no hay lugar, sistema ni comunidad que sean perfectos.

Pero también debe reconocerse que no existe el desinfectante o la técnica que sea igualmente ideal o perfecto. Todas las técnicas que se presentan en este manual y que son las que se han desarrollado y se utilizan en todo el mundo, son excelentes, pero no son perfectas. Todas y cada una de ellas pueden sufrir objeciones: que no aniquilan todos los microorganismos, que no sirven para eliminar quistes o parásitos, que no dejan residual en la red, que dependen de productos químicos que no se producen en la comunidad, que producen subproductos de la

desinfección, que son más o menos complicadas, más o menos caras o más o menos difíciles de operar.

Dentro de esas consideraciones, hay que destacar que en el medio rural el agua no siempre va del grifo a la boca del consumidor. En ocasiones se deja en depósitos (baldes y tanques) y en otras los pobladores deben buscarla y acarrearla desde puntos alejados (grifos públicos y fuentes). Esas prácticas hacen que la contaminación de esas aguas sea frecuente. Surge entonces la necesidad de contar con medidas de seguridad luego de la desinfección para hacer frente a esa contaminación posterior. El residual de desinfectante se convierte entonces en una barrera más (y definitivamente en la ulterior) contra la contaminación que casi seguramente ocurrirá dentro de la morada. El resultado de esta observación es que el desinfectante debe dejar un residual en la red y en caso de que no sea así, se deberán utilizar dos desinfectantes, uno primario para desinfectar y otro secundario para proveer el residual.

Otras consideraciones son importantes. Una buena desinfección no debe reemplazar a otras providencias y acciones que tiendan a mejorar la calidad del agua durante su recorrido desde la fuente al usuario. En ocasiones, una buena selección de la fuente permitirá agua más clara y menos contaminada, lo que facilitará el tratamiento.

Además de tener en cuenta la calidad del agua que llega a la planta de tratamiento, también hay que observar la calidad que presenta el fluido antes de entrar en contacto con el desinfectante. En una planta con tratamiento completo, la etapa anterior a la desinfección es la filtración rápida. El agua proveniente de los filtros debe estar en sus mejores condiciones, ya que una baja turbiedad coadyuvará a una más eficiente desinfección.

Por supuesto que hay que abordar el tratamiento de agua como un todo, pero también es necesario considerarlo como una sumatoria de etapas en las que cada una debe ser evaluada, operada y supervisada en forma individual. Esta forma operativa se postula en el método de ARPCC que se ha mencionado.

Operativamente también, muchas veces el proyectista pasa por alto algunos requerimientos que son fundamentales para asegurar una buena desinfección. Para que cualquier desinfectante actúe eficientemente, deberá cumplir los requerimientos de la ecuación $C \times T$, lo que significa que todo desinfectante presentará una determinada concentración (C) y estará en contacto con el agua a desinfectar por un período mínimo de tiempo (T). Un error común es proyectar cámaras que no permiten el tiempo de contacto suficiente, desestimando la simple ecuación que liga el volumen de agua con el caudal y el tiempo requerido por el desinfectante:

$$V = Q \times T$$

Dentro del marco operativo, es importante recalcar la necesidad de que cualquiera que sea el desinfectante o método empleado, debe haber una buena mezcla y dispersión por toda la masa de agua.

Una vez que el sistema se haya instalado y esté en operación, hay que tener en cuenta que en las áreas rurales de la mayoría de los países en desarrollo, casi nunca hay recursos en cantidad y calidad. Por ello, el error más frecuente de los ingenieros o instituciones encargadas de construir el sistema, es inaugurar el mismo y dejar un equipo de desinfección en operación, habiendo capacitado por espacio de una o dos horas al operador y partir para regresar seis meses más tarde y encontrar que la desinfección ya no funciona.

El equipo de desinfección está ligado, como ninguna otra parte del sistema, a la junta de agua, al operador y hasta a los mismos usuarios. Por ello es que se debe encarar una doble actividad, primero de concientización a todo el espectro social (operador, junta de agua o administradora y a los usuarios) acerca de la necesidad de desinfectar, de sus bondades y de los riesgos de una desinfección inadecuada.

En ese contexto, hay que tomar en serio y ser cuidadosos con las implicancias de la desinfección. Los desinfectantes que se agregan al agua, especialmente el popular cloro, producen sabores y olores que pueden generar el rechazo de la comunidad. Esto no puede dejarse de lado ni tomarse como algo de menor importancia. Son innumerables las experiencias en casi todo el mundo en desarrollo donde la comunidad rechaza la desinfección debido a las propiedades organolépticas desagradables y hasta exige que se suprima la medida. Es importante que los responsables de la instalación de un sistema de agua potable y de la implementación de la desinfección, comuniquen, informen y discutan estos aspectos con la comunidad una y otra vez hasta tener la seguridad de que se ha “concientizado a la población” y que no habrá rechazo a la desinfección a pesar de los inconvenientes. Los usuarios tienen que haber entendido que existe una clara relación entre el agua y la salud (o entre el agua y la enfermedad) y que la desinfección, aún con sus ligeros inconvenientes, es la barrera imprescindible para detener el riesgo de la enfermedad.

Ligado a estos inconvenientes, es el momento de hacer mención al problema de los subproductos de la desinfección (o productos de la desinfección o SPD, como se los conoce en la jerga técnica o por su sigla en inglés DBP: disinfection by-product). Casi todos los desinfectantes producen SPD. El cloro da lugar, entre otros, a una larga lista donde los más visibles son los trihalometanos (THM), los haloacetatos, acetonitrilos halogenados y clorofenoles; el dióxido de cloro produce más de cuarenta SPD, entre los que se cuentan los cloratos, cloritos y los clorofenoles. El ozono a su vez produce aldehídos, ácidos carboxílicos, bromatos, bromoetanos, acetonitrilos bromados y cetonas. El problema de estos SPD es que muchos de ellos son cancerígenos.

En ocasiones, este hecho real y concreto (del potencial carcinogénico) ha causado, por un lado, desinterés de los ingenieros o responsables por implementar la desinfección (“es mejor ser cautos y no desinfectar demasiado, ya que la desinfección produce cáncer”) y, por otro lado, una mala información a la población que ha generado un justificado rechazo (“¿Cómo voy a beber agua que me va a producir cáncer?”). Por ello, es fundamental que todo aquél que esté trabajando en esta línea del tratamiento de agua tenga absolutamente claro qué significa “el riesgo de la desinfección” y “el riesgo de la no desinfección”.

El riesgo de enfermar por cáncer está asociado a una ingesta durante muy largos períodos (a veces toda una vida) de un agua desinfectada y es un riesgo potencialmente bajo. El riesgo de enfermar o morir por otras enfermedades debido a microbios que están presentes en el agua que no está desinfectada es, en cambio, mucho más alto.

En el caso del cloro, se estima que el riesgo de morir (mortalidad) por cáncer debido a la ingesta de agua desinfectada frente al riesgo de morir por alguna enfermedad de transmisión hídrica (diarrea, hepatitis infecciosa, fiebre tifoidea, cólera, etc.) es de 1 en 1.000. Dicho de otro modo, tomar agua sin desinfectar implica que una persona corre un riesgo 1.000 veces mayor de morir por una enfermedad diarreica, que morir por un cáncer asociado a la ingesta de aguas: ella está clorada.

Pero si esos datos de mortalidad son impresionantes, mucho más son los relacionados con la posibilidad de enfermar (morbilidad), ya que el riesgo de enfermar de diarrea es 1.000.000 de veces mayor que el riesgo de enfermar de cáncer. Queda como corolario irrefutable, que los riesgos de enfermar o morir son mucho más altos si no se clora el agua. Esta realidad estadística ha llevado a la Organización Mundial de la Salud (OMS) y a la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos de América (USEPA) a expresar que “bajo ningún concepto debe comprometerse la desinfección del agua de consumo”.

La segunda actividad que se debe encarar es la de capacitar en detalle al operador, a los operadores sustitutos y a los miembros de la junta de agua en los requisitos, en las formas operativas de la desinfección en general y en aquellos relacionados con el equipo o sistema específico que se está utilizando en la comunidad. La capacitación debe tener como resultado gente que actúe casi en forma automática en cuestiones de desinfección. Ello conlleva también la preparación de instrucciones que sean claras, comprensibles, aceptables y aceptadas por la junta y los operadores. Es obvio decir que el respaldo técnico es vital. Las rondas de supervisión, refuerzo y apoyo por parte de personal capacitado que frecuentemente visite la comunidad son condición sine qua non para que la desinfección no se detenga o discontinúe.

Entre 1982 y 1995, la OPS/OMS realizó una serie de evaluaciones en la Región de América Latina y el Caribe para determinar las mayores causas de falla en los sistemas de desinfección. La encuesta reveló las siguientes causas:

1 Motivación insuficiente y falta de compromiso político en la comunidad para respaldar en forma continua una efectiva desinfección.

- | Falta de conocimiento e información sobre los riesgos de una desinfección ineficiente y sobre la importancia de la relación entre el agua y la salud.
- | Baja prioridad en financiar y apoyar económicamente la desinfección.
- | Poca disponibilidad de desinfectantes en el mercado local. En ocasiones, esto se debía a falta de financiamiento, pobre planificación y falta de infraestructura.
- | Falta de repuestos para los equipos.
- | Personal sin capacidad para hacer una correcta operación, mantenimiento y reparaciones.
- | Falta de programas de capacitación para operadores y miembros de las juntas administradoras o juntas de agua.
- | Sistemas de desinfección mal proyectados y mal contruidos.
- | Equipos de mala calidad.
- | Selección inadecuada de la tecnología más apropiada para el lugar.
- | Falta de supervisión y monitoreo.
- | Quejas de los usuarios por el sabor y olor desagradables.
- | Excesivo y generalizado temor a los SPD.
- | Requerimientos demasiado complejos y exigentes para la operación y el mantenimiento.
- | Fallas en la provisión de electricidad.
- | Deficiente tratamiento del agua previo a la desinfección (el agua presentaba condiciones adversas a la etapa de desinfección).
- | Operación intermitente del sistema de distribución del agua.

La identificación de estas causas y su solución son importantes para implementar un sistema de desinfección exitoso.

Características del Manual

Este manual está estructurado en forma simple. Se han tomado las tecnologías más visibles y cada una de ellas representa un capítulo de la obra.

Así, se presentan en sucesión los métodos y tecnologías de

- | desinfección solar
- | cloración
- | radiación ultravioleta
- | filtración lenta
- | ozono
- | dióxido de cloro
- | minifiltración
- | métodos alternativos, y
- | desinfecciones especiales y de emergencia.

Al recorrer sus páginas, tal vez parezca un tanto desproporcionado el peso que se le ha dado a la cloración. Lo que ocurre es que por su importancia, los numerosos equipos y las formas que se han desarrollado, ha sido necesario incluir las técnicas de cloración más difundidas e interesantes, que no son pocas. Quiérase o no, y a pesar de las críticas e inconvenientes que presentan, el cloro y sus derivados han sido honorables responsables de una verdadera revolución sanitaria. Se estima que buena parte de la prolongación, en cincuenta años, del promedio de vida que en el siglo XX ha disfrutado Occidente, se debe a la introducción del cloro como desinfectante del agua. Una encuesta realizada en los Estados Unidos muestra la siguiente distribución de uso para las distintas tecnologías en los Estados Unidos.

Porcentaje de Sistemas de tratamiento de agua que utilizan diferentes técnicas de desinfección en servicios municipales de USA (1998)

Proceso de desinfección	% de sistemas mayores de 10.000 hab.	% de sistemas menores de 10.000 hab.
Cloro gas	87	70
Hipoclorito de sodio	7	17
Generación in-situ de hipoclorito de sodio	0	2
Hipoclorito de calcio (en polvo)	1	9
Dióxido de cloro	3	2
Ozono	1	0
Radiación ultravioleta	1	0

En los países en desarrollo, esta relación está más volcada aún al cloro y sus derivados y ello justifica el mencionado énfasis a la técnica en cuestión. Para cada uno de los métodos presentados se ha preparado una descripción que abarca:

- | propiedades del desinfectante y descripción del método
- | mecanismo de desinfección
- | subproductos de la desinfección
- | equipos
- | instalación y requerimientos de instalación
- | operación y mantenimiento

- | monitoreo
- | ventajas y desventajas del método
- | costos de equipos, de operación y mantenimiento (los costos estarán expresados en dólares de los Estados Unidos de América, año 2002)
- | fuentes de información.

Finalmente, se ha preparado una sección sobre comparación entre los distintos métodos, aspectos de costos, facilidad de operación, adecuación a diversas situaciones, etc., y una postrer sección de desinfección de tuberías, tanques y desinfección de emergencia.

Fuentes de información

Galal-Gorchev, H. *Guías de la OMS para la calidad del agua potable y evaluación de los riesgos para la salud vinculados con los desinfectantes y los SPD*. Trabajo presentado en la Publicación OPS/ILSI “La calidad del Agua potable en América Latina” (1996).

OPS. *Health conditions in the Americas*. Scientific Publication No. 549. Vol I: 162-167. Pan American Health Organization, Washington DC (1994).

Regli, S., Berger, P., Haas, C. *Proposed decision tree for management of risks in drinking water: consideration for health and socioeconomic factors*. Trabajo en la publicación ILSI: “Safety of water disinfection: balancing chemical and microbial risks”. Washington, DC (1993).

OMS. *The World health report 2000*. Publicación OMS (2000).

Capítulo 2

DESINFECCIÓN SOLAR



Introducción

Uno de los métodos de desinfección más simples y menos costosos para suministrar agua de calidad aceptable para el consumo humano es la radiación solar, que algunos técnicos han dado en llamar SODIS (del inglés “solar disinfection”). Este método es ideal cuando las condiciones económicas y socioculturales de la comunidad ponen en riesgo la sostenibilidad de otras alternativas de tratamiento y desinfección, como la filtración o el uso de cloro, aún cuando éstas también sean reconocidas como simples y económicas.

En este capítulo se analizan algunas alternativas de bajo costo para la desinfección del agua mediante energía solar, principalmente aquellas factibles en comunidades rurales. Según el mecanismo de desinfección, estas alternativas pueden ser clasificadas en procesos en tanda (“batch”) y continuos.

Es necesario aclarar que la técnica es más adecuada para el tratamiento del agua en el ámbito familiar o para grupos de viviendas, antes que para sistemas convencionales o más complejos. Obviamente, solo es viable en aquellos lugares donde exista conveniente radiación solar.

Propiedades de la desinfección solar y descripción del método

El proceso de desinfección solar es un proceso térmico que consiste en elevar la temperatura del agua por un espacio suficiente de tiempo en contenedores acondicionados para lograr la absorción del calor proveniente de la radiación solar. Estos contenedores pueden ser de diversos materiales conductores del calor; en todos los casos se busca que sean de color negro porque absorben mejor el calor en oposición a los colores claros, que por sus propiedades reflectoras acopian menos calor. El color oscuro permite un aumento acelerado de la temperatura del agua y la conservación del calor por más tiempo.

A pesar de lo interesante del método y de sus escasos requerimientos, la SODIS no ha alcanzado popularidad extendida. La razón es que hay demasiadas variables que condicionan su eficiencia y la eventual seguridad del agua tratada. La latitud y la altitud geográfica, la estación, el número de horas de exposición, la hora, las nubes, la temperatura; el tipo, el volumen y el material de los envases que contienen el agua; la turbiedad de agua y el color; son, entre otros, los parámetros que podrían interferir en una desinfección perfecta.

La Organización Mundial de la Salud considera a la SODIS una opción válida, pero solo como un “método menor y experimental”. Aun así, en áreas donde no hay otro medio disponible para desinfectar el agua, puede mejorar sustancialmente la calidad bacteriológica de la misma y representa un ejemplo más de lo que se expresó en el primer capítulo: que en ocasiones, si no se puede lograr la perfección, un paso hacia el “mejoramiento” es mejor que nada. Debe hacerse notar que en las comunidades en las que se ha promocionado este método de desinfección, se han obtenido mejores resultados cuando la medida fue promovida y vigilada por funcionarios de salud o por personal capacitado y dedicado (por ejemplo, voluntarios de alguna ONG ubicada en la comunidad).

La tecnología de la SODIS usa equipos como el calentador solar (de producción continua) y los sistemas en tanda, entre los que figuran la cocina solar, el concentrador solar y una gama de destiladores, los que más adelante serán descritos en detalle. También se hará referencia a la propuesta suiza de la desinfección en botellas y recipientes de menor volumen.

Todos esos equipos son sencillos, económicos y fáciles de operar. La aceptación que han tenido en varias regiones del mundo ha confirmado que representan una solución atractiva y apropiada.

Mecanismos de la desinfección solar

Existe un par de trabajos que postulan que buena parte del poder de desinfección de la SODIS se debe a la acción fotoquímica. Tal como se verá en un capítulo posterior, la radiación ultravioleta tiene el poder de aniquilar microorganismos y por ello se ha argumentado que la porción ultravioleta que acompaña a la porción visible cuando se expone agua a la luz del sol sería la responsable de la acción bactericida. Pero lo cierto es que la porción realmente bactericida del componente ultravioleta, que corresponde al rango del UV-C (100-280 nm), es la que menos está presente en la radiación solar y aun suponiendo que fuera suficiente para tener algún poder de desinfección, se ha comprobado científicamente que la mayoría de los materiales, incluso los transparentes a la luz solar, como el vidrio y el plástico, son casi totalmente opacos a la radiación ultravioleta. Esta es la razón por la cual, tal como se verá en el capítulo correspondiente, los tubos ultravioletas que se utilizan para la desinfección están encerrados en camisas protectoras de cuarzo, único material que es verdaderamente transparente a ese tipo de radiación (el teflón, que se utiliza en algunos equipos es el único plástico parcialmente transparente). El resultado de este simple análisis es que si se expone agua a una radiación escasa y además se interpone un filtro prácticamente opaco a la misma, entonces la capacidad desinfectante de esa radiación es necesariamente nula o, en el mejor de los casos, despreciable. Decididamente, la SODIS no opera bajo el pretendido mecanismo de la fotoquímica. El funcionamiento de la SODIS se basa en la pasteurización, que es un proceso térmico.

Las altas temperaturas tienen un marcado efecto sobre todos los microorganismos; las células vegetativas mueren debido a la desnaturalización de las proteínas y la hidrólisis de otros componentes. En el agua, si bien hay algunas bacterias con capacidad de esporular, lo que las hace particularmente resistentes al calor, en general puede afirmarse que la mayoría de las bacterias mueren entre los 40 y los 100° C, mientras que las algas, protozoarios y hongos lo hacen entre los 40 y los 60° C.

La desinfección por ebullición consiste en elevar la temperatura del agua a 100° C y mantener esa condición por espacio de uno a cinco minutos. El resultado es la eliminación de la mayoría, sino de todos, los microorganismos presentes. En contraposición, la pasteurización se define como la exposición de una sustancia (normalmente alimenticia, incluida el agua), “durante el tiempo suficiente a una considerable temperatura para destruir los microorganismos que puedan producir enfermedad o dañar las condiciones del alimento”. Si bien la susceptibilidad al calor se encuentra condicionada por factores como la turbiedad del agua, la concentración de células, estado fisiológico y otros parámetros, el proceso de pasteurización destruye coliformes y otras bacterias no termotolerantes y esto es afortunado, ya que la mayor parte de los patógenos se encuentran en este grupo.

Para el caso del agua se ha tratado de determinar la relación óptima entre el tiempo y la temperatura para destruir los gérmenes patógenos. Si bien esto no es exacto, se ha tomado como regla que para un agua clara (con turbiedad menor de 5 UTN) se puede asegurar un razonable nivel de seguridad en la desinfección con cualquiera de las siguientes relaciones:

65 °C durante 30 minutos o 75 °C durante 15 minutos.

Desde un punto de vista eminentemente práctico y operativo estas condiciones se aseguran en zonas soleadas con exposiciones de cuatro a cinco horas en el período de máxima radiación (desde las 11:00 a las 16:00 horas).

Subproductos de la desinfección

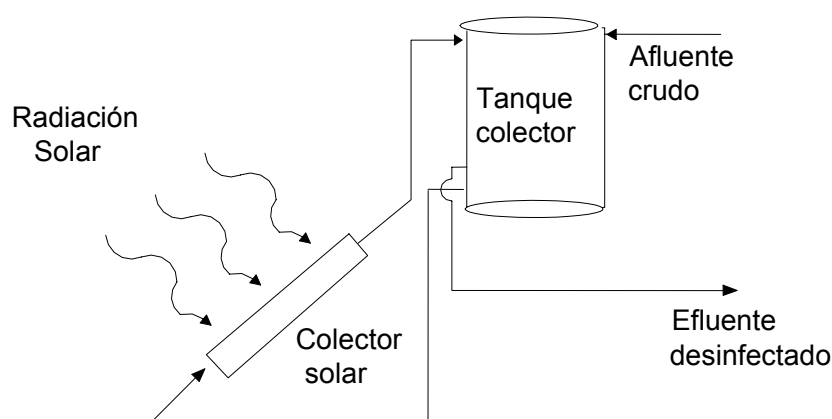
El conocimiento actual de la SODIS y los estudios que se han realizado hasta el presente no reportan la presencia de SPD.

Equipos

Se han desarrollado varios equipos que se diferencian en cuanto a volumen de producción de agua y costo.

Calentadores solares

El calentador solar comercial que se utiliza para desinfectar agua no difiere de los calentadores que se ven en muchos techos de viviendas y que se usan para calentar agua para la cocina o la ducha. Está compuesto por un colector que es una caja con marco de aluminio y cubierta de vidrio. El colector contiene tubos de cobre, pintados de negro, soldados a dos tubos cabezales y que almacenan el agua en proceso de calentamiento. Este colector está conectado, por medio de tubos del mismo material, a un tanque-termo de plástico y fibra de vidrio, aislado con espuma de poliuretano para almacenamiento del efluente tratado. Algunos de estos tanques están divididos para permitir el intercambio de calor entre el agua fría que entra y el agua caliente que sale.



Esquema de un termosifón para calentamiento de agua



El principio de funcionamiento de estos sistemas es conocido como circuito convectivo o calentador solar pasivo, donde el calor de la radiación solar es absorbido por los tubos negros, lo que incrementa la temperatura del agua dentro del colector y produce una consecuente disminución de la densidad de ésta. En estas condiciones, la columna de agua fría en la tubería de retorno al colector ya no queda equilibrada por la columna de agua caliente menos densa, por lo que la gravedad origina que la primera baje y desplace a la última hacia el tanque que está más arriba. Esta circulación natural, conocida como “termosifón”, continúa mientras exista suficiente calor para aumentar la temperatura del agua y la fuerza de empuje resultante pueda vencer la caída de presión en el sistema. Cuando un calentador solar se utiliza con fines de desinfección, la eficiencia depende directamente de la temperatura que alcance para llevar a cabo el proceso de pasteurización. Dado que el agua alcanza su máxima temperatura entre las 14:30 y las 15:30 horas, se recomienda evitar, en lo posible, drenar el tanque antes de esa hora para aumentar así el tiempo de residencia del agua en el equipo.

Calentador solar

Los equipos convencionales familiares pueden producir unos 15 litros y los equipos mayores hasta 1 m³ de agua después de tres a cuatro horas de operación al mediodía. Existen en el mercado calentadores solares más sofisticados con colectores de doble cubierta de vidrio y tubos aleteados de cobre con superficies selectivas para captar mayor cantidad de energía solar y convertirla en calor útil. Algunos llegan a alcanzar temperaturas del agua de más de 90 °C e incluso la vaporizan. No obstante, es necesario evaluar si las condiciones climatológicas del lugar justifican la inversión, de otra manera pueden utilizarse equipos menos eficientes pero también menos costosos.

Cocinas solares

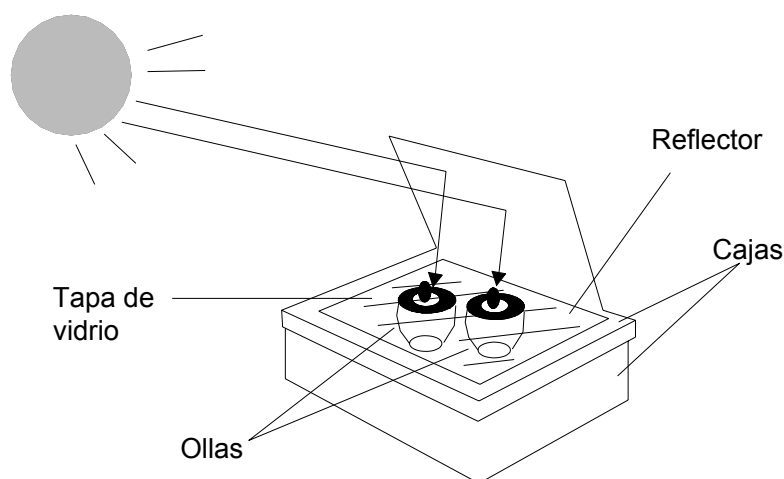
En muchos países en desarrollo, especialmente donde la deforestación es un grave problema, los hornos y concentradores solares son la única opción que tiene la población para cocinar sus alimentos. La desinfección del agua por pasteurización es otra posibilidad que se deriva del uso de “estufas solares”.

Una cocina solar se compone de un par de cajas que pueden ser de cartón o madera, una dentro de la otra, que sirven para atrapar el calor del sol y utilizarlo, en este caso, para calentar el agua. El principio consiste en aprovechar el calor que llega del sol por radiación y atraparlo en el interior de la caja pequeña; se evita que salga por medio de una cubierta transparente, que generalmente es de vidrio. Este calor es transferido por conducción a través de las ollas de metal hacia el agua contenida. Es conveniente utilizar un reflector que ayude a dirigir más los rayos solares hacia dentro de la caja para mantener el calor. El uso de reflectores disminuye aproximadamente 35% del tiempo del proceso.



Cocina solar

El espacio libre que queda entre las dos cajas se rellena con un material aislante que puede ser bolas de papel periódico, hule espuma, etc. La parte interior de la caja pequeña se recubre con un material reflectivo como papel aluminio. En el fondo de esta caja se coloca una laminilla de color negro. También es conveniente que las ollas se pinten de negro o se ahúmen para que absorban más calor. De preferencia deben utilizarse ollas metálicas. Las ollas de barro no son recomendables porque este material es aislante. Tampoco es conveniente usar materiales plásticos porque pueden derretirse con las temperaturas altas.



Esquema de una cocina solar

Concentradores solares

Los concentradores solares son un tipo de calentador solar. Se parecen a una antena parabólica espejada o más bien a un paraguas abierto con su interior espejado. Al igual que una lente cóncava que recibe los rayos de luz y los concentra en un punto (el foco), estas cocinas concentran los rayos del sol en un punto en donde se coloca una pequeña plataforma para asentar allí la olla o recipiente que se quiere calentar. El diámetro típico de estos concentradores es igual o mayor que 0,80 m y pueden estar hechos de cartón recubierto de papel de aluminio o de otros materiales.



Concentrador solar

No existen muchos modelos comerciales, pero hay libros y folletos que incluyen los planos para fabricarlos. A diferencia de las cocinas descritas anteriormente, la concentración de los rayos en

este tipo de cocinas genera temperaturas que pueden llegar a 350° C, lo que permite el rápido calentamiento del agua. Ello puede producir la desinfección por pasteurizado o por ebullición directa.

Destiladores solares

Otro equipo que aplica la energía térmica es el destilador solar, el cual puede manejarse con tecnología simple o sofisticada. Estos equipos se utilizan para la producción de agua potable a partir de agua de mar o de agua dulce con algún problema de contaminación y también sirven como sistemas de desinfección del agua.

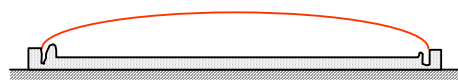
El principio de operación mediante energía solar es el mismo que utiliza la naturaleza en el ciclo hidrológico: se evapora el agua del embalse que tiene presencia de sales y se condensa en otra parte (nubes y luego lluvia), donde se obtiene agua purificada.

El destilador solar requiere un elemento que transforme la energía solar en un incremento de la temperatura del agua para poder evaporarla. La radiación visible e infrarroja es absorbida por cualquier superficie de color oscuro, de preferencia negro mate. El acabado mate se usa para lograr una mejor absorción y evitar pérdidas de una fracción de luz por reflexión. En los destiladores solares más simples, el colector solar consiste en una charola horizontal, de color negro, que contiene el agua que se quiere destilar, a la que se le denomina “destilando”. Para evitar las pérdidas indeseables de calor, es necesario que la charola esté aislada térmicamente por la parte inferior. El calentamiento del destilando produce evaporación y las sales minerales quedan retenidas en la charola. Para facilitar la evaporación, conviene que el evaporador tenga un área grande comparada con el volumen de destilando que puede contener. El agua así evaporada, se recolecta mediante una cubierta de vidrio o algún otro material colocado sobre el evaporador a una distancia e inclinación adecuadas.

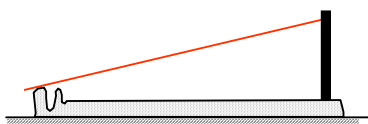
Existen varios diseños de condensadores. El más simple consiste en una caseta de vidrio a dos aguas, con una inclinación de alrededor de 20° con respecto a la horizontal, lo cual permite que las gotas de agua condensada escurran hacia abajo en donde se colectan en pequeños canales.



a) Cubierta de vidrio



c) Cubierta de plástico inflada



b) Cubierta de vidrio con reflector

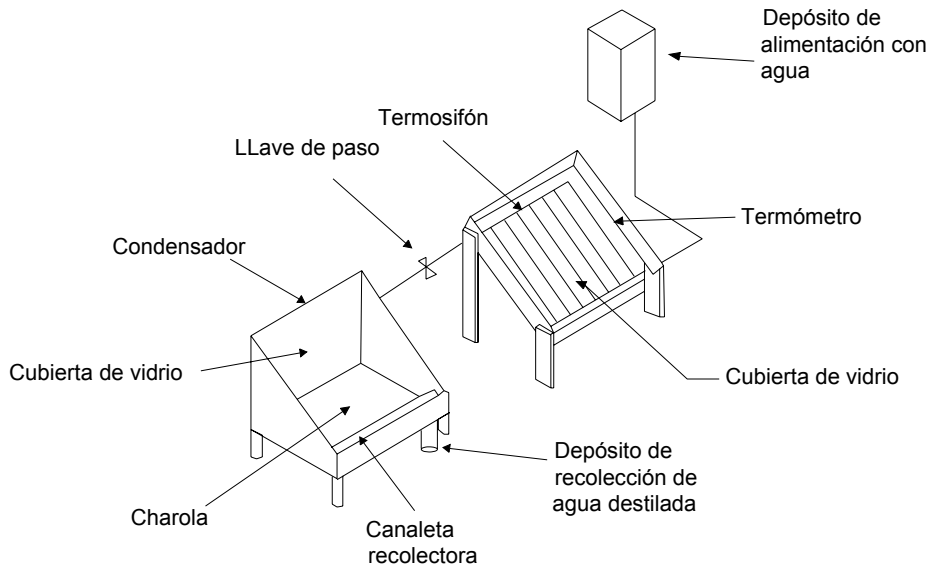


d) Cubierta de plástico en forma de V

Diagramas esquemáticos de diseños de destiladores solares simples

Proceso combinado de precalentamiento y destilación solares

Un dispositivo propuesto por la Secretaría de Salud en México, está formado por un depósito de alimentación de agua, un termosifón y un condensador y resulta útil en lugares templados donde la temperatura no es suficiente para llevar a cabo el proceso de condensación, entonces el termosifón calienta el agua antes de que pase al condensador.



Dispositivo combinado de termosifón y destilador solares.

Desinfección en botellas y recipientes pequeños

Para el ámbito familiar, donde se desinfectan pequeños volúmenes de agua, el Instituto Federal Suizo para la Ciencia y Tecnología Ambiental (EAWAG), a través de su Departamento de Agua y Saneamiento en Países en Desarrollo (SANDEC), ha promocionado el uso de botellas y recipientes especiales pintados de negro. Esta modalidad ha tenido amplia aceptación en los lugares donde se ha implementado, aunque es necesario aclarar que siempre se ha debido disponer de programas de información, de concientización de los usuarios y de monitoreo y seguimiento.

La técnica consiste en exponer el agua a desinfectar en botellas de plástico, como las que se usan para las bebidas gaseosas las que pueden estar o no, pintadas de negro. La pintura puede ser total o solo en la parte inferior de las mismas. Los suizos han realizado pruebas con una serie de recipientes, desde bolsas plástico hasta bidones de boca estrecha (para evitar que las manos entren en contacto con el agua desinfectada) y si bien han obtenido excelentes resultados desde un punto de vista práctico y económico, las populares botellas de bebidas gaseosas tienen un atractivo



Botella de gaseosa con monitor de temperatura

especial por su difundida disponibilidad. Los requerimientos en cuanto al tiempo y temperaturas de exposición son exactamente iguales que para cualquiera de las otras técnicas. En algunos casos puede adicionarse un termómetro para medir la temperatura alcanzada (ver monitoreo).

Requerimientos de instalación

<i>Equipo</i>	<i>Instalación y requerimientos de instalación</i>
Calentadores solares	Los calentadores solares son relativamente fáciles de instalar o adaptar a cualquier instalación. Únicamente se requiere que el tanque colector del agua caliente se eleve aproximadamente 60 cm por arriba del punto más alto del colector. No requiere de una presión determinada para su funcionamiento, ya que es suficiente que el tanque de alimentación de agua se coloque junto al colector, el que debe ubicarse con una inclinación aproximada a la de la latitud del lugar (por ejemplo entre los 15° y los 35°) y orientado hacia el sol.
Cocinas y concentradores solares	Estos equipos no requieren cuidados mayores en la instalación, ya que puede hacerse en cualquier parte. Es conveniente que antes de adoptar este método se realicen algunas pruebas, tomando la temperatura del agua después de cuatro o cinco horas (en el caso de las cocinas). Si el promedio de temperatura es en todos los casos mayor de 60° C, el agua podrá consumirse. Los concen-tradores, si están bien contruidos, deberían desinfectar por ebullición más que por pasteurización.
Destiladores solares	No hay requerimientos especiales para estos destiladores solares, que son simples y sin partes móviles. Debe evitarse que haya animales cercanos o que éstos tengan acceso a los equipos.
Botellas y recipientes	En cuanto a la turbiedad, la aplicación de la SODIS requiere agua limpia con muy baja turbiedad. De no ser así, deberá filtrarse previamente pasando el agua por un filtro casero de arena o una tela muy fina. Las botellas se pueden colocar sobre alguna superficie reflectiva, como papel de aluminio. No se recomienda el uso de botellas de gaseosa coloreadas.

Operación y mantenimiento

<i>Equipo</i>	<i>Operación y mantenimiento</i>
Calentadores solares	La operación es simple, solo debe abrirse la llave de paso durante el día y cerrarse durante la noche. El mantenimiento se limita a mantener la cubierta del colector libre de toda suciedad, ya que la misma reduce la cantidad de radiación que llega al colector. La frecuencia de limpieza dependerá del grado de contaminación atmosférica. No se recomiendan las cubiertas de acrílico, pues se deforman y rayan fácilmente.
Estufas solares	La operación de este equipo consiste en colocar la olla o cacerola en el interior de la estufa solar y dirigir los rayos solares al interior de la caja mediante el reflector. Su mantenimiento resulta muy sencillo, ya que únicamente consiste en mantener limpio el interior, el vidrio y los reflectores. Para mantener limpia el agua es conveniente dejarla en el mismo

	recipiente cubierto con su tapa, hasta que se vaya a usar.
Destilador solar	La operación de este sistema consiste en alimentar al destilador con el agua a ser tratada. Esto puede hacerse de manera continua o discreta. La forma de operación discreta o por tandas es práctica para un sistema rural familiar. De otro modo, puede emplearse el sistema combinado con precalentamiento de un calentador solar. El destilador común de caseta produce en días soleados entre tres a cinco litros diarios por cada metro cuadrado. Esto equivale a una disminución en la profundidad del destilando de 0,3 a 0,5 cm/día, lo que implica que la alimentación puede ser una vez al día. El agua deberá consumirse o desecharse dentro de las 24 horas siguientes.
Botellas y recipientes	Para purificar el agua contenida, el envase plástico deberá estar bien limpio. En este caso como en todos los anteriores, el agua desinfectada debe mantenerse en el mismo envase o en otro envase con tapa, en un lugar fresco.

Monitoreo

Se ha demostrado que en 99% de los casos, la remoción de coliformes es total para temperaturas del efluente mayores de 55° C. Sin embargo, por razones de seguridad, ya se ha expresado que la regla de oro es trabajar con un margen de seguridad y establecer los 65° C como la temperatura mínima de desinfección. Por tal motivo, el monitoreo de estos sistemas debe confirmar que la temperatura del agua a la salida de cualquier sistema o luego del período de tratamiento haya alcanzado 65° C.

Considerando que los calentadores solares no fueron diseñados para desinfectar el agua, sino simplemente para calentarla, no hay forma de conocer si la temperatura alcanzó el punto de pasteurización, por lo que resultaría conveniente instalar un termostato acoplado a una válvula que únicamente permita el paso del agua a una temperatura mayor de 65° C. En las cocinas o botellas puede acoplarse un termómetro a la tapa y en otros, se pueden colocar dentro de la botella pequeñas ampollas con una sustancia que se derrita a una temperatura mayor de 65° C, lo que aseguraría que se ha alcanzado la temperatura de pasteurización requerida.

Ventajas y desventajas de la desinfección solar

<i>Equipo</i>	<i>Ventajas</i>	<i>Desventajas</i>
Calentadores solares	No depende de energía convencional, cuyo costo se incrementa con la creciente demanda. Evitan el uso de sustancias químicas tóxicas. Requieren equipo relativamente sencillo y de bajo costo, que se recupera rápidamente y proporciona agua potable durante muchos años. Su uso no deteriora el ambiente.	No pueden utilizarse en días nublados o lluviosos. No proporciona protección residual.
Cocinas solares	No consumen leña, por lo que ayudarían a evitar la deforestación y la erosión en las zonas rurales. Se ha calculado que para llevar a punto de ebullición un litro de agua, se necesita aproximadamente un kilo de leña. Tampoco consumen combustibles fósiles. Esto es especialmente útil en el medio rural, donde el suministro de gas resulta problemático. No emiten humo como los fogones abiertos que causan enfermedades respiratorias.	Son dos veces más lentas que una estufa convencional. No pueden utilizarse en días nublados o lluviosos. No proporcionan protección residual.

	No son costosas y son fáciles de construir.	
Botellas y recipientes	Sumamente sencillos y económicos. Fácilmente aceptables por las comunidades.	No proporcionan protección residual. Requieren agua limpia. No pueden usarse para tratar grandes volúmenes de agua.

Costos de equipos, de operación y mantenimiento

<i>Equipo</i>	<i>Costos Totales</i>
Calentadores solares	El precio de los equipos comerciales oscila entre US\$ 250 a US\$ 500.
Concentradores solares	No existen en el mercado. Hay que hacerlos con un costo entre US\$ 100 y US\$ 200
Cocinas solares	No existen en todos los países. Hay que hacerlos localmente. Su costo varía según el material que se utilice. Normalmente ronda entre US\$ 25 y US\$ 80, dependiendo del acceso a los materiales locales.
Destilador solar	Se aplican las consideraciones de los casos anteriores. El costo oscila entre US\$ 75 y US\$ 250, dependiendo de los materiales locales disponibles y del tamaño del equipo.
Botellas	No significan costo alguno.

Fuentes de información

Almanza Salgado, R.; Muñoz Gutiérrez, F. *Ingeniería de la energía solar*. México DF, El Colegio Nacional (1994).

EAWAG/SANDEC, *SODIS bulletins*. Boletines de la sección Agua y Saneamiento del Instituto Federal Suizo para el Medio Ambiente, la Ciencia y la Tecnología. (1997).

Márquez Bravo, L. *Desinfección solar*. Trabajo presentado en el Simposio CEPIS sobre “Calidad del agua, desinfección efectiva”. Disponible en e sitio web del CEPIS y en CD-Rom (1998).

Solsona, F. *Water disinfection for small community supplies*. Capítulo sobre desinfección del agua para el manual de la IRC “Small Community Supplies” y disponible como separata en la OPS/CEPIS. (2001).

Wegelin, M.; Canonica, S.; Mechsner, K.; Fleischmann, T.; Pesaro, F.; Metzler, A. *Solar water disinfection: scope of the process and analysis of radiation experiments*. J Water SRT-Aqua Vol 43, No. 3, pp. 154-169 (1994).

Wegelin, M.; Sommer, B. *Solar water disinfection (SODIS), destined for worldwide use?* Revista “Waterlines” Vol 16, No. 3 (1998).

Capítulo 3

CLORO



Introducción

En todo el mundo, el mecanismo de desinfección más aplicado en los sistemas de abastecimiento de agua es el que emplea el cloro y sus compuestos derivados como agentes desinfectantes. Fue introducido masivamente a principios del siglo XX y constituyó una revolución tecnológica, que complementó el proceso de filtración que ya era conocido y utilizado para el tratamiento del agua. La cloración, tal como se ha expresado en el capítulo anterior, incrementó en 50% la esperanza de vida de los países desarrollados.

La clave de su éxito es su accesibilidad en casi todos los países del mundo, su razonable costo, su alta capacidad oxidante, que es el mecanismo de destrucción de la materia orgánica, y su efecto residual. Todo ello permite en forma bastante simple, asegurar la inocuidad del agua desde que se produce hasta el momento que se usa, lo que resulta muy beneficioso, tanto en sistemas pequeños como en grandes ciudades con redes de distribución extendidas.

Aunque el cloro y sus derivados no son los desinfectantes perfectos, muestran las siguientes características que los hacen sumamente valiosos:

- | Tienen una acción germicida de espectro amplio.
- | Muestran una buena persistencia en los sistemas de distribución de agua, pues presentan propiedades residuales que pueden medirse fácilmente y vigilarse en las redes después que el agua ha sido tratada o entregada a los usuarios.
- | El equipo para la dosificación es sencillo, confiable y de bajo costo. Además, para las pequeñas comunidades hay dosificadores de “tecnología apropiada” que son fáciles de usar por los operadores locales.
- | El cloro y sus derivados se consiguen fácilmente, aun en lugares remotos de los países en desarrollo.
- | Es económico y eficaz en relación con sus costos.

Los productos de la familia del cloro disponibles en el mercado para realizar la desinfección del agua son:

- | cloro gaseoso
- | cal clorada
- | hipoclorito de sodio
- | hipoclorito de calcio.

Para elegir cuál de estos productos se ha de emplear, así como el mecanismo para suministrarlo, el(los) responsable(s) de esta selección deberá(n) basar su decisión en la respuesta a las siguientes interrogantes:

- | ¿Qué *cantidad* de desinfectante se necesita?
- | ¿Cuáles son las posibilidades de *abastecimiento* del producto?
- | ¿Con qué *capacidad técnica* se cuenta para el uso, la operación y mantenimiento de los equipos?
- | ¿Existen los recursos necesarios para evitar que los trabajadores estén expuestos a *riesgos* a la salud durante el almacenamiento y manipuleo?
- | ¿Se dispone de la capacidad económica y financiera para asumir los *costos* de inversión, operación y mantenimiento?

Para responder estas preguntas será necesario realizar un diagnóstico de las condiciones técnicas, económicas y sociales de la localidad.

La *cantidad* necesaria de desinfectante está en función del caudal de agua a tratar, la dosis requerida según la calidad del agua y las normas de calidad de agua de bebida del país. Existe, sin embargo, una regla no escrita que establece un límite entre el uso de cloro gas y otras formas. Tal frontera la marca el caudal de 500 m³/día. El uso de cloro gas no es recomendable para caudales menores de 500 m³/día, lo que a una dotación de 100 litros por habitante por día, típica del medio rural, significa que el cloro gas solo es recomendable para poblaciones mayores de 5.000 habitantes.

El *abastecimiento* del producto es un factor que condiciona la selección del mismo, ya que en muchos casos las zonas rurales se encuentran alejadas de las ciudades y son de difícil acceso, lo cual podría sugerir la necesidad de emplear otro desinfectante o bien preparar hipoclorito de sodio en la localidad.

La *capacidad técnica* disponible debe ser considerada para la selección, ya que operar instalaciones de cloro gaseoso requiere personal capacitado y competente, lo que es difícil de encontrar y remunerar en zonas rurales. Así mismo, el acceso a energía eléctrica de manera continua y estable es requisito indispensable para el empleo de bombas.

Dado que el cloro gaseoso es extremadamente peligroso, es importante disponer de medios técnicos y personal capacitado para minimizar y controlar los *riesgos* inherentes a las instalaciones de este tipo, ya que una fuga no detectada y controlada a tiempo podría ocasionar serios accidentes que podían poner en peligro vidas humanas.

Por último, en lo que se refiere a los *costos* de la desinfección, se habrá de tener en cuenta las circunstancias, por ejemplo, podría convenir una solución más costosa si la fiabilidad, durabilidad, sencillez de la operación y disponibilidad de los repuestos y suministros fueran mejores que los del sistema menos costoso. Generalmente, conviene pagar un poco más si la inversión adicional asegura el éxito; a la larga puede que inclusive resulte más económico. Dado que las concentraciones de cloro activo en los diferentes productos varían, el volumen requerido del mismo también variará, por lo que se deberán considerar los costos de transporte que serán distintos al ser distintos esos volúmenes. En todo caso, la salud debe ser la consideración principal al momento de seleccionar la alternativa más adecuada.

Propiedades de los productos de cloro y descripción del método

Las variedades comerciales del cloro se obtienen por métodos diferentes y de ellos dependen la concentración de cloro activo, su presentación y estabilidad. En el cuadro de la siguiente página se listan las principales propiedades de cada una de estas variedades en un cuadro comparativo.

Vale en este punto aclarar el concepto de “cloro activo” que se utiliza a lo largo del capítulo. “Cloro activo” significa el porcentaje en peso de cloro molecular que aporta un determinado compuesto en cualquier estado; lo que quiere decir que si una solución tiene 10% de cloro activo, ello se debe a que se han burbujeado 10 gramos de cloro gas en 100 ml de agua y que el gas se ha absorbido totalmente y sin pérdida en ella. La solución tiene entonces 10 g de cloro en 100 g de agua (ya que 100 ml son prácticamente 100 gramos) y de allí el “10%”. La palabra “activo” significa que ese cloro está listo para entrar en acción; está pronto y “esperando” para atacar la materia orgánica o cualquier otra sustancia que sea oxidable por él.

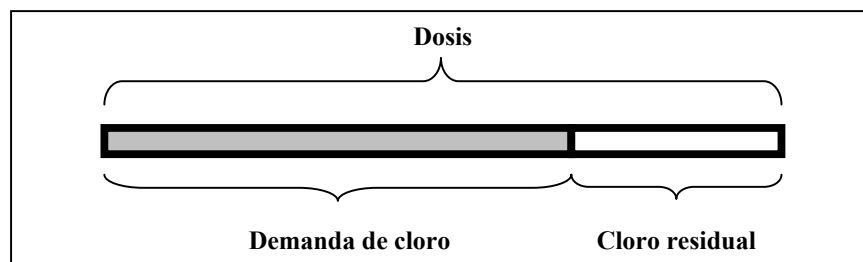
El método de desinfección con cloro y sus derivados se deberá implementar en tres pasos sucesivos, cada uno de los cuales variará, en mayor o menor grado, según el producto que se va a utilizar:

- Paso 1: Evaluación de la cantidad de cloro que se va a dosificar en la red
 Paso 2: Preparación de las soluciones de los productos no gaseosos
 Paso 3: Calibración del dosificador.

Nombre y fórmula	Nombre comercial o común	Características	% Cloro activo	Estabilidad en el tiempo	Seguridad	Envase usual
Cloro gas Cl_2	Cloro licuado Cloro gaseoso	Gas licuado a presión	99,5%	Muy buena.	Gas altamente tóxico	Cilindros de 40 a 70 kg. Recipientes de 1 a 5 toneladas
Cal clorada $\text{CaO} \cdot 2\text{CaCl}_2 \cdot \text{O} \cdot 3\text{H}_2\text{O}$	Cal clorada, polvo blanqueador, hipoclorito de cal, cloruro de cal	Polvo blanco seco	15 a 35%	Media. Se deteriora rápidamente cuando se expone a temperatura alta, humedad y/o luz solar. Pérdida de 1% al mes.	Corrosivo	Latas de 1.5 kg Tambores de 45 - 135 kg Bolsas plásticas o de papel de 25 - 40 kg, otros.
Hipoclorito de sodio NaClO	Hipoclorito de sodio, blanqueador líquido, lejía, agua lavandina, agua sanitaria	Solución líquida amarillenta	1 a 15% como máximo. Concentraciones mayores a 10% son inestables.	Baja. Pérdida de 2-4% por mes; mayor si la temperatura excede los 30°C	Corrosivo	Diversos tamaños de botellas de plástico y vidrio, y garrafrones
	Hipoclorito de sodio por electrólisis <i>in situ</i>	Solución líquida amarillenta	0.1 – 0.6 %	Baja	Oxidante	Cualquier volumen
Hipoclorito de calcio $\text{Ca}(\text{ClO})_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	HTH, Perclorón	Polvo, gránulos y tabletas. Sólido blanco	Polvo: 20 – 35% Granulado: 65 - 70% Tabletas: 65 –70%	Buena. Pérdida de 2 a 2.5% por año	Corrosivo. Inflamación posible al entrar en contacto con ciertos materiales ácidos.	Latas de 1.5 kg, tambores 45 - 135 kg, Baldes de plástico

Paso I: Evaluación de la cantidad de cloro a dosificar en la red

La cantidad de cloro que se va a dosificar equivale a la demanda total de cloro (la cual está estrechamente ligada a la calidad química y microbiológica del agua) a la que debe adicionarse la cantidad de cloro residual esperada en el extremo de la red. Por tanto, antes de llevar a cabo el proceso de desinfección es conveniente realizar ensayos de consumo instantáneo de cloro. Este ensayo se denomina “*ensayo de demanda de cloro*”.



Relación Dosis-Demanda-Residual

Si no se lleva a cabo la prueba de demanda y si la desinfección no reviste un carácter de urgencia (cloración preventiva), la cantidad de compuesto de cloro a introducir se puede regular mediante la aplicación directa de cantidades crecientes de cloro hasta obtener la concentración residual requerida en el extremo de la red. Se puede necesitar varios días hasta que la dosis se ajuste al valor ideal. Para este efecto, entre dosis sucesivas, debe transcurrir un intervalo de tiempo, en atención al tiempo que demora el agua desde el punto de aplicación del cloro hasta el extremo más alejado de la red.

En situaciones de emergencia, una primera estimación de la cantidad de cloro que se debe aplicar se puede calcular con un ensayo “rápido” de la demanda. Este método consiste en introducir cantidades crecientes de cloro (por ejemplo, entre 1 y 10 mg/l) en muestras del agua a tratar. Al final de 30 minutos se mide, en cada muestra, la concentración de cloro residual. La dosis de cloro se determina por la muestra que contiene la concentración de cloro residual más próxima a la pretendida. No obstante, cuando se inicia el proceso de desinfección y el agua es enviada a la red de distribución, es necesario hacer un ajuste posterior de las concentraciones debido a que siempre existe la posibilidad de contaminación por infiltración en la red o por otros factores.

Paso 2: Preparación de soluciones para productos no gaseosos

Cuando se emplea el cloro gaseoso, este se aplica directamente a través del dosificador. Lo mismo no ocurre cuando se trata de otros productos de cloro que se comercializan en forma de sólidos o se encuentran en concentraciones que no se adaptan a los requerimientos necesarios. En estos casos, se debe proceder a su disolución, de acuerdo con el mecanismo de dosificación del equipo que se va a emplear.

Las fórmulas que rigen la cantidad de agua de disolución requerida para obtener una solución de hipoclorito con una concentración de cloro activo que permita su fácil manejo y control por el dosificador, son las siguientes:

A partir de:	hipoclorito de sodio	hipoclorito de calcio
Descripción	Es comercializado en forma líquida en concentraciones variables de cloro activo, la presentación de 10% la más común.	Se comercializa en forma de sólido. El contenido de cloro activo es variable según su presentación, siendo la de 60% una de las más comunes.

Agua de disolución requerida	<p>Definida la concentración final de la solución de cloro (Cf) a ser empleada por el dosificador, se aplica la siguiente ecuación para obtener el volumen del agua de disolución (Vd) que será agregada a la solución matriz:</p> $Vd = (Co.Vo / Cf) - Vo$ <p>Donde: Co = Concentración inicial de la sol. Matriz (g/L) Vo = Volumen de la sol. Matriz (L) Cf = Concentración esperada de la sol. Diluida (g/L)</p>	<p>Definida la concentración final (Cf) a ser empleada por el dosificador, se aplica la siguiente ecuación para obtener el volumen del agua de disolución (Vd) en litros que será agregada a la masa de hipoclorito de calcio sólido:</p> $Vd = \% \times P / Cf$ <p>Donde: % = Porcentaje de cloro activo en el producto P = Peso del sólido de hipoclorito de calcio (Kg) Cf = Concentración esperada en la sol. diluida (g/L)</p>
Ejemplo	<p>Se tienen 40 litros de una solución de hipoclorito de sodio al 10% (0.1) y se quiere preparar con ella otra solución de concentración 2% (0.02), ¿cuánta agua se debe agregar?</p> $Vd = \frac{0.1 \times 40}{0.02} - 40 = 160 \text{ L}$	<p>Si se dispone de 1,2 kg de hipoclorito de calcio de concentración 60% (0,6) y se desea obtener una solución para dosificar de concentración 2% (0,02), ¿cuánta agua se deberá usar?</p> $Vd = \frac{0.6 \times 1.2}{0.02} = 36 \text{ L}$

Debe recordarse que la capacidad de los tanques de disolución (dos como mínimo) debe corresponder a un período de 24 horas de tal manera que facilite su operación. Asimismo, se debe asegurar la completa disolución del producto en el agua. El empleo de un agitador eléctrico puede facilitar tal tarea. Por otro lado, es común encontrar partículas o impurezas por lo que el dosificador deberá contar con un filtro que las retenga para evitar su obstrucción. Asimismo, la alcalinidad del hipoclorito de sodio concentrado precipita la dureza del agua de dilución, lo cual también puede producir incrustaciones en los dosificadores y tuberías. Por ello se recomienda preparar la solución con 24 horas de anticipación, de tal manera que los precipitados tengan tiempo de sedimentar.

Paso 3: Calibración del dosificador

La calibración del dosificador para aplicar la cantidad óptima de producto depende de tres factores:

- 1 Las características físicas del producto a emplear: gaseoso, líquido o sólido.
- 1 La dosis de cloro necesaria para obtener la concentración de cloro residual esperada en el extremo de la red.
- 1 El caudal de agua a desinfectar. En caso de que no sea factible controlar las variaciones de caudal, por ejemplo en manantiales, se deberá considerar el caudal máximo de la fuente.

La dosis de cloro se obtendrá a través del estudio de la demanda de cloro (Paso I) y de la concentración de cloro residual esperada, la cual está usualmente definida por las normas de calidad del agua que rigen en cada país. Al respecto y como referencia, la OMS considera que una concentración de 0,5 mg/l en cloro residual libre en el agua, luego de un período de contacto de 30 minutos, garantiza una desinfección satisfactoria.

En cuanto al caudal de agua a tratar, este no solo condiciona la cantidad de cloro a dosificar, sino también el tipo de equipo que se adapte mejor a esta necesidad. Por ejemplo, no es lo mismo un equipo de inyección de gas cloro para desinfectar 10 m³/s, que un tanque dosificador de

hipoclorito de sodio a carga constante para desinfectar 1 l/s. Por consiguiente, el procedimiento de calibración varía según el dosificador y éste a su vez, depende del caudal de agua a desinfectar.

Tomando en cuenta estos factores, los dosificadores que se encuentran disponibles en el mercado se pueden clasificar en *cloradores* para gas y *dosificadores mecánicos* y *bombas dosificadoras* para solución líquida. La calibración de estos equipos puede realizarse manualmente y automáticamente en los sistemas más sofisticados, siendo el primero el más empleado para ciudades de porte medio y pequeñas comunidades. A continuación se resume el método de calibración que deberá emplearse en función del dosificador.

Dosificador	Cloradores para cloro gaseoso	DOSIFICADOR MECANICO y BOMBA DOSIFICADORA Para solución líquida
Descripción	Los cloradores de gas disponen de un rotámetro o dispositivo de medición que permite la calibración del equipo. Sin embargo, la mejor manera de determinar la tasa real de cloro gas es a través de la fluctuación del peso de los cilindros. Por lo tanto, es obligatorio el uso de balanzas apropiadas que permitan determinar este gasto en el tiempo.	Para determinar la cantidad de hipoclorito en solución se emplea la misma ecuación utilizada para determinar la cantidad de agua de disolución. Es importante disponer de dos tanques de disolución de dimensiones adecuadas que permitan el abastecimiento continuo de la solución de cloro al dosificador mecánico o tanque regulador con bomba dosificadora.
La cantidad a dosificar se calcula a partir de la siguiente Fórmula	$M = D \times Q$ <p>Donde: M (gCl/mh) = Cantidad de cloro a dosificar D (gCl/m3) = Dosis de cloro Q (m3/h) = Caudal del agua a tratar</p>	$M = (D \times Q)/C$ <p>Donde: M (L/h) = Cantidad de cloro a dosificar D (mg/L) = Dosis de cloro Q (L/h) = Caudal de agua a tratar. C (mg/L) = Concentración de la solución</p>
Ejemplo	Para una solución de cloro de 4 gCl/m3 en una fuente con caudal de 1.000 m3/h, se tendrá un gasto de 4 KgCl/h ó 96 Kg de cloro al día. Esto permitirá atender el suministro de cloro en 10 días con un cilindro de una tonelada.	Para una dosis de cloro equivalente a 4 mg/L en una fuente con caudal de 10,000 L/h y una concentración de solución de hipoclorito de 2%, se requiere suministrar 2 L/h.

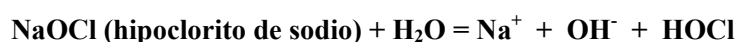
Mecanismos de la desinfección con cloro

La cloración del agua potable se lleva a cabo mediante el burbujeo del cloro gaseoso o mediante la disolución de los compuestos de cloro y su posterior dosificación. El cloro en cualquiera de sus formas, se hidroliza al entrar en contacto con el agua, y forma ácido hipocloroso (HOCl) de la siguiente forma:

En el caso del *cloro gaseoso*, la reacción que tiene lugar es:



En el caso del *hipoclorito de sodio*, la reacción que tiene lugar es:

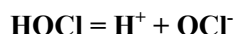


En el caso del *hipoclorito de calcio* y la porción activa de la *cal clorada*, la reacción es:



Durante el proceso químico de la desinfección se producen compuestos tales como cloraminas, dicloraminas y tricloraminas en presencia de amoníaco en el agua. Las cloraminas sirven igualmente como desinfectantes aunque reaccionen de una manera sumamente lenta. Asimismo, se forman el ácido clorhídrico (HCl) y los hidróxidos de calcio y sodio, los cuales no participan en el proceso de desinfección.

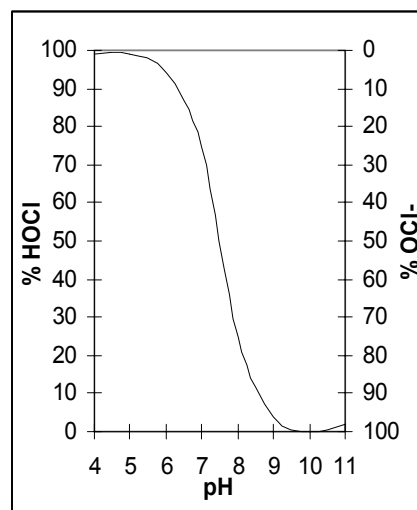
La especie desinfectante es el ácido hipocloroso (HOCl), el cual se disocia en iones hidrogenios (H^+) e hipoclorito (OCl^-) y adquiere sus propiedades oxidantes::



Ambas fracciones de la especie son microbicidas y actúan inhibiendo la actividad enzimática de las bacterias y virus y produciendo su inactivación

Tanto el ácido hipocloroso (HOCl) como el ión hipoclorito (OCl^-) están presentes hasta cierto punto cuando el pH varía entre 6 y 9 (el rango usual para el agua natural y potable). Cuando el valor de pH del agua clorada es 7,5, el 50% de la concentración de cloro presente será ácido hipocloroso no disociado y el otro 50% será ión hipoclorito. Los diferentes porcentajes de HOCl y OCl^- a diferentes valores de pH pueden verse en la figura.

Las diferentes concentraciones de las dos especies significan una considerable diferencia en la propiedad bactericida del cloro, ya que estos dos compuestos presentan diferentes propiedades germicidas. En realidad, la eficiencia de HOCl es por lo menos 80 veces mayor que la del OCl^- .



Comportamiento de las fracciones del ácido hipocloroso respecto a variaciones de pH

Por esta razón, cuando se monitorea el cloro del agua, es aconsejable vigilar el pH, ya que esto dará una idea del potencial real bactericida de los desinfectantes presentes. En tal sentido, es importante mencionar que la OMS recomienda para una desinfección adecuada un $\text{pH} < 8$.

La turbiedad es otro factor de peso en la desinfección, ya que una excesiva turbiedad reducirá la efectividad por absorción del cloro y, por otro lado, protegerá a las bacterias y virus de su efecto oxidante. Por tal, la OMS recomienda una turbiedad menor de 5 UNT, siendo lo ideal menos de 1 UNT.

Subproductos de la desinfección con cloro

En un sistema de abastecimiento de agua, la cloración se realiza normalmente al final del tratamiento, después de la etapa de filtración. A ello a veces se le denomina *poscloración*. A veces se realiza una cloración previa a cualquier otro tratamiento, llamado en este caso, *precloración*. Esta se lleva a cabo con el propósito de controlar las algas que puedan obstruir los filtros y eliminar el gusto y el olor del agua. En este caso y cuando el agua sin tratar lleva algunos materiales orgánicos

llamados “precursores” (materia orgánica, ácidos húmicos, etc.), se pueden generar los subproductos de la desinfección (SPD), que se mencionaron anteriormente. Los constituyentes más característicos de los SPD de la cloración son los trihalometanos (THM).

Este tema ha sido tratado en el capítulo anterior y en caso de mayor interés, se ofrece la bibliografía al final del capítulo, donde se presenta la publicación de la OPS/ILSI que cubre prácticamente todos los aspectos de los SPD, tanto técnicos, como toxicológicos y epidemiológicos.

Equipos

La selección del dosificador o alimentador de cloro depende de tres factores:

- | Las características del producto clorado.
- | La dosis de cloro en el agua.
- | El caudal del agua a desinfectar.

Con estos factores es posible clasificar algunos de los equipos más usados:

Clasificación	Equipo dosificador	Producto	Rango de servicio (habitantes)
Cloro gaseoso	A presión (directo) Al vacío (Venturi o eyector)	Gas Cloro Gas Cloro	5.000 habitantes a grandes ciudades
Solución	Bajo presión atmosférica, de carga constante		
	Tanque con válvula de flotador Tubo con orificio en flotador Sistema vaso /botella	Hipoclorito de Na o Ca Hipoclorito de Na o Ca Hipoclorito de Na o Ca	< 20.000
	Bajo presión positiva o negativa		
	Bomba de diafragma(positiva) Dosificador por succión(negativa)	Hipoclorito de Na o Ca Hipoclorito de Na o Ca	[2.000 – 300.000]
	Generador de hipoclorito de sodio <i>in situ</i>		< 5.000 hab.
Sólido	Dosificador de erosión Otros dosificadores	Hipoclorito de Calcio Cal clorada	[2.000 – 50.000] < 2.000

Equipos dosificadores de cloro gaseoso

La desinfección por medio de cloro gaseoso es económica y es la tecnología más usada en todo el mundo. Más de 90% de la población mundial bebe agua que ha sido desinfectada por cloro gaseoso. El gas se presenta comercialmente en cilindros de acero de 75 kg y una tonelada y en camiones o contenedores especialmente diseñados.

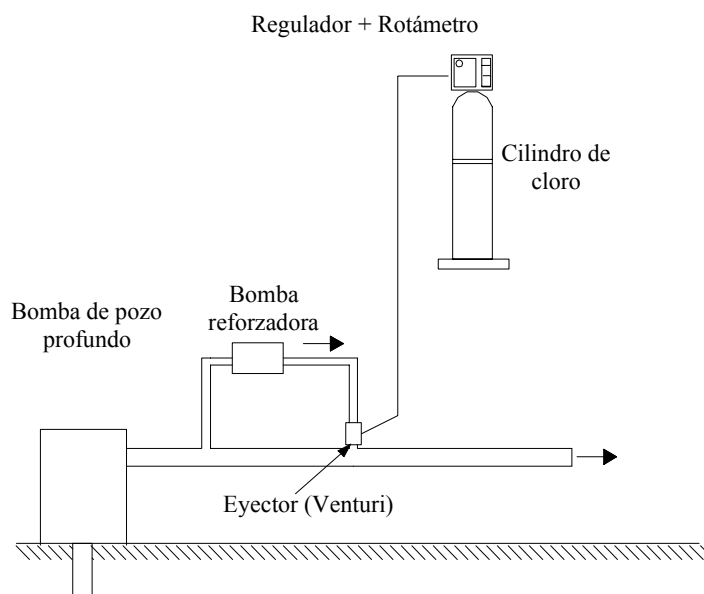


Cilindros de una tonelada y tanque rodante con cloro

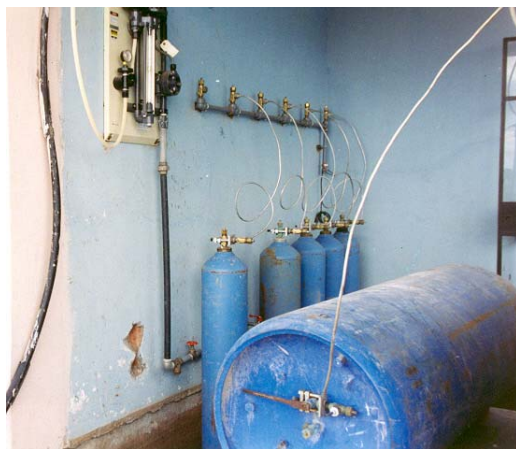
Los dosificadores de cloro gaseoso trabajan bajo dos principios: *funcionamiento al vacío* por inyección en tubería y *funcionamiento a presión* por difusión en canales abiertos o tubería. El más común es el de funcionamiento al vacío.

Cloradores gaseosos de funcionamiento al vacío

Este sistema comprende un cilindro con el gas, un regulador con un rotámetro (indicador de tasas de alimentación) y un eyector. El sistema trabaja debido al vacío que se genera en el eyector tipo Venturi accionado por un flujo de agua, el cual eyecta una mezcla de agua y de gas en el punto de aplicación, donde el gas se difunde y disuelve. El sistema debe estar provisto de válvulas antirretorno para impedir el ingreso del agua a la tubería de transporte de cloro, con el objeto de prevenir la corrosión del equipo en los casos en que por algún motivo se interrumpa su funcionamiento.



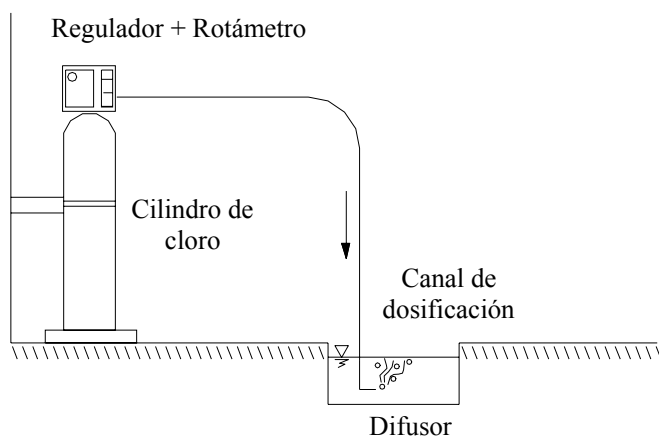
Equipo de cloro gas al vacío



Cilindros múltiples de 75 Kg (“manifold”) y tanque de una tonelada métrica al eyector

Cloradores gaseosos de funcionamiento a presión.

Este tipo de clorador suele recomendarse cuando no hay posibilidad de usar un diferencial de presión o no se dispone de una fuente de electricidad para operar una bomba reforzadora que produzca el diferencial de presión necesario para el funcionamiento de los cloradores al vacío.



Equipo dosificador de cloro gas a presión



El sistema consta de un diafragma activado por un regulador a presión y un rotámetro que indica la tasa de flujo de cloro. El paso del cloro gas hacia el difusor es controlado por un regulador

▮ ***Instalación y requerimientos de instalación de los cloradores gaseosos***

Para implementar un sistema de cloración a gas, es necesario determinar el tipo de clorador más adecuado. Los factores que determinan el tipo de clorador de gas que se va a instalar se refieren a la capacidad para suministrar la cantidad necesaria de cloro por unidad de tiempo (kg/h), así como a la flexibilidad de operación. La ecuación sobre la cual se basa este cálculo ha sido explicada líneas arriba al estudiar la calibración de los cloradores, ecuación que queda enunciada de la siguiente manera cuando se aplica la conversión correspondiente:

$$M = 3,6 D \times Q$$

Donde:

M (gCl/h) = Cantidad de cloro a inyectar

D (mgCl/l) = Dosis de cloro

Q (l/s) = Caudal máximo de agua a tratar.

Para los *cloradores de vacío* más pequeños, las tasas típicas de dosificación varían de 10 a 100 g/h, aproximadamente. Los equipos más usados cuentan con capacidad máxima de operación de 2 kg/h, 5 kg/h y 10 kg/h, lo que permite atender desde ciudades de porte medio hasta metrópolis.

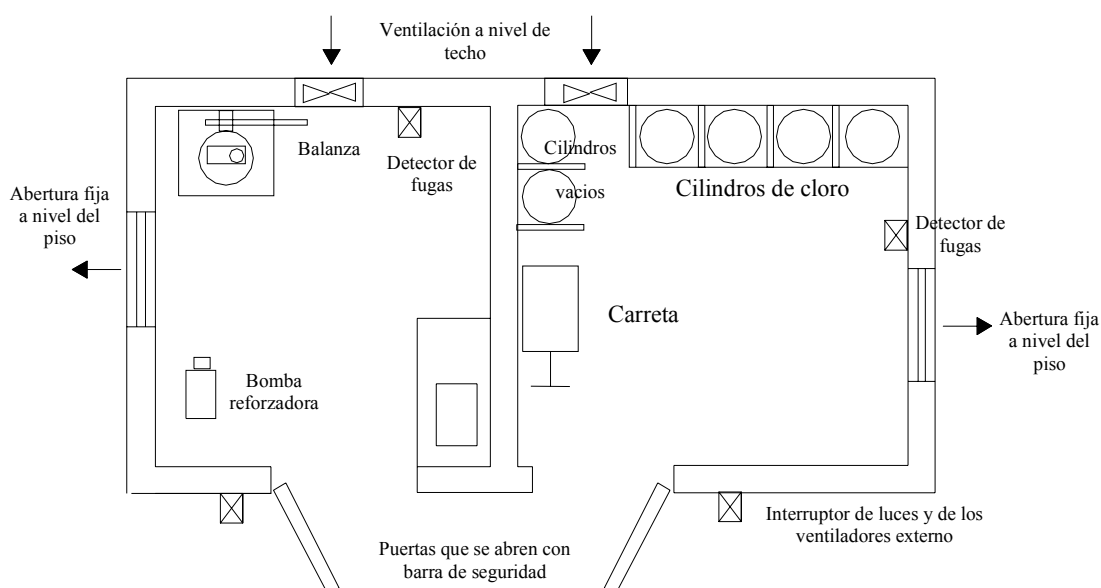
Los *cloradores a presión* más pequeños tienen una capacidad que varía entre 10 y 150 g/h. A partir de un cálculo simple, si se agrega al agua para desinfectarla una cantidad de 1 mgCl/litro y si la dotación de la población es de 100 litros/habitante x día, ello implica que con una dosis de 100 g cloro/h se puede desinfectar agua para una población de 24.000 habitantes y con 1 kg cloro/h, a una población de 240.000 habitantes.

Como la presión del cloro gas en el cilindro cambia en función de la temperatura ambiente, la tasa máxima de dosificación continua debe calcularse de acuerdo con la temperatura ambiente más baja prevista. Para una dosificación continua de cloro gas de 120 g/h, la temperatura ambiente tiene que ser superior a -5°C .

En cuanto a los requisitos y precauciones de instalación, debe mencionarse que la manera más exacta de determinar la tasa efectiva de alimentación del cloro gas que se está dosificando es midiendo el peso del cloro consumido, por lo cual es imprescindible usar balanzas apropiadas. El pesaje correcto permitirá hacer un cálculo exacto de la cantidad de cloro que se está dosificando durante un período determinado y también indicará cuándo o cuán pronto habrá que cambiar los cilindros. Las balanzas para los sistemas pequeños de abastecimiento de agua están diseñadas para pesar cilindros de 45 ó 70 kg en posición vertical. Todas las instalaciones de cloración de gas deben estar dotadas de cadenas u otro aparejo bien asegurado a una pared para evitar que los cilindros de cloro se volteen accidentalmente.

El cloro es un gas peligroso, por lo que debe manejarse con cuidado. Para garantizar la mayor seguridad y economía, los sistemas de cloración de gas deben ser diseñados e instalados por personas experimentadas y deben ubicarse lejos de laboratorios, almacenes, oficinas, salas de operación, etc., para evitar la contaminación ante una posible fuga. En la figura se muestra un plano típico para la instalación pequeña de cloración con gas. Los cilindros de cloro deben guardarse en una habitación separada, diseñada específicamente para ese fin. Los cilindros de cloro nunca se deben guardar donde les dé la luz solar directa para evitar que se calienten. Se debe proporcionar la ventilación adecuada a las instalaciones, siempre en el nivel del piso ya que el cloro es más pesado que el aire. Los cilindros de una tonelada de capacidad se colocan en posición horizontal, por lo cual deberán contar con grúas para su recambio y de un sistema de anclaje para evitar su rodamiento.

Plano típico para una pequeña instalación de cloración con gas



En los sistemas de *cloro de funcionamiento a presión* es importante que la cámara de contacto, ya sea un canal o un tanque, se diseñe de modo que siempre haya una carga mínima de agua de 0,5 metros sobre el difusor para asegurar que se disuelva todo el cloro gas y evitar que se pierda en el aire. Por otro lado, este tipo de clorador se activa por la propia presión del gas cloro en el cilindro, por lo cual no requiere de energía eléctrica externa. Esto es una ventaja en los casos en que no se

dispone de una fuente de energía hidráulica o eléctrica para producir el diferencial de presión requerido por el clorador del tipo de vacío.

La energía eléctrica para operar los *cloradores de funcionamiento al vacío* es relativamente pequeña, pues solo se requiere la energía necesaria para introducir el flujo de agua a través del eyector (Venturi). El flujo de agua y la presión diferencial que se requieren pueden producirse por medios eléctricos o hidráulicos con ayuda de una pequeña bomba auxiliar (reforzadora), generalmente de 1 a 1,5 HP. En la selección del equipo operado eléctricamente, la fiabilidad y estabilidad de la fuente de energía es una consideración importante.

Como medida de seguridad, en ambos sistemas, se coloca una válvula manual de alivio de presión entre el clorador y el difusor para descargar (al exterior del edificio) el cloro gas que pueda haber, cuando se cambian los cilindros. Al respecto, es necesario que las grandes plantas de tratamiento dispongan siempre de un sistema de detección de fugas y de una reserva de productos para neutralizar el cloro.

Se debe tener cuidado con los materiales que se emplean en los equipos de cloro, ya que estos se comportan de modo diverso en lo que respecta a la oxidación. El cuadro siguiente muestra la resistencia que ofrecen algunos de los materiales más comunes.

Resistencia de algunos materiales a las diferentes formas de cloro					
	Acero macizo	Acero inoxidable	Cobre	PVC	Teflón (PTFE)
Cloro gaseoso seco	Buena hasta 120°C	Buena hasta 150°C	Buena hasta 200°C	Buena hasta 40°C	Buena hasta 200°C
Cloro gaseoso húmedo	Nula	Nula	Nula	Buena hasta 40°C	Buena hasta 200°C
Cloro líquido	Buena	Buena	Buena	Nula	Aceptable

Operación y mantenimiento de los cloradores a gas

Los *cloradores de funcionamiento al vacío* requieren inspección y mantenimiento con regularidad por operadores capacitados y que se sigan las recomendaciones del fabricante para asegurar su funcionamiento adecuado y evitar reparaciones y accidentes costosos. Este tipo de sistema generalmente es duradero y relativamente exento de dificultades. Hay que tener sumo cuidado de que la humedad no se mezcle con el cloro gaseoso dentro del sistema dosificador, pues el cloro gaseoso húmedo corroerá o deteriorará rápidamente el equipo: partes plásticas, herrajes de metal, válvulas, conexiones flexibles, etc. Los materiales del sistema de cloración, incluidos los repuestos y accesorios, tienen que ser apropiados para el manejo del cloro gaseoso húmedo y seco. El cloruro férrico que se deposita en las tuberías, generalmente debido a las impurezas del cloro, se debe limpiar con regularidad. En todo momento se debe tener a mano una cantidad adecuada de repuestos. Las conexiones flexibles deben reemplazarse conforme a lo recomendado por el fabricante. Los empaques de plomo entre el cilindro y el clorador se deben utilizar solo una vez. Cuando sea necesario cambiar cilindros será necesario abrir las juntas entre los cilindros y los cloradores, en cuyo caso, o por cualquier otra razón se deben reemplazar por empaques nuevos recomendados por el fabricante. La reutilización de empaques usados es probablemente la causa más común de las fugas de cloro gas.

En los *equipos cloradores de funcionamiento a presión* se deben tener las mismas consideraciones que en los de funcionamiento al vacío. Adicionalmente, se deberá tener presente

que la difusión del cloro en tubería se dificulta cuando la contrapresión supera los 10 m de columna de agua, en cuyo caso se deberá optar por seleccionar cloradores con funcionamiento al vacío.

Es práctica común que un operador compruebe y, en caso necesario, ajuste la dosis de cloro gas tres o cuatro veces en un turno de ocho horas. Se debe tener presente que la extracción de cloro gas no debe exceder de 18 kg al día en un mismo cilindro, ya que una extracción mayor producirá el congelamiento del cilindro debido a la rápida caída de presión “efecto Joule-Thompson”.

El cambio rutinario de un cilindro vacío a otro lleno suele tomar menos de 15 minutos a un operador experimentado. Cuando se realiza esta maniobra, por seguridad, siempre deben estar presentes al menos dos operarios.



**Equipo de
protección personal**

Tal como se indicó, el cloro gaseoso es extremadamente tóxico y corrosivo, por lo que su utilización exige rigurosas reglas de seguridad. Por ejemplo, en caso de incendio, se dará prioridad a la remoción de los tanques o cilindros, dado que su resistencia al calor solo se garantiza hasta 88° C (a presión interna de 30 bares). Debido a que el acero se quema en un ambiente con cloro, es preciso evitar agrietar los contenedores con un golpe (no emplear el martillo para desbloquear o descongelar las válvulas). El cloro húmedo es muy corrosivo: una fuga de cloro provocará una corrosión externa, mientras que el ingreso de agua a la tubería de transporte de cloro producirá una corrosión interna de la tubería.

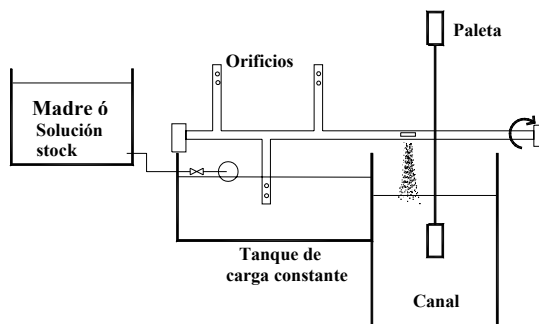
El uso de máscaras antigás es obligatorio siempre que haya manipulación de los contenedores en todos los ambientes donde se almacene el cloro. Las máscaras con filtros de cartucho tienen un tiempo de vida limitado.

Dosificadores de hipoclorito bajo presión atmosférica

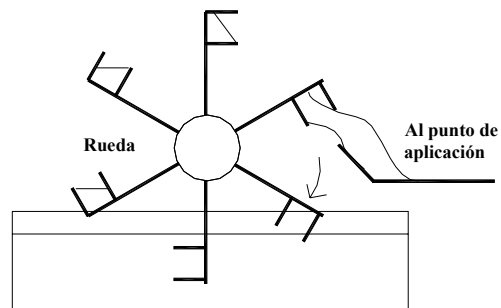
Fuera del gas, todos los otros productos químicos basados en el cloro son líquidos o siendo sólidos pueden ser disueltos y usados como una solución. La desinfección con hipoclorito es la más popular en el medio rural. Es sencilla, fácil, económica y hay muchos dispositivos de tecnología apropiada disponibles.

Existen varias maneras de alimentar una solución y los dosificadores se pueden clasificar según su fuerza de impulsión. Así, hay los que trabajan bajo presión atmosférica y los que trabajan bajo presión positiva o negativa.

Los dispositivos que trabajan bajo presión atmosférica se han diseñado con carga variable, como el *dosificador de paletas en canal* o el de *rueda de Arquímedes*.



Dosificador de paletas en canal

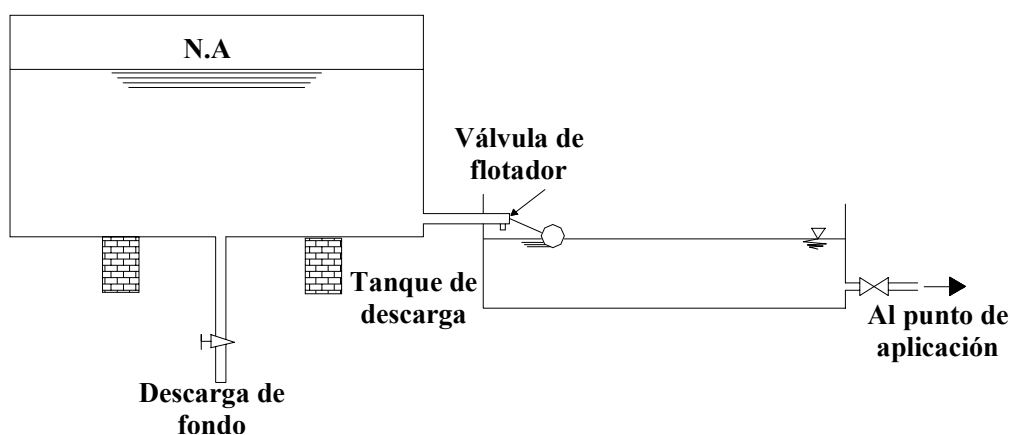


Rueda de Arquímedes

Sin embargo, los más usados son los que operan bajo el principio de “carga constante” debido a su mayor precisión y confiabilidad. Un sistema de carga constante está compuesto de dos elementos: un tanque de carga constante que contiene una solución madre o stock a ser dosificada y un mecanismo de regulación. Aquí se muestran tres de los sistemas más recomendados, los cuales están hechos con materiales que se pueden obtener fácilmente en el ámbito local. De ellos, tal vez el más popular ha sido el sistema de tubo con orificio en dispositivo flotante, el cual se utiliza en numerosos países.

Sistema de tanque con válvula de flotador

El corazón de este sistema es una válvula de flotador, similar a la que se usa en los inodoros. Uno o dos tanques contienen la solución madre (“stock”, “matriz” o “concentrada”) a ser alimentada y la válvula de flotador se coloca en un tanque pequeño. El sistema, aunque sencillo y barato, es bastante exacto.



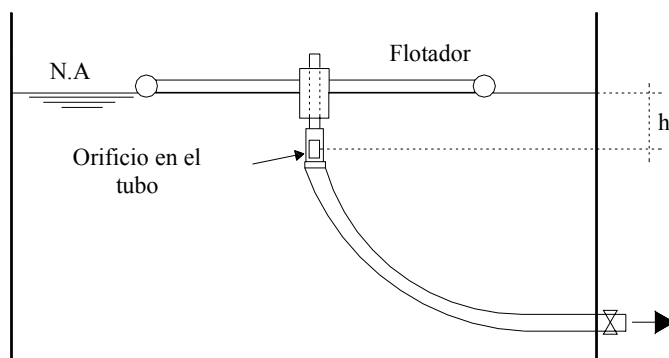
Tanque con válvula de flotador



Sistema de tubo con orificio en flotador

Se ha usado ampliamente con arreglos diferentes. El elemento básico es un tubo de PVC con uno o más orificios. El tubo se fija a un dispositivo flotante y el orificio debe colocarse algunos centímetros debajo del nivel de la solución. La solución ingresa al tubo y fluye a la tasa deseada de alimentación hacia el punto de aplicación. Una ventaja de este tipo de hipoclorador es que no se corroe, debido a que está hecho de tubería plástica, además no hay válvulas que se descompongan y se limpian fácilmente las obstrucciones producidas por depósitos de calcio o magnesio. La tasa de dosificación se puede ajustar fácilmente con tan solo cambiar la profundidad de inmersión de los orificios. Cuando se diseña, instala y mantiene adecuadamente, este tipo de clorador ha demostrado ser exacto y fiable.

Dosificador de tubo con orificio, en flotador



Instalación y requerimientos de instalación

Estos sistemas deben construirse con materiales que resistan la corrosión de una solución fuerte de hipoclorito. El tanque de solución puede ser de polietileno de alta densidad (PEHD), fibra de vidrio o de asbesto-cemento. El flotador puede hacerse con PVC o madera. No deben usarse aluminio, acero, cobre ni acero inoxidable porque se destruyen rápidamente.

Este equipo es sencillo de instalar, como todos los equipos de carga constante. Su aplicación está limitada a aquellos casos en que la solución de hipoclorito puede fluir por gravedad hacia el sitio de mezcla, ya sea un canal, una cámara de contacto de cloro o directamente hacia un tanque de

almacenamiento. La instalación debe incorporar un intervalo de aire en la tubería de descarga para evitar la posibilidad de sifonaje. También debe estar diseñado de modo que se excluya la posibilidad de que el contenido del tanque de solución se descargue todo de una vez accidentalmente en el canal de mezcla o la cámara de contacto si se rompe un accesorio o tubería o si ocurre otro tipo de derrame. El diseño de la instalación debe facilitar el manejo de los compuestos de cloro, la mezcla de soluciones y el ajuste de la dosificación. Se debe colocar un grifo de agua en un lugar conveniente para facilitar la preparación de las soluciones madre y para el aseo general.

Operación y mantenimiento

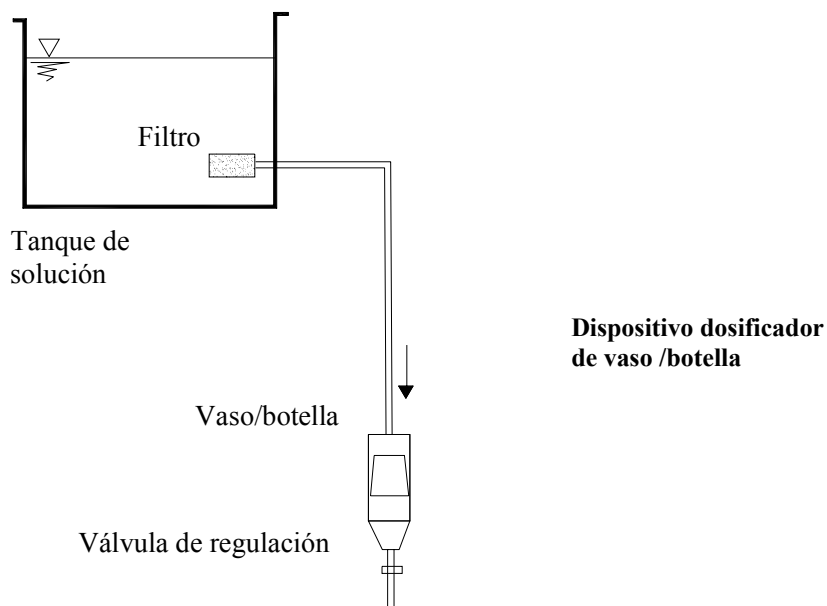
Estos equipos son fáciles de operar, mantener y reparar, y no requieren operadores especializados. Estos pueden ser capacitados fácilmente en un breve período de tiempo. Sin embargo, se requiere vigilancia constante para cerciorarse de que el equipo, en particular el de orificio sumergido, se mantenga limpio, que la dosificación sea la adecuada, que la solución del tanque no se haya agotado o debilitado su concentración, que no haya cambio de caudal, etc. Por ello se deberá limpiar periódicamente y usar un filtro para retener el material particulado



La preparación manual de la solución de hipoclorito se tiene que hacer con mucho cuidado, como se explicó anteriormente. Cuando se usa hipoclorito de calcio, la concentración de la solución debe ser entre 1% y 3% de cloro disponible para impedir la formación excesiva de depósitos y sedimentos de calcio. Las soluciones de hipoclorito de sodio pueden ser hasta de 10%. Las concentraciones mayores no son aconsejables porque pierden potencia rápidamente y si son muy altas se pueden cristalizar.

Sistema de vaso/botella

Este sistema fue desarrollado en Argentina en la década de 1970 por uno de los autores de este manual a solicitud de la OPS, para la desinfección del agua en zonas rurales. Consta de un tanque con la solución madre, un elemento de dosificación, conexiones y una válvula de regulación. Este sistema es preciso, económico y fácil de construir y de operar. El rango de dosificación es de 2 a 10 l/h, lo que lo hace aplicable para pequeñas comunidades de hasta 20.000 habitantes. La colocación de dos o más dosificadores en paralelo permite dosificaciones mayores.



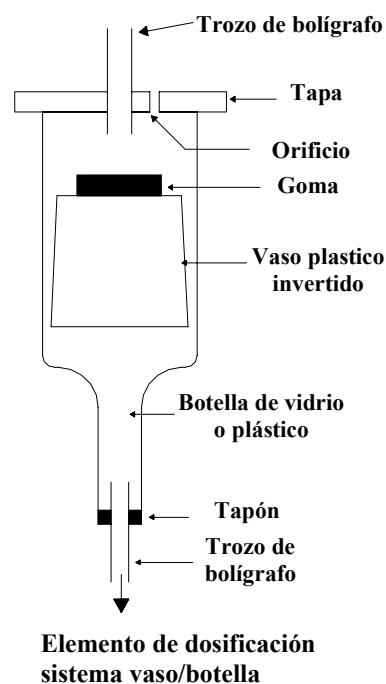
Instalación y requerimientos

El tanque debe instalarse 1 m (o más) por encima del nivel del elemento de dosificación. El elemento de dosificación es un sistema sencillo compuesto de un envase con un dispositivo flotante y se construye con una botella cilíndrica de vidrio o plástico con paredes lisas y con una capacidad entre 1,5 y 1,0 litros. La base de la botella debe extraerse y colocarse invertida (el cuello mirando hacia abajo).

Sobre la parte superior (área de la base extraída) se pega una tapa pequeña con masilla epóxica. Esta tapa tiene dos orificios. Uno central, donde se introduce otro tubo plástico de ¼" o bien un pedazo de lapicero plástico sin la carga, sobresaliendo aproximadamente 1 cm. Este tubo debe soldarse firmemente o pegarse a la tapa y sus bordes deben nivelarse y suavizarse. El segundo permite que el aire fluya libremente. La tapa puede hacerse de madera o de plástico.

Sobre la parte superior (área de la base extraída) se pega una tapa pequeña con masilla epóxica. Esta tapa tiene dos orificios. Uno central, donde se introduce otro tubo plástico de ¼" o bien un pedazo de lapicero plástico sin la carga, sobresaliendo aproximadamente 1 cm. Este tubo debe soldarse firmemente o pegarse a la tapa y sus bordes deben nivelarse y suavizarse. El segundo permite que el aire fluya libremente. La tapa puede hacerse de madera o de plástico.

El dispositivo flotante es un vaso o frasco de plástico con o sin tapa, colocado invertido (con la boca hacia abajo) dentro de la botella. Sobre la parte externa de la base se pega



un pedazo de goma blanda. Con el aire mantenido en el interior, tanto el frasco como el vaso plástico funcionarán como un dispositivo flotante. El flujo se regula con una válvula sencilla de fabricación local.

Operación y mantenimiento

La operación de este equipo es sencilla. Una vez realizadas las conexiones respectivas, se deberá agregar la solución de hipoclorito y verificar que en los conductos no exista aire. Luego, utilizando la válvula, se procede a regular la dosis suministrada. Si la solución madre se termina y el dosificador se “seca”, el dispositivo flotante caerá y al ser llenado nuevamente puede desacomodarse, por lo que se sugiere no dejar secar el recipiente con la solución madre. Otro pequeño detalle a tener en cuenta son los insolubles. Debido a que los conductos son relativamente estrechos, se debe usar hipoclorito líquido, de preferencia, y no olvidar colocar un filtro para eliminar el material particulado.



Los dosificadores de presión positiva trabajan con el principio de que la solución de cloro es presurizada encima de la presión atmosférica y posteriormente inyectada a una cañería (tubería) de agua. El sistema de presión positiva más importante es la popular bomba de dosificación de diafragma.

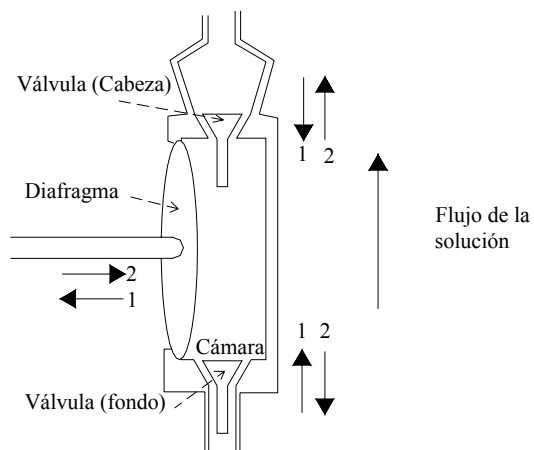
Por otro lado, los dosificadores de presión negativa o de succión trabajan con el principio de que la solución de cloro es succionada por el vacío que crea un dispositivo Venturi o al conectar el dosificador a una tubería de aducción. El sistema de presión negativa más usado es el dispositivo Venturi y se instala en la misma tubería presurizada de abastecimiento de agua o en una línea alterna, como se mostrará más adelante.

Botella con un frasco plástico

Sistema de dosificación con bomba de diafragma

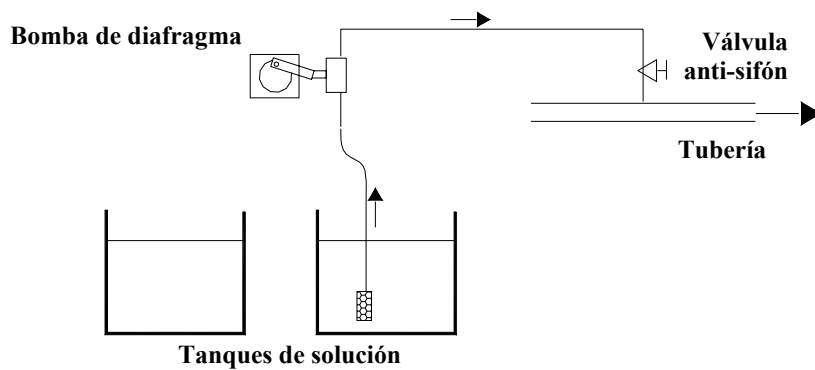
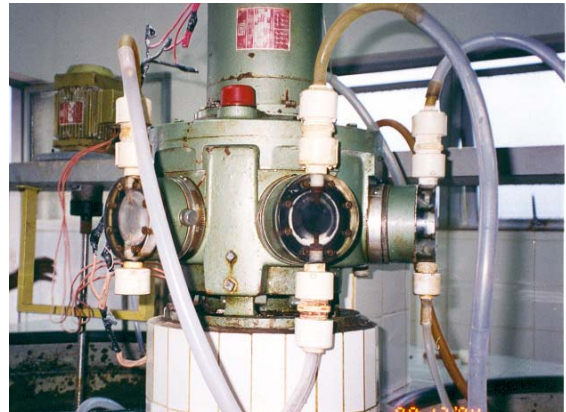
Estas bombas están equipadas con una cámara que tiene dos válvulas unidireccionales, una a la entrada y otra a la salida. La solución se incorpora en la cámara a través de la válvula de admisión a medida que se abre el diafragma y es forzada fuera de la cámara por la válvula de salida mientras se cierra el diafragma, el cual es impulsado por un motor eléctrico. El diafragma flexible está hecho de un material resistente a los efectos corrosivos de las soluciones de hipoclorito.

La tarea de la bomba es elevar la solución por medio de una serie de golpes. El punto de aplicación puede ser un canal o un reservorio (presión atmosférica) o una tubería con agua bajo presión positiva.

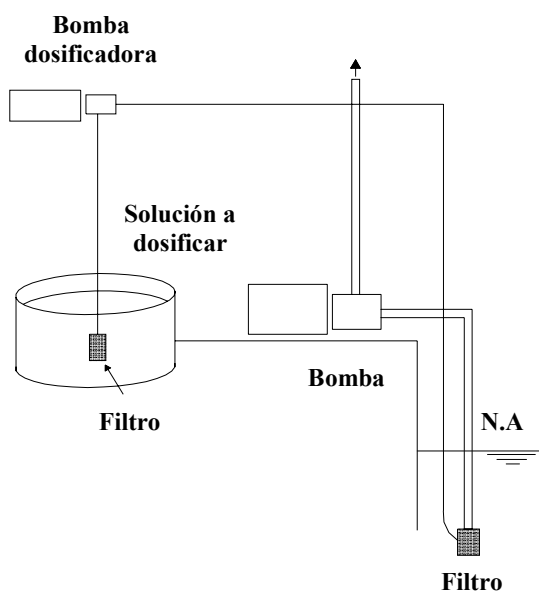


Detalle operativo del cabezal con su diafragma

Bomba de cabezales múltiples



Equipo dosificador con bomba de diafragma en tubería bajo presión positiva



Equipo dosificador con bomba de diafragma en tubería bajo presión negativa (tubería de aducción)

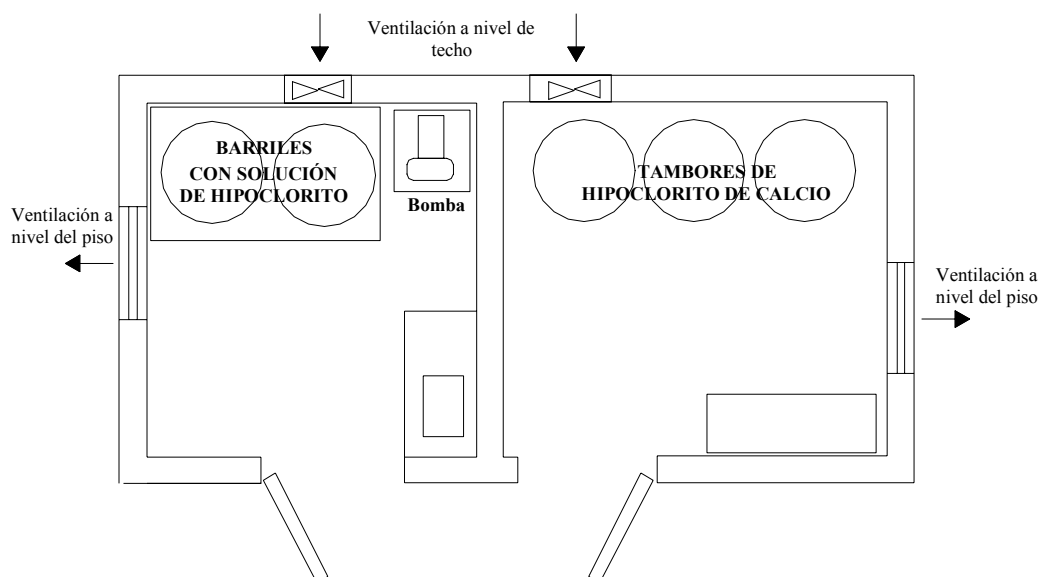
La capacidad de esta clase de hipoclorador es amplia; el más pequeño suministra cerca de un litro de hipoclorito/hora y los más grandes cerca de 200 litros/hora. Dependiendo de la concentración de la solución y dosificación de cloro deseada, puede desinfectarse agua de muy variado caudal.

Instalación y requerimientos

El método más común de accionar las bombas de diafragma es con un motor eléctrico. Las de accionamiento hidráulico son menos comunes. Estas últimas pueden usarse cuando no se dispone de una fuente fiable de energía eléctrica. Una ventaja de este sistema es que con un dispositivo especial se puede calibrar la velocidad de dosificación del hipoclorito con la velocidad de flujo del agua. Una desventaja del accionamiento hidráulico es su complejidad mecánica, la que frecuentemente resulta en problemas de operación y mantenimiento. La energía requerida para operar el hipoclorador es relativamente pequeña, generalmente de $\frac{1}{4}$ a $\frac{3}{4}$ HP. Es importante considerar la fiabilidad y la calidad de la fuente de energía al escoger este tipo de clorador.

Una instalación bien diseñada debe proteger los productos químicos contra la luz solar, así como proporcionar condiciones para manejar y mezclar fácilmente las soluciones químicas. También debe estar bien ventilada y evitar temperaturas y humedad muy altas. La instalación se debe diseñar de manera que se facilite la operación y el mantenimiento y se reduzca al mínimo los riesgos potenciales del cloro. Se recomienda tener un cuarto separado para almacenar el hipoclorito debido a su naturaleza corrosiva y reactiva. En la figura se muestra el diagrama de una instalación típica de cloración con hipoclorito de calcio.

Instalación típica de hipoclorito de calcio



Operación y mantenimiento

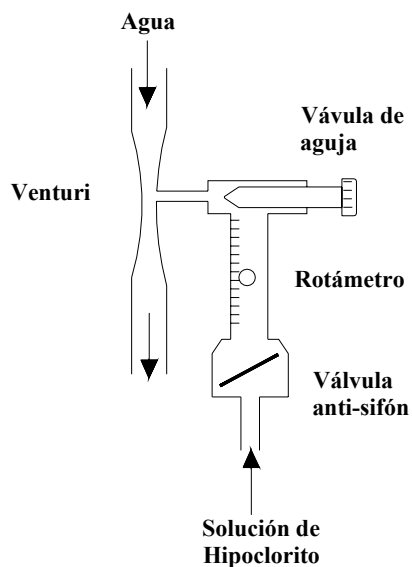
El caudal de las bombas de diafragma puede regularse para ajustar la dosificación de la solución de hipoclorito, ajustando ya sea la frecuencia o la longitud del recorrido de la biela. La mayoría de los hipocloradores utilizan motores de velocidad variable para regular la frecuencia del recorrido de la biela. Algunos emplean medios mecánicos para ajustar la longitud del recorrido y unos pocos utilizan ambos métodos. En la mayoría de los sistemas pequeños de abastecimiento de agua, el control de la frecuencia del recorrido de la biela parece ser el preferido por su sencillez. En el caso de arranque-parada, el control suele hacerse manualmente, al igual que la tasa de dosificación, pero el control arranque-parada también puede ser automático usando un interruptor de activación magnética conectado directamente al regulador de la bomba de agua. Por lo general, para comunidades pequeñas no se recomiendan sistemas complicados de control que ajusten las tasas de dosificación automáticamente.

La operación y mantenimiento de este tipo de cloradores es sencilla, pero requiere de un mantenimiento continuo y adecuado. La exactitud y la uniformidad de la dosificación pueden obtenerse si el equipo se mantiene libre de precipitados y depósitos en las válvulas. Generalmente se recomienda una concentración de 1 a 3% para las soluciones madre de hipoclorito de calcio a fin de alcanzar un equilibrio económico entre los costos de bombeo y el de evitar la precipitación de calcio en las válvulas de retención y la cámara del diafragma. Se deberá tener especial atención cuando el agua es dura, con altos contenidos de sólidos disueltos o cuando se emplee cal clorada disuelta. Se recomienda el empleo de soluciones de hipoclorito de sodio menores de 10% para evitar precipitados y mantener la estabilidad del cloro.

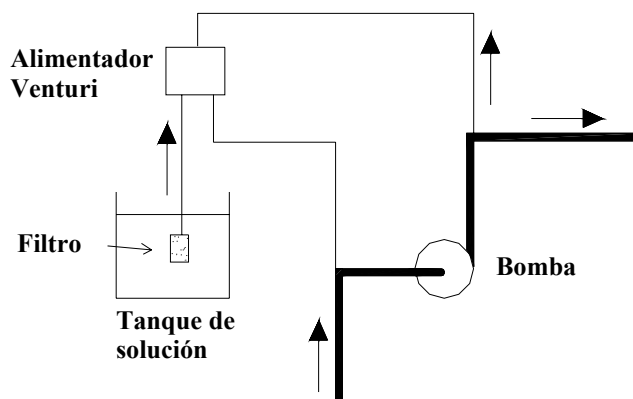
Como la bomba de diafragma está formada por piezas metálicas, puede sufrir corrosión y acortar su vida útil. Por este motivo es preciso cambiar la bomba periódicamente. Las válvulas de retención están expuestas a la deposición de calcio, por lo que hay que limpiarlas con una solución ácida para evitar un funcionamiento deficiente y tener que reemplazarlas con mayor frecuencia cuando pierdan su elasticidad debido a la oxidación. También es preciso manipular con cuidado las soluciones de hipoclorito. Estas son sumamente corrosivas y, por consiguiente, las herramientas y los recipientes utilizados para prepararlas deben ser de plástico, cerámica u otro material resistente a la corrosión. El personal debe ser capacitado en el manejo de derrames y en los procedimientos correctos para la operación y mantenimiento del equipo.

Dosificador por succión (tipo Venturi)

El dosificador por succión más empleado es aquel que utiliza un dispositivo Venturi, el cual permite dosificar soluciones cloradas en tuberías presurizadas. Este tipo de clorador se basa en el mismo principio que el de eyector empleado en los cloradores a gas. El vacío creado por el flujo del agua a través del tubo Venturi succiona la solución de hipoclorito y la descarga directamente en la corriente de agua principal o en una corriente de derivación. La dosificación se regula ajustando una válvula de aguja instalada entre el dispositivo Venturi y el rotámetro, tal como se muestra en la figura.

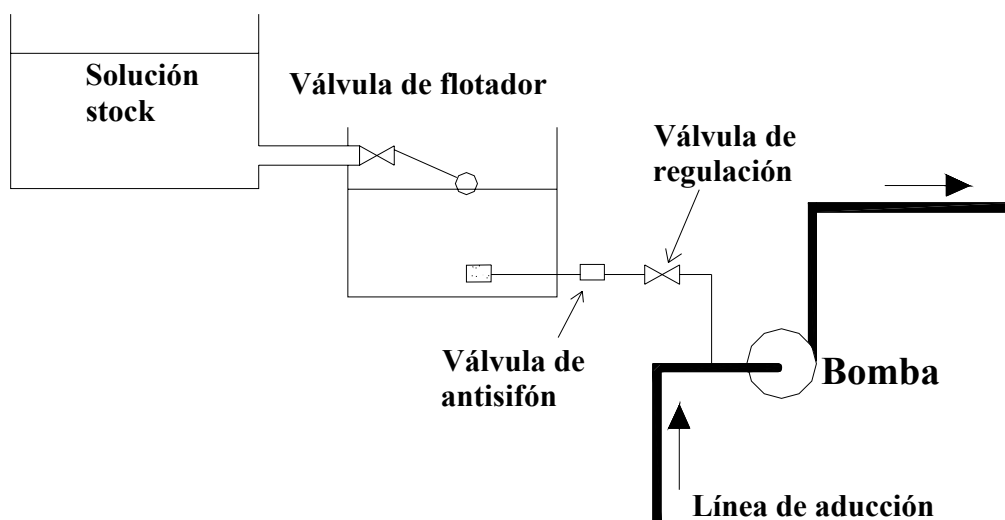


Venturi v rotámetro



Instalación típica del equipo

El hipoclorador tipo Venturi se consigue fácilmente en el mercado y es producido por varios fabricantes. El costo es relativamente bajo y es fácil de instalar, operar y mantener. La capacidad de dosificación varía de 1 a 25 litros/hora. Una ventaja importante es que si no fluye agua por el dispositivo, no se suministra la solución de cloro, lo que reduce la probabilidad de una sobredosificación. Sin embargo, si la concentración de solución madre que se inyecta es alta, puede dar lugar a algún ataque al rotor de la bomba. Otra forma de provocar succión para dosificar la solución de hipoclorito es conectando el dosificador a una tubería de aducción, tal como se muestra en la figura. Esta configuración deberá contar con una válvula antisifón para evitar el retorno en caso de que se detenga la bomba.



Dosificador en tubería de aducción

1 ***Instalación y requerimientos***

El dispositivo Venturi tiene un rango de operación relativamente estrecho dentro del cual funciona eficientemente. Por este motivo, la selección del mismo debe considerar que los requisitos hidráulicos del dispositivo concuerden con las características del sistema de abastecimiento de agua (caudal máximo y mínimo). Por este motivo, los dispositivos Venturi no se deben emplear para fluctuaciones amplias de caudal y de presión que excedan su rango de operación. Los dispositivos Venturi deberán ser resistentes a soluciones fuertes de hipoclorito, ya que su potencial oxidante puede atacar el dispositivo y deteriorarlo rápidamente.

Los dispositivos Venturi pueden instalarse en una pared o directamente sobre las tuberías, dependiendo del diseño. La instalación es suficientemente sencilla como para no requerir un especialista. Todas las tuberías y tubos de plástico flexible deben instalarse adecuadamente para facilitar su operación y mantenimiento. Previamente, debe instalarse un filtro al dispositivo y debe tenerse en cuenta la remoción fácil del Venturi para limpiar los precipitados u otros depósitos que puedan obstruirlo. Al igual que con todos los hipocloradores, es preciso tomar precauciones especiales al diseñar las instalaciones de cloración y almacenamiento debido a la naturaleza reactiva de las soluciones de cloro.

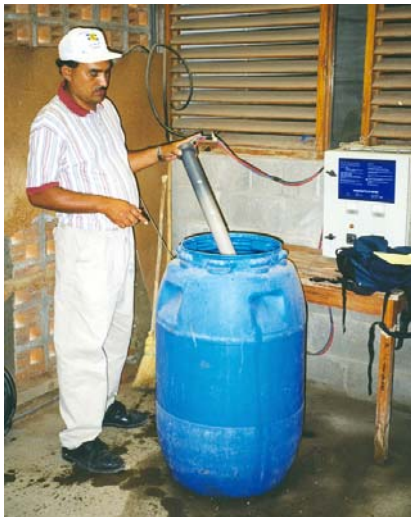
Para aceptar un flujo adecuado de agua, el dispositivo Venturi no requiere de grandes presiones de agua. Sin embargo, en algunos casos, se necesitara una fuente de energía eléctrica fiable para bombear una cantidad pequeña de agua a través del Venturi y producir así el vacío necesario.

1 ***Operación y mantenimiento***

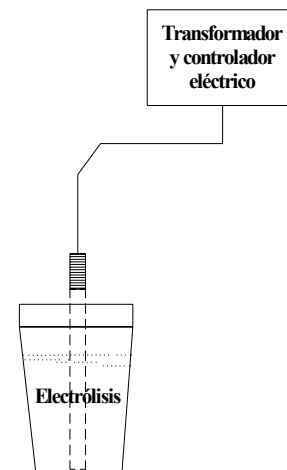
Los hipocloradores de tipo Venturi no son muy precisos, especialmente cuando el flujo varía mucho; en consecuencia, es necesario ajustar con frecuencia la dosificación. El Venturi de material acrílico es mejor porque permite al operador determinar visualmente cuándo hay que limpiarlo y además es resistente al hipoclorito. Todos los Venturi son sensibles a los depósitos de calcio que se pueden producir por la solución de hipoclorito o por el agua dura. Los Venturi se deben limpiar rutinariamente, si fuera necesario con ácido para eliminar los depósitos más duros y otros precipitados o sedimentos. La mayoría de los empaques de las juntas, válvulas de retención, resortes y juntas con el tiempo se deterioran por estar en contacto con el hipoclorito, por lo que deben reemplazarse periódicamente. Estas piezas de repuesto deben ser del material apropiado y estar a mano en todo momento.

Electrólisis de cloruro de sodio *in situ*

Dada su importancia, la desinfección no puede ser intermitente. En tal sentido, el aprovisionamiento continuo del desinfectante es un requisito fundamental que deberá ser tomado en cuenta al momento de seleccionar el mecanismo de desinfección. Es por ello que en pequeñas localidades o comunidades rurales alejadas o de difícil acceso, donde la continuidad del aprovisionamiento de hipoclorito no esté asegurada, ya sea por la disponibilidad del transporte o por la capacidad de adquirirlo en el momento oportuno, una alternativa que deberá ser evaluada es la generación de hipoclorito de sodio *in situ*.



NaClO in situ



La generación de hipoclorito *in situ* consiste en someter una solución de 30 gramos de cloruro de sodio/litro (3%) de concentración aproximada a un proceso de electrólisis, lo que permite obtener unos 400 litros al día de una solución estable con 5 a 7 g de cloro activo/litro (0,5 – 0,7%). A través de este mecanismo, es posible suministrar agua de calidad adecuada a una población de hasta 5.000 habitantes, ya sea por medio de sistemas convencionales de convencionales de dosificación en sistemas comunales o directamente en las viviendas. Los dispositivos generadores de hipoclorito de sodio *in situ* requieren energía eléctrica para su funcionamiento, lo que exige contar con una fuente de energía estable. En caso de no contar con la misma, una alternativa será acondicionar el equipo con paneles de energía y baterías.

Estos dispositivos, hasta hace algunos años, eran inadecuados técnicamente para ser aplicados como una alternativa de solución para los países en desarrollo debido a su complejidad y elevado costo. Sin embargo, están comenzando a popularizarse debido al uso de nuevos materiales, como el titanio, para la producción de ánodos dimensionalmente estables (DSA ánodos) y a mejoras en las fuentes de energía.

Para que los generadores de hipoclorito de sodio sean eficaces y apropiados para las condiciones existentes en zonas rurales y pueblos pequeños, tienen que:

- | ser económicos;
- | ser sencillos de operar y mantener;
- | ser fiables y duraderos, con producción uniforme;
- | ser capaces de usar sal de mesa (cloruro de sodio) disponible localmente, y
- | tener una capacidad de producción entre 0,5 y 2,0 kg de cloro en un período de 24 horas.

Se han desarrollado dispositivos comerciales en varios países y la OPS/CEPIS ha realizado una evaluación técnica de los más populares. La aplicación de estos sistemas deberá regirse por las características y los requisitos del abastecimiento de agua en consideración.

Instalación y requerimientos

El equipo incluye tanques de disolución. Además es necesario almacenar una reserva de sal, lo que requiere espacio adicional. Aunque los dispositivos para la producción de NaOCl son fáciles de instalar, es preciso tomar precauciones para separarlos de los componentes susceptibles a la corrosión como los controles eléctricos, motores, bombas, reguladores y otros equipos metálicos, ya que el ambiente inmediato a las unidades de producción suele ser muy corrosivo. Las instalaciones deben estar diseñadas de modo que se facilite el manejo de la sal y la transferencia de la solución de hipoclorito de un tanque a otro y al sitio de aplicación. Los locales deben estar bien ventilados.

La eficiencia de los diferentes tipos de equipo para producir hipoclorito de sodio varía un poco. La experiencia indica que se requieren 6 a 10 kilovatios/hora de energía eléctrica para producir un kilogramo de cloro disponible. Esta pequeña cantidad de energía se puede obtener de varias fuentes, como células solares, generadores de energía eléctrica por molino de viento o por energía hidráulica y otras. En todos los casos, la fuente de energía tiene que ser confiable. Una ventaja del sistema para la producción de hipoclorito de sodio *in situ* es que se puede operar en las horas que hay electricidad y almacenar el hipoclorito para usarlo en las horas en que falta la energía eléctrica.

Estos dispositivos son muy seguros porque producen soluciones de hipoclorito de sodio de concentración baja y en cantidades relativamente pequeñas, que en su mayor parte se utiliza de inmediato o en el corto plazo. A pesar del bajo riesgo, es preciso tomar precauciones, en especial cuando se abre la celda electrolítica, ya que puede acumularse cloro gaseoso en ella. En general, deben seguirse las precauciones indicadas para el uso del hipoclorito de sodio.

Operación y mantenimiento

Este tipo de equipo es fiable si se fabrica de materiales resistentes a las propiedades sumamente corrosivas de los productos químicos a ser utilizados y producidos. El mantenimiento tiene que realizarse a intervalos regulares de acuerdo con las especificaciones. Un problema que puede ocurrir con ciertos tipos de dispositivos es la acumulación de depósitos en los electrodos debido a la presencia de calcio y magnesio en la sal. La formación de depósitos puede disminuirse utilizando sal refinada y agua de disolución de buena calidad. Los ablandadores de agua facilitarán esto último. Los ánodos de titanio con revestimiento de óxido de iridio o rutenio generalmente son muy duraderos (entre cuatro y seis años) y los de grafito (que algunos equipos utilizan en vez del titanio) duran alrededor de un año. Los ánodos de titanio se pueden limpiar con una solución de ácido clorhídrico.



Dosificadores y tanques de disolución

Dosificadores de hipoclorito de calcio sólido

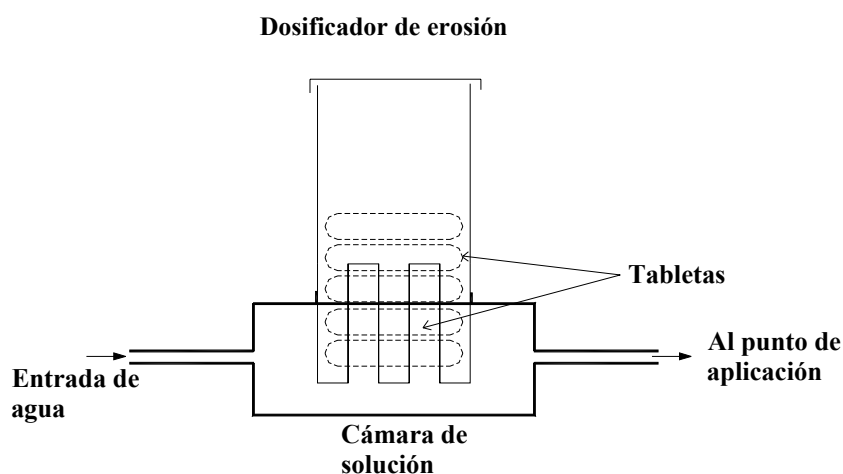
Los dosificadores de hipoclorito de calcio se fabrican para grandes o pequeños caudales. Los primeros son dosificadores volumétricos o gravimétricos, que dejan caer una cantidad medida (en volumen o en peso) en un pequeño tanque de disolución (siempre con agitación) donde se disuelve para ser luego dosificado en el punto de aplicación. El uso de estos equipos no es popular, ya que cuando se requiere tratar grandes caudales se prefiere el uso del cloro gas. Para tratar pequeños caudales (típicos de medianas y pequeñas comunidades) se utilizan equipos que funcionan por medio de la erosión de tabletas o que suministran directamente el hipoclorito de calcio sólido en forma de píldoras.

La concentración de cloro activo en estas presentaciones es entre 65% y 70%, a comparación del hipoclorito de calcio en polvo que solo alcanza 33%, los que se pueden obtener en el mercado bajo diferentes marcas. Sin embargo, hay que tener cuidado de que sean apropiadas para la desinfección de agua para consumo humano y que no contengan sustancias como los cianuratos. Los cianuratos de sodio, que liberan también cloro al ser disueltos en el agua, solo deben usarse en situaciones de emergencia, ya que no existe evidencia suficiente de su inocuidad cuando son utilizadas de forma prolongada.

Dosificador por erosión de tabletas y de píldoras

Los dosificadores que trabajan bajo el sistema por erosión utilizan tabletas de hipoclorito de calcio de alta concentración (HTH), las que se pueden obtener de distribuidores o pueden prepararse localmente comprimiendo mecánicamente polvo de hipoclorito de calcio. Este sistema ha encontrado un lugar importante en la desinfección de abastecimientos de agua para comunidades pequeñas y familiares. Los equipos son muy fáciles de manipular y mantener, además de ser baratos y duraderos. Las tabletas son más seguras que las soluciones de hipoclorito y el cloro gaseoso y son más fáciles de manejar y de almacenar.

Los dosificadores de erosión disuelven gradualmente las tabletas de hipoclorito a una tasa predeterminada mientras fluye una corriente de agua alrededor de ellas. Este mecanismo proporciona la dosificación necesaria de cloro para desinfectar el agua. A medida que las tabletas se van diluyendo, se reemplazan con otras nuevas que caen por gravedad en la cámara. La solución de cloro concentrada alimenta un tanque, un canal abierto o un reservorio, según sea el caso.



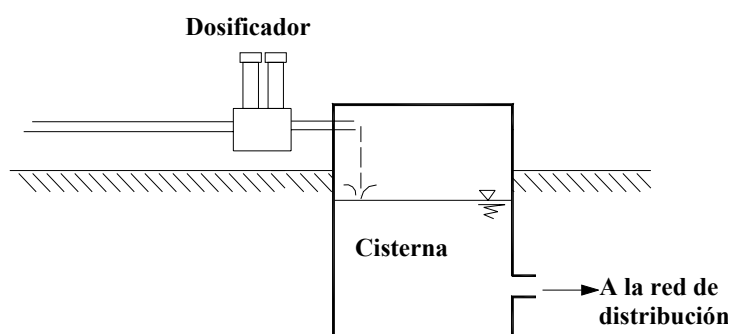
En el mercado se encuentran dosificadores de píldoras para pozos profundos (o tanques de almacenamiento), que suministran las píldoras a una velocidad constante susceptible de regulación. Las píldoras, al sumergirse, se disuelven lentamente, lo que proporciona un cloro residual razonablemente constante. Estos dosificadores se recomiendan solo cuando la operación es continua.



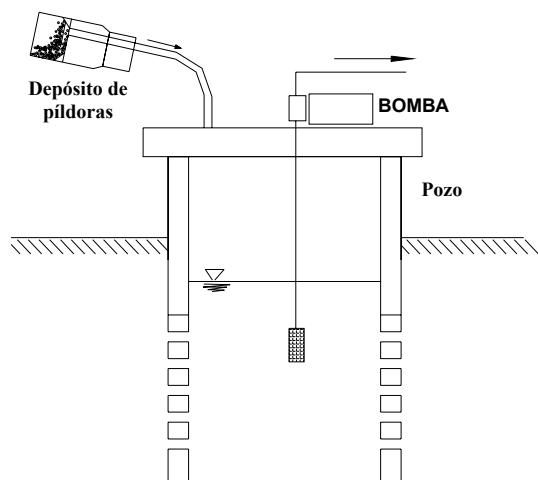
Instalación y requerimientos

La instalación de esta clase de dosificadores requiere una capacitación especializada mínima. En la mayoría de los casos se puede capacitar a un operador y ofrecerle conocimientos básicos de plomería y tuberías. Sin embargo, aunque los dispositivos de dosificación están hechos de materiales no corrosivos y no tienen partes móviles, es preciso prestar atención a las instrucciones del fabricante para asegurar la durabilidad y una operación adecuada de acuerdo con las especificaciones. También se debe prestar atención a la temperatura del agua, ya que de ella depende la solubilidad de las tabletas.

Las figuras ilustran la instalación típica para cloradores por erosión de tabletas y de un dosificador de píldoras..



Instalación típica de un clorador por erosión de Tablet
as de hipoclorito de calcio



Instalación típica de un dosificador de cloro a base de Píldoras de hipoclorito de calcio

El dosificador por erosión de tabletas solo requiere la energía hidráulica necesaria para que corra el agua a través de él. Este tipo de dosificador de cloro ofrece mucha flexibilidad, tanto en la cantidad de cloro como en la ubicación de los puntos de aplicación. Para sistemas más grandes pueden usarse varios dosificadores.

Operación y mantenimiento

Los dosificadores por erosión de tabletas y los de píldoras son sencillos de operar. El equipo se calibra de manera sencilla pero no muy precisa por medio de un ajuste de la profundidad de inmersión de la columna de tabletas o de la velocidad o caudal que se hace pasar por la cámara de disolución. Una vez calibrado el equipo, si no hay grandes variaciones en el flujo, normalmente requieren de poca atención, excepto para cerciorarse de que el depósito esté lleno de tabletas para asegurar la dosificación continua. El mecanismo del dosificador de tabletas se debe inspeccionar con regularidad para detectar obstrucciones; se tendrá cuidado de limpiarlo bien, volver a ponerlo en la posición correcta y calibrarlo. La inspección y el rellenado de tabletas dependerán de la instalación específica, de la dosificación de cloro y del volumen de agua tratada. Debido a la sencillez de operación del equipo, el personal se puede capacitar rápidamente.

En cuanto a la seguridad, en general, las tabletas de hipoclorito son más fáciles y seguras de manejar y almacenar que otros compuestos de cloro; sin embargo, es necesario observar precauciones de seguridad mínimas. Es importante no usar tabletas destinadas a piscinas porque suelen contener isocianurato, un compuesto químico no recomendable para el consumo humano prolongado.

Ventajas y desventajas de los métodos

Se ha preparado el siguiente cuadro para facilitar la comparación de los dosificadores de cloro que se han descrito.

Cuadro comparativo de ventajas y desventajas de los dosificadores de cloro y derivados

Clasificación	Dosificador	Ventajas	Desventajas
Cloro gaseoso	<ul style="list-style-type: none"> Al vacío A presión 	Tecnología generalizada en el mundo. Producción de cloro gaseoso en casi todos los países. Producto químico barato. En el caso del clorador a presión no se requiere de energía eléctrica.	Instalación costosa para pueblos muy pequeños. Necesita equipo auxiliar. El personal necesita capacitación. Si no es operado adecuadamente puede ser peligroso debido a que el gas es venenoso. No es recomendando para sistemas que tratan caudales menos de 500 m ³ /día. En el caso del clorador al vacío requiere de energía eléctrica.
Cloro en solución	Bajo presión atmosférica, de carga constante		
	Tanque con válvula de flotador	Sumamente sencillo de operar y mantener. Muy barato. Pueden construirse localmente. Confiable. No necesita energía eléctrica. Permite dosificaciones para caudales mínimos. Puede usarse en cualquier situación, excepto en pozos tubulares cerrados.	La dosificación no es muy precisa. Error de alrededor de 10%. Exige un control constante debido a la variación de las dosificaciones. El material se puede corroer.
	Tubo con orificio en flotador	Carga constante. Sumamente sencillo. Muy barato. Pueden construirse localmente. Confiable. No necesita energía eléctrica.	Según la manera en que el sistema fue construido, puede llegar a tener un error de dosificación de hasta un 20%.
	Sistema vaso/botella	Sumamente sencillo. Muy barato. Puede construirse localmente. Ideal para comunidades pequeñas. Error de dosificación menor del 10%. No necesita energía eléctrica.	Debe mantenerse limpio.
	Bajo presión positiva o negativa		
	Bomba de diafragma (positiva)	Sumamente confiable. Muy popular. Sencillo de operar. Uno de los pocos sistemas para trabajar bajo presión. Puede introducir la solución directamente en tuberías de agua presurizada hasta con 6.0 kg/cm ² .	El personal debe capacitarse en su operación y mantenimiento. Costo intermedio a elevado para un sistema rural. Requiere energía eléctrica. Debe vigilarse. A veces hay corrosión en el rotor de la bomba debido al cloro.
	Dosificador por succión (negativa)	Muy sencillo. La solución más barata para una alimentación en tuberías presurizadas.	Requiere vigilancia y mantenimiento para evitar obstrucciones en dispositivo Venturi.
	Generador de hipoclorito de sodio <i>in situ</i>	No requiere transporte de productos clorados. Se produce in situ. Sencillo y fácil de operar.	Requiere de agua blanda para que no se acumulen depósitos en los electrodos. Requiere de vigilancia constante y personal entrenado para tomar precauciones de seguridad por la formación de gas cloro. Producción limitada a la capacidad del equipo.
Cloro sólido	Dosificador de erosión	Sumamente sencillo. Ideal para pequeñas comunidades. Una de las mejores soluciones para dosificación a la entrada de un tanque. No necesita energía eléctrica.	Costo intermedio. Alrededor de 10% de errores en la dosificación. Necesita tabletas. En algunos dosificadores las tabletas (si se producen localmente) tienen a adherirse o a formar cavernas y no caen en la cámara de disolución.

Monitoreo de los compuestos de cloro y sus derivados

La medición regular de la cantidad de cloro residual permite controlar el funcionamiento del equipo y la ausencia de contaminación en la red de distribución. Por ello, esta medición resulta imprescindible.

Existen varios métodos para medir el cloro residual en el agua. Dos de los más sencillos se presentan a continuación:

u *Método del dietil-para-fenilendiamina (DPD)*

El cloro libre disponible reacciona instantáneamente con la N-dietil-parafenilendiamina y produce una coloración rojiza, siempre que haya ausencia de yodo. Las soluciones estándar de DPD–permanganato de potasio se usan para producir colores de diversas intensidades. De esta forma, el DPD puede usarse como un método colorimétrico para medir la concentración del cloro residual. El color producido por este método es más estable que el del método de la ortotolidina.

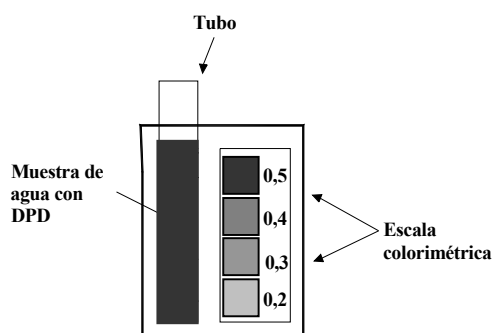
Este método sencillo emplea pastillas de DPD que se disuelven en una muestra de agua con cloro, lo que produce la coloración rojiza que por comparación permite determinar la concentración en mg/l de cloro residual. El dispositivo empleado para este propósito se denomina “comparador de cloro”.

u *Método de la ortotolidina*

La ortotolidina es un compuesto aromático que se oxida en una solución ácida por acción del cloro, cloramidas y otros oxidantes para producir un complejo de color amarillo, cuya intensidad es directamente proporcional a la cantidad de oxidantes presentes. El método es apropiado para la determinación de rutina del cloro residual que no exceda 10 mg/l. La presencia de color natural, turbiedad y nitratos dificultan el desarrollo del color. Debido al hecho demostrado de que la ortotolidina es carcinogénica, se recomienda manipular el producto químico con precaución.

u *Medición de la concentración de cloro*

El cloro deberá ser medido en los siguientes puntos del sistema de abastecimiento de agua:



Comparadores de cloro con el método de O-T y de DPD

- Después de la cloración, a la salida de la planta de tratamiento, para verificar si las cantidades del desinfectante son las correctas.

Es importante tener en cuenta que si en la planta de tratamiento no existe un reservorio de almacenamiento para una mezcla del agua con el desinfectante, el tiempo de contacto entre el cloro y el agua puede ser tan pequeño que la demanda de cloro no sea atendida. En este caso, el valor obtenido puede indicar la presencia de “cloro activo”, pero en los minutos que le siguen, este va a ser consumido por la materia orgánica. Conviene, pues, esperar por lo menos 30 minutos entre la inyección del cloro en el agua y la medición de la concentración residual del desinfectante.

- En el grifo del consumidor más alejado de la planta de tratamiento. Esta medida permite evaluar si hubo o no, contaminación en la red de distribución. Tales mediciones deben ser efectuadas varias veces en el día, todos los días del año.

Costos de equipos y de operación y mantenimiento

Los costos de los equipos varían según la cantidad y tipo de producto químico que se va a usar, el tipo de control (de requerirse alguno) y las necesidades de instalación. En el cuadro correspondiente se aprecian los costos estimados de los equipos.

Los costos de operación y mantenimiento varían según el tipo de producto químico utilizado, el tamaño y la complejidad del equipo. Los fabricantes de equipos proporcionan una lista de los repuestos recomendados que, como mínimo, deben estar disponibles. La mayoría de los fabricantes capacitan al personal de la planta de tratamiento en el mantenimiento y servicio de su equipo. Además, algunos proporcionan un programa de intercambio para que sus equipos reciban mantenimiento en sus instalaciones. Esto permite al personal de operación enviar el equipo a reparación mientras se instala una unidad de repuesto o intercambio para que opere durante el período de reparación.

En general, los costos de la cloración son muy bajos; no obstante, existen diferencias cuando se comparan los costos de cloro gas versus la hipocloración. En muchos lugares del mundo, el costo del gas representa una cuarta o la mitad del costo de una solución equivalente de hipoclorito. Sin embargo, la inversión inicial en un sistema de cloración de gas y los requisitos de instalación y operación generalmente son mayores que en las instalaciones de hipocloración, algunas de las cuales son de costo prácticamente cero. Esto hace que el cloro gaseoso usualmente esté en desventaja económica en aquellos sistemas de abastecimiento de agua muy pequeños.

La experiencia sugiere que el punto de equilibrio del costo entre el gas y la hipocloración sería una tasa de dosificación de aproximadamente 500 a 1.000 mg de cloro al día. Para comunidades de tamaño medio, la selección de gas o de hipocloritos tendrá que estudiarse cuidadosamente, pues las ventajas y desventajas pueden traslaparse y la selección puede que tenga que basarse en factores adicionales. Una consideración importante al seleccionar uno u otro debe ser el nivel de aptitud requerida del operador y la capacidad de la comunidad para costearla. En cada caso se requiere un análisis detallado de todos los factores importantes y de las circunstancias predominantes.

Costos relativos de los distintos sistemas de cloración

Clasificación	Dosificador	Descripción del equipo	Costos de capital en dólares americanos
Cloro gaseoso	Al vacío	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Dosificador de cloro al vacío, instalado en cilindro, con inyector-difusor ▪ Dosificador manual de gas, instalado en recipiente ▪ Dosificador automático de gas, instalado en la pared ▪ Dosificador automático de gas, instalado en gabinete ▪ Bomba de mano para alimentación de compuestos químicos ▪ Bomba automática para alimentación de compuestos químicos ▪ Detector de gas instalado en la pared ▪ Estuche de emergencia tipo A ▪ Estuche de emergencia tipo B ▪ Cilindro de cloro gas de 70kg con válvula ▪ Balanza ▪ Bomba reforzadora y tuberías 	\$900 – 1200 \$2.000 \$4.000 \$6.000 \$1.000 \$3.000 \$2.000 \$1.500 \$2.500 \$350 – 400 \$220 \$250
		Bajo presión atmosférica, de carga constante	
		Tanque con válvula de flotador <ul style="list-style-type: none"> ▪ Hipoclorador con válvula de flotador, el tanque de solución y tuberías ▪ Hipoclorito de sodio por kilogramo de cloro disponible 	\$50 – 80
		Tubo con orificio en flotador <ul style="list-style-type: none"> ▪ Hipoclorador con orificio sumergido de carga constante, el tanque de solución y tuberías ▪ Hipoclorito de sodio por kilogramo de cloro disponible 	\$20 – 60
		Sistema vaso /botella <ul style="list-style-type: none"> ▪ Tanque de solución, tuberías y dispositivo vaso/botella ▪ Hipoclorito de sodio por kilogramo de cloro disponible 	\$10 – 50
		Bajo presión positiva o negativa	
		Bomba de diafragma (positiva) <ul style="list-style-type: none"> ▪ Bomba de diafragma con controles eléctricos, tanque plástico para la solución y tuberías ▪ Hipoclorito de sodio por kilogramo de cloro disponible 	\$700 - 1000
		Dosificador por succión (negativa) <ul style="list-style-type: none"> ▪ Tanque de solución, tuberías y Venturi ▪ Hipoclorito de sodio por kilogramo de cloro disponible 	\$200 – 350
		Generador de hipoclorito de sodio <i>in situ</i> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Celdas con sistemas de regulación eléctrica 	\$500 - 10.000
Cloro sólido	Dosificador de erosión	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Dispositivos dosificadores por erosión 	\$150 – 400

Fuentes de información

Christman, K. *Cloro*. Trabajo presentado en el Simposio OPS: Calidad de Agua, Desinfección Efectiva (1998). Publicado también en CD-Rom. Disponible en la OPS/CEPIS.

Góngora, J. *Sistemas de desinfección por medios hidráulicos para agua potable rural. Experiencia colombiana*, Trabajo presentado en la Publicación CEPIS “Investigación sobre desinfección de agua en abastecimientos rurales” (1983).

OPS. *La desinfección del agua*. Publicación OPS/HEP/99/32 (1999).

OPS/ILSI. *La calidad del agua en América Latina. Ponderación de los riesgos microbiológicos contra los riesgos de los subproductos de la desinfección química*, ILSI Press, Washington DC (1996).

Reiff, F. *Disinfection practices in developing areas*. Trabajo presentado en el Curso NSF sobre Desinfección de Aguas en Washington DC (1998).

Reiff, F.; Witt, V. *Guía para la selección y aplicación de tecnologías de desinfección del agua para consumo humano en pueblos pequeños y comunidades rurales en América Latina y el Caribe*. Documento OPS/OMS, Serie Técnica No. 30 (1995).

Rojas, R., Guevara, S. *Celdas electrolíticas para producción in situ de hipoclorito de sodio*; Publicación CEPIS/GTZ (1999).

Solsona, F. *Investigación sobre desinfección de agua para abastecimientos rurales en Argentina*. Trabajo presentado en la Publicación CEPIS “Investigación sobre Desinfección de agua en abastecimientos rurales” (1983).

Solsona, F. *Water disinfection for small community supplies*, Capítulo de desinfección del agua para el manual del IRC “Small Community Supplies” y disponible como separata en la OPS/CEPIS (2001).

Solsona, F. *Disinfection for small water supplies; technical guide*. Publicación CSIR, Sud Africa (1990).

White, C. *Handbook of chlorination*, Van Nostrand Reinhold (1972).

WHO/WRC. *Disinfection of rural and small community water supplies* (1989).

Capítulo 4

RADIACIÓN ULTRAVIOLETA



Introducción

Aunque la radiación ultravioleta (o luz ultravioleta o UV) no es popular en el tercer mundo, es el único método físico práctico que puede usarse para la desinfección del agua en comunidades pequeñas (con sistema centralizado de agua). Las aplicaciones prácticas de la radiación ultravioleta comenzaron en 1901 cuando se consiguió producir esta luz artificialmente. Esta técnica se consideró para la desinfección del agua de bebida cuando se comprobó que el cuarzo era una de los pocos materiales casi totalmente transparente a la radiación ultravioleta, lo que permitió la envoltura protectora de los tubos. Los primeros intentos experimentales se llevaron a cabo en Marsella, Francia, en 1910. Entre 1916 y 1926, se usó UV en los Estados Unidos para la desinfección del agua y para proveer agua potable a los barcos. Sin embargo, la popularidad del cloro y sus derivados, asociados a su bajo costo de aplicación, hicieron que se retardara la producción de equipos hasta la década de 1950 y más aún hasta la de 1970 en que las lámparas comienzan a ser confiables y de vida prolongada.

La aparición de los subproductos de la desinfección (SPD), sobretudo aquellos asociados a la desinfección con cloro, hicieron que numerosos sistemas pasaran de éste a la UV. Al comienzo del siglo XXI, en Europa existen unos 2.000 sistemas de aguas desinfectados con UV, y una planta en Alemania (Wahnachtalsperrenverband), trata nada menos que un caudal de 329.000 m³/día.

La gran ventaja en relación con los SPD se contrabalancea con su notoria desventaja: la radiación UV no otorga ningún residual al agua tratada para hacer frente a eventuales futuras contaminaciones en las redes de distribución o en las viviendas.

A pesar de esto último, la desinfección con radiación ultravioleta se ha venido utilizando ampliamente en los sistemas de abastecimiento de agua de pequeños establecimientos, como hospitales, industrias de alimentos y bebidas y hoteles. Recientemente se ha incrementado su uso para la desinfección de efluentes de plantas de tratamiento de aguas servidas y ha vuelto a recibir atención como desinfectante de pequeños sistemas de agua, debido a su capacidad de desinfectar sin producir cambios físicos o químicos notables en el agua tratada. Existe en el mercado una gama de equipos para grandes plantas de tratamiento de agua hasta un pequeño artilugio que cabe en una mano y que los caminantes usan para desinfectar aguas de lagos y ríos.

Propiedades de la radiación ultravioleta

La radiación ultravioleta se caracteriza por longitudes de onda muy cercanas a las de la luz del sol. Los parámetros más importantes de la radiación UV relacionados con la desinfección del agua son:

- | *Longitud de onda:* El rango germicida se encuentra entre 240 y 280 nm (nanómetros) y se obtiene la máxima eficiencia desinfectante cerca de los 260 nm. Estos límites se encuentran dentro del rango denominado *ultravioleta - C* (100-280 nm), que se diferencia del *ultravioleta - A* (315-400 nm) y del *ultravioleta - B* (280-315 nm).
- | *Calidad del agua:* La temperatura del agua tiene poca o ninguna influencia en la eficacia de la desinfección con luz ultravioleta, pero afecta el rendimiento operativo de la lámpara de luz ultravioleta, cuando la misma está inmersa en el agua. La energía ultravioleta es absorbida por el agua, pero en mucho mayor grado es absorbida por los sólidos en suspensión o disueltos, turbiedad y color. En el agua para consumo humano, la concentración de los

sólidos en suspensión es generalmente inferior a 10 ppm, nivel al que empieza a experimentar problemas con la absorción de la luz ultravioleta. La turbiedad debe ser tan baja como sea posible y en todo caso, deben evitarse turbiedades mayores de 5 UTN.

- | *Intensidad de la radiación:* A menor distancia del agua respecto al punto de emisión de los rayos, mayor será la intensidad de los mismos y por tanto la desinfección será más eficiente. Con respecto a esta condición, existe una regla general que dice que no debe haber más de 75 mm de profundidad de agua para asegurar que cada porción de la misma sea alcanzada por los rayos adecuadamente.
- | *Tipo de microorganismos:* La radiación ultravioleta se mide en microvatios por centímetro cuadrado ($\mu\text{W}/\text{cm}^2$) y la dosis en microvatios segundo por centímetro cuadrado ($\mu\text{Ws}/\text{cm}^2$) (radiación x tiempo). La resistencia al efecto de la radiación dependerá del tipo de microorganismo. No obstante, la dosificación de luz ultravioleta requerida para destruir los microorganismos más comunes (coliformes, pseudomonas, etc.) varía entre 6.000 y 10.000 $\mu\text{Ws}/\text{cm}^2$. Las normas para la dosificación de luz ultravioleta en diferentes países varían entre 16.000 y 38.000 $\mu\text{Ws}/\text{cm}^2$.
- | *Tiempo de exposición:* Como cualquier otro desinfectante, el tiempo de exposición es vital para asegurar un buen desempeño. No es fácil determinar con exactitud el tiempo de contacto (ya que éste depende del tipo de flujo y de las características del equipo), pero el período debería estar relacionado con la dosificación necesaria (recordar la explicación y el concepto del $C \times T$). De cualquier modo, las exposiciones normales son del orden de 10 a 20 segundos.

Para un grado determinado de inactivación de microorganismos, el tiempo requerido de exposición del agua a la luz ultravioleta es inversamente proporcional a la intensidad de la luz que penetra el agua, teniendo en cuenta la capacidad de absorción del agua y la dispersión de la luz debido a la distancia.

El método de desinfección es sencillo, consiste en poner en contacto el flujo de agua con una lámpara ultravioleta, de tal manera que la radiación UV actúe sobre los microorganismos del agua bajo las condiciones arriba expuestas con el consecuente efecto desinfectante.

Mecanismos de la desinfección por radiación ultravioleta

El mecanismo de desinfección se basa en un fenómeno físico por el cual las ondas cortas de la radiación ultravioleta inciden sobre el material genético (ADN) de los microorganismos y los virus, y los destruye en corto tiempo, sin producir cambios físicos o químicos notables en el agua tratada.

Se cree que la inactivación por luz ultravioleta se produce mediante la absorción directa de la energía ultravioleta por el microorganismo y una reacción fotoquímica intracelular resultante que cambia la estructura bioquímica de las moléculas (probablemente en las nucleoproteínas) que son esenciales para la supervivencia del microorganismo. Está demostrado que independientemente de la duración y la intensidad de la dosificación, si se suministra la misma energía total, se obtiene el mismo grado de desinfección.

En el cuadro de la página siguiente se muestran valores reportados por varias fuentes de dosis de energía ultravioleta para eliminar algunos micro-organismos. Estos dan una idea del rango y orden de la magnitud de la exposición.

La mayoría de los equipos de desinfección ultravioleta utilizan una exposición mínima (en el agua) de 30.000 $\mu\text{Ws}/\text{cm}^2$. Esto es adecuado para inactivar las bacterias y virus patógenos, pero quizá no sea suficiente para ciertos protozoos patógenos, quistes de protozoos y huevos de nemátodos, que pueden requerir hasta 100.000 $\mu\text{Ws}/\text{cm}^2$ para su inactivación total.

Radiación de energía ultravioleta necesaria para destruir hasta en un 99.99% de los microorganismos patógenos del agua

BACTERIAS	ENERGIA $\mu\text{W}/\text{cm}^2$	OTROS ORGANISMOS	ENERGIA $\mu\text{W}/\text{cm}^2$
Bacillus anthracis	8.700		
S. enteritidis	7.600		
B. Megatherium sp.(veg)	2.500	LEVADURA	
B. Megatherium sp.(sporas)	5.200		
B. peratyphosus	6.100	Saccharomyces ellipsoideus	13.200
B. subtilis	11.000	Saccharomyces sp.	1.600
B. subtilis spores	22.000	Saccharomyces cerevisiae	13.200
Clostridium tetani	22.000	Levadura para cerveza	660
Corynebacterium diphtheriae	6.500	Levadura para panadería	800
Eberthella typosa	4.100	Levadura para repostería	13.200
Escherichia coli	6.600		
Micrococcus candidus	12.300	ESPORAS	
Mycobacterium tuberculosis	10.000		
Neisseria catarrhalis	8.500	Penicillium roqueforti	26.400
Phytomonas tumefaciens	500	Penicillium expansum	22.000
Proteus vulgaris	6.600	Mucor racemosus A	35.200
Pseudomonas aeryginosa	10.500	Mucor racemosus B	5.200
Pseudomonas fluorescens	6.600	Oospora lactis	1.100
S. typhimurium	15.200		
Salmonella	10.000	VIRUS	
Sarcina lutea	26.400		
Serratia marcescens	6.160	Bacteriophage (E. coli)	6.600
Dysentery bacilli	4.200	Virus de la influenza	6.600
Shigella paradysenteriae	3.400	Virus de la hepatitis	8.000
Spirillum rubrum	6.160	Poliovirus(Poliomyelitis)	1.000
Staphylococcus alous	5.720	Rotavirus	24.000
Staphylococcus aureus	6.600		
Streptococcus hemolyticus	5.500	ALGAS	
Streptococcus lactis	8.800		
Streptococcus viridans	3.800	Chlorella vulgaris	2.000
Vibrio cholerae	6.500		

Sub productos de la desinfección con rayos ultravioleta

Como se ha expresado, la luz ultravioleta tiene la capacidad de tratar el agua sin producir cambios físicos o químicos considerables en el agua tratada. No se conoce que haya efectos directos adversos sobre la salud de los consumidores de agua desinfectada con luz ultravioleta. En el proceso de desinfección no se le agrega ninguna sustancia al agua, por lo que no hay riesgos de formación de SPD y la luz ultravioleta no altera el sabor ni el olor del agua tratada. A la dosificación y

frecuencia utilizada para la desinfección, no se conoce que exista la formación de derivados. La sobredosis de luz ultravioleta tampoco resulta en ningún efecto nocivo. No obstante, el operador del equipo de desinfección con luz ultravioleta debe usar anteojos y ropa protectora para evitar exponerse a la radiación de alta energía, característica de la luz ultravioleta.

Equipos

La luz ultravioleta se produce por medio de lámparas de vapor de mercurio de alta y baja presión, siendo más populares las últimas. Se asemejan a las conocidas lámparas fluorescentes. En realidad, las lámparas ultravioletas son elaboradas por las grandes empresas que fabrican las lámparas fluorescentes estándar. En consecuencia, las lámparas, los balastos y los arrancadores para los sistemas ultravioletas pueden comprarse en tiendas comerciales, salvo las que tengan dimensiones excepcionales.

Las lámparas raras veces se queman, pero generalmente se cambian después de que han perdido 25% a 30% de la luz ultravioleta que emitían cuando eran nuevas. Estas lámparas tienen una duración de 10.000 horas, lo que en términos prácticos y teniendo en cuenta el recambio cuando ha descendido su intensidad a 70-75 %, significa una vida útil de nueve meses a un año de trabajo sin interrupción.

Como se ha mencionado, la desinfección del agua con luz ultravioleta puede lograrse con longitudes de onda de luz entre 240 y 280 nm y se obtiene la máxima eficiencia germicida a los 260 nm. Las lámparas de arco de mercurio a baja presión que se encuentran en el mercado producen una longitud de onda de luz ultravioleta cerca de 254 nm.

El mecanismo que usa la lámpara ultravioleta es sencillo: dentro de la lámpara, que es un tubo hecho de cuarzo o sílice, un arco eléctrico golpea una mezcla de vapor de mercurio y argón que hay en el interior. Cuando la corriente eléctrica golpea la mezcla, el argón no participa, ya que su función es solo ayudar a arrancar la lámpara, extender la vida del electrodo y reducir las pérdidas, pero las moléculas del mercurio se excitan y cuando los electrones de las órbitas externas descienden a órbitas de menor nivel energético, emiten la energía sobrante en forma de radiación ultravioleta.

Los arrancadores tienen la misión de producir una descarga fuerte que genera la primera ionización del gas. Establecen un cortocircuito sobre la lámpara, que precalienta los electrodos, interrumpe luego bruscamente la corriente, lo que origina en la reactancia inductiva del balasto un pico de alta tensión que inicia el arco. Los balastos fijan la corriente de operación (y por consiguiente la tensión) de la lámpara, presentan una alta impedancia hacia la red en el momento de arranque y producen una resistencia óhmica baja, de manera que las pérdidas de potencia (calor generado) sean mínimas. En una palabra, el balasto es un elemento que ordena el flujo de electrones dentro del tubo. Es como un policía ordenando el tránsito.

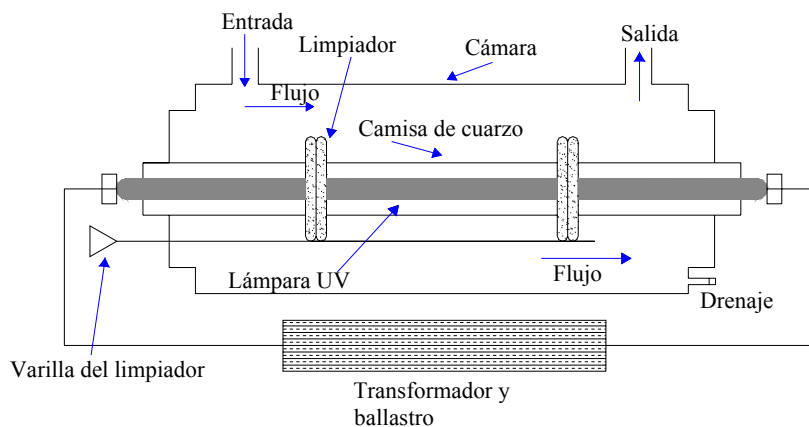
Hay dos tipos básicos de cámaras de exposición del agua a la radiación ultravioleta. Aquellas en las que las lámparas están sumergidas en el agua y las que están fuera del agua. En las unidades de luz ultravioleta de lámparas sumergidas, se debe proveer un espacio aislado donde se ubica la lámpara, lo que se logra rodeando la misma con una camisa de cuarzo que es un material transparente a los rayos. Solo el cuarzo presenta esa característica, y de los plásticos, solo el PTFE (Teflón) es parcialmente transmisible.

En el segundo tipo, las lámparas están suspendidas sobre el agua que se está tratando, en forma casi rasante con el agua.

Un sistema moderno de desinfección ultravioleta puede incluir lo siguiente:

- | Una cámara de exposición de material anticorrosivo, el cual alberga el sistema.
- | Lámparas ultravioleta.
- | Limpiadores mecánicos, limpiadores ultrasónicos u otros mecanismos de auto limpieza.
- | Censores conectados a sistemas de alarma para el monitoreo de la intensidad de la luz ultravioleta.
- | Interruptor de velocidad en caso de que se presenten velocidades de flujo altas o bajas, intensidades altas o bajas o temperaturas anormales en los componentes del sistema.
- | Monitores de lámpara apagada.
- | Balastos eléctricos.

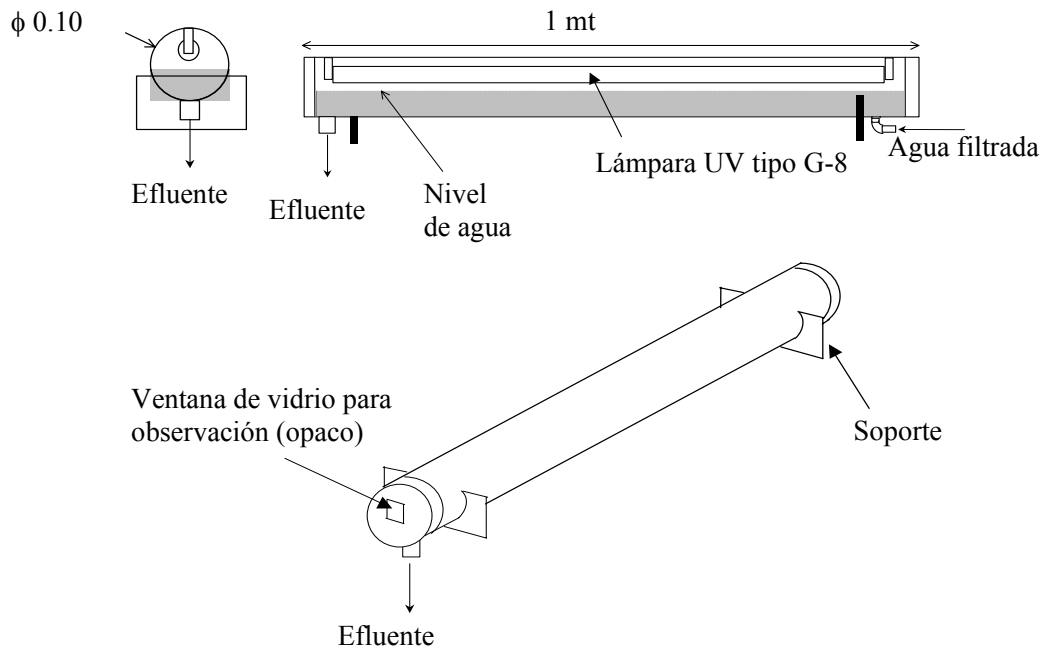
Una consideración importante en el diseño del equipo de desinfección es asegurarse de que cada microorganismo reciba la dosis biocida de radiación en la cámara de contacto. Esto se logra determinando el espacio correcto entre las lámparas y las superficies reflectoras del interior de la cámara y agitando adecuadamente el agua cuando pasa por la cámara. El equipo ultravioleta con lámparas sumergidas puede tener una de las dos configuraciones básicas de flujo del agua: paralelo o perpendicular a la longitud de las lámparas. Si el flujo es perpendicular, las propias lámparas y camisas pueden producir la turbulencia necesaria para asegurar que toda el agua quede expuesta a la dosis biocida. Cuando el flujo es paralelo a la longitud de las lámparas, es necesario utilizar mezcladores estáticos (pantallas) para proporcionar la turbulencia necesaria.



Instalación típica de un equipo de radiación UV con lámpara sumergida

Vista frontal

Vista lateral



Instalación típica de un equipo de radiación UV con lámpara fuera del agua



Conducto sobre el que se colocarán las lámparas UV para desinfección del agua. El diseño de las pantallas dentro del conducto sirve para asegurar que el flujo de agua a ser desinfectada se deslizará con un frente homogéneo y asegurará que toda el agua tenga igual irradiación.

Instalación y requerimientos

La instalación del equipo ultravioleta típico se muestra en la figura correspondiente. La lámpara en este caso se encuentra dentro de encamisado protector hecho de cuarzo. Con los sistemas antiguos era difícil mantener la lámpara o las camisas limpias, debido a los depósitos de carbonato de calcio, sedimentos, materiales orgánicos o hierro, que reducían la penetración y el poder germicida. Ahora casi todos los sistemas tienen limpiadores de encamisados que reducen el problema.

Un requisito infaltable es la energía eléctrica. Su consumo varía en función de la calidad del agua a tratar; resulta óptimo un consumo de 22 vatios/hora por cada metro cúbico de agua tratada. Como la luz ultravioleta no deja efecto residual, se requiere que la fuente de energía sea sumamente fiable durante todo el tiempo que el agua esté fluyendo por la unidad de desinfección. En comunidades donde la electricidad no sea confiable, se debe instalar una fuente de energía de emergencia independiente para asegurar la continuidad de la desinfección en todo momento.

El equipo puede ser instalado tanto en el exterior como en un recinto protegido de los elementos del clima y del vandalismo. En el último caso, el recinto sirve también para proteger el equipo de temperaturas extremas u otras condiciones que pudieran dañarlo o afectar su funcionamiento.



Sistema de tubos paralelos al flujo instalado en una planta potabilizadora

El espacio requerido para el equipo de desinfección ultravioleta es bastante pequeño porque el tiempo necesario de contacto/exposición es muy breve. Si bien el equipo es uno de los que ocupa menos espacio dentro de los diferentes equipos de desinfección, se recomienda dejar un espacio adecuado para cambiar las lámparas y otro para almacenar un número de lámparas suficiente para dos años de operación.

Operación y mantenimiento

Los requerimientos en cuanto a operación y mantenimiento de los sistemas de desinfección ultravioleta son mínimos, pero cruciales para un rendimiento adecuado. Es preciso asegurar que las camisas de cuarzo o la tubería de teflón estén libres de sedimentos u otros depósitos que atenúen la radiación, pues podría ocurrir deposición de partículas. En los sistemas pequeños, la limpieza generalmente se hace a mano, limpiando la camisa de cuarzo una vez al mes como mínimo y en circunstancias excepcionales, dos o tres veces por semana.

Las lámparas se deben cambiar a intervalos necesarios para garantizar por lo menos 30.000 microvatios-segundo/cm² de área de exposición en todo momento. Esta variará de una lámpara a

otra, pero en general están programadas para el intervalo promedio cuando su intensidad disminuye a menos de 70% de su potencial nominal. En aguas muy frías pueda que haya que cambiar las lámparas con mayor frecuencia.

Como la luz ultravioleta no deja residual de desinfectante alguno, es indispensable desinfectar muy bien todo el sistema con un desinfectante químico apropiado antes de activar por primera vez una unidad de desinfección ultravioleta. Si hay alguna contaminación externa en el sistema de distribución debido a sifonaje de retorno o a una conexión cruzada, también habrá que remediarla y desinfectarla químicamente antes de ponerlo a funcionar.

Monitoreo

La única manera confiable de determinar la eficiencia biocida de la desinfección ultravioleta es mediante un muestreo del agua tratada y análisis microbiológicos para determinar el contenido de microorganismos indicadores. Con una celda fotoeléctrica también se puede medir la intensidad de la exposición de uno o varios puntos estratégicos dentro de la cámara de exposición, pero esto no necesariamente significa que todos los microorganismos han recibido una dosis de luz ultravioleta suficiente para asegurar su inactivación o muerte. En todo caso, este tipo de monitoreo de la intensidad de luz ultravioleta debe ser continuo y la dosis debe ser adecuada para que garantice una exposición suficiente en todo momento en las condiciones esperadas de calidad y flujo del agua.

Desde el punto de vista práctico, se precisa cierto nivel de automatización y complejidad en el sistema de monitoreo, que debe incluir monitores de los sensores ultravioleta que indiquen visualmente si existen los niveles de luz ultravioleta necesarios para lograr la desinfección. El sistema de control debe dejar que las lámparas UV se calienten por lo menos cinco minutos antes de empezar el tratamiento del agua. Para los sistemas que tratan flujos variables de agua, el sistema de control debe poder encender y apagar lámparas para poder alcanzar la dosis necesaria en función al flujo. También es recomendable tener un sensor que pueda cortar automáticamente el flujo de agua en cualquier momento que el sistema ultravioleta no pueda producir la dosificación adecuada para la desinfección.

Ventajas y desventajas

Las ventajas empiezan con la sencillez de la operación y mantenimiento. Otra gran ventaja de la desinfección con luz ultravioleta es que no se requieren productos químicos. Asimismo, el tiempo de exposición requerido es muy corto en comparación con la duración del contacto necesario para los desinfectantes químicos convencionales, por lo que no requiere de tanques de contacto. También es una ventaja su eficacia para aniquilar una gran variedad de microorganismos. Estos factores son especialmente importantes en la desinfección del agua. Por otro lado, no cuenta con partes móviles que se desgasten. El agua no requiere tratamiento previo, salvo filtración en caso de aguas turbias. Presenta costos reducidos de operación. Además, presenta una gama tan grande de equipos que van desde la gran planta de tratamiento hasta el nivel familiar. Esto último hay que tenerlo en cuenta, ya que los programas de desinfección del agua en el nivel familiar no solo pueden ser cubiertos con tecnología de hipoclorito *in situ*, sino también con la radiación ultravioleta.

En oposición, una desventaja es la notable reducción de la eficiencia cuando aumenta la turbiedad o el color del agua, debido a que los microorganismos pueden protegerse de los efectos de la luz ultravioleta en las partículas en suspensión. Otra desventaja es la dificultad de medir la eficacia de la desinfección, excepto si se hace un análisis microbiológico para determinar la presencia de organismos indicadores después del tratamiento con luz ultravioleta, lo que resulta difícil en áreas rurales muy alejadas.

Sin embargo y tal como se ha expresado, la gran desventaja del método es que la luz ultravioleta no proporciona residuales. Esto quiere decir que después de la desinfección por este sistema hay que aplicar un compuesto químico para garantizar la seguridad microbiológica del agua durante todo su trayecto por la red de distribución y aun para cuando se almacena en las viviendas.

La amenaza de una nueva contaminación o recrudescimiento de bacterias en un sistema de distribución de agua son razones imperiosas que han cuestionado el uso generalizado de la desinfección con luz ultravioleta sin añadir un desinfectante secundario que proporcione un residual eficaz. La eficacia dudosa de los rayos ultravioleta contra algunos de los quistes de protozoos y huevos de nematodos patógenos requiere que las aguas superficiales reciban filtración u otro tratamiento para su remoción antes de la desinfección con rayos ultravioletas. La desinfección con luz ultravioleta suele ser más costosa que los métodos convencionales de desinfección. El uso de este método de desinfección solamente, sin un desinfectante secundario, se recomendaría cuando la desinfección es preventiva; cuando la fuente de agua es fiable, con una turbiedad menor a 1 UTN, y cuando hay pocas posibilidades de contaminación del agua en el sistema después del tratamiento ultravioleta. En todos los demás casos debe agregarse un desinfectante secundario.

En resumen:

Ventajas	Sencillo. Eficiente. Ningún producto químico involucrado. No modifica las características estéticas del agua. Puede ser administrado por personal no calificado.
Desventajas	Los costos del equipo son algo mayores si se compara con los dosificadores de solución de cloro. El agua debe ser muy transparente. Se necesita energía eléctrica. No hay efecto residual.
Consejos para la operación y mantenimiento	Debe haber control para asegurar que no haya incrustación en los encamisados de protección. Estos deben recibir atención constante para eliminar tales incrustaciones.

Costos

Los sistemas de UV tienen variadas características y complejidad. El corazón del sistema es la lámpara (o lámparas); y sin embargo, ese elemento es el que menos incide en el costo total de un equipo completo de desinfección por radiación ultravioleta.

Ante el requerimiento de un presupuesto para desinfectar un agua cruda destinada al consumo humano con un caudal de 6.000 m³/día, una firma pudo presupuestar desde el razonable precio de US\$ 50.000 hasta el de medio millón de dólares. ¡Diez veces más! Tal diferencia de precios está dada por la disparidad que existe entre la modestia de un equipo básico y simple y la parafernalia de elementos auxiliares que acompañan al equipo sofisticado.

Cuando se participe en la preparación de términos de referencia para la compra de equipos de desinfección por UV, habrá que tener cuidado en balancear adecuadamente la capacidad, seguridad en todos los aspectos de la operación del equipo, con lo que no es tan necesario, lo que es supletorio o suntuario.

Al margen del dato de costos explicitado en el párrafo anterior, los equipos de menor porte, por ejemplo para tratar 100 m³/día (1.000 habitantes) pueden tener un costo de US\$ 300, lo que significa un costo per cápita de 0,3 \$/habitante. El costo de operación para este sistema está calculado en 0,02 \$/m³. Se considera que para el nivel casero, los costos de operación y de capital amortizados pueden estar en el rango de US\$ 10 a \$ 100 por año y por familia.

Fuentes de información

AQUAMARKET, Boletín sobre luz ultravioleta, www.aguamarket.com

Parrotta, M.; Bekdash, F. *UV Disinfection for small groundwater supplies*, J.AWWA Vol 90 (1998).

Reiff, F.; Witt, V. *Guía para la selección y aplicación de tecnologías de desinfección del agua para consumo humano en pueblos pequeños y comunidades rurales en América Latina y el Caribe*. Documento OPS/OMS, Serie Técnica No. 30 (1995).

Solsona, F. *Water disinfection for small community supplies*. Capítulo de desinfección de aguas para el manual del IRC “Small Community Supplies” y disponible como separata en la OPS/ CEPIS (2001).

World Bank, *Development Marketplace Competition*. (2000).

Wright, H.B.; Cairns, W.L. *Desinfección de agua por medio de luz ultravioleta*. Trabajo presentado en los Anales simposio OPS: Calidad de agua, Desinfección efectiva (1998). Publicado también en CD-Rom. Disponible en la OPS/CEPIS.

Capítulo 5

FILTRACIÓN LENTA



Introducción

La filtración lenta en arena (FLA) es el sistema de tratamiento de agua más antiguo del mundo. Copia el proceso de purificación que se produce en la naturaleza cuando el agua de lluvia atraviesa los estratos de la corteza terrestre y forma los acuíferos o ríos subterráneos. El filtro lento se utiliza principalmente para eliminar la turbiedad del agua, pero si se diseña y opera convenientemente puede ser considerado como un sistema de desinfección del agua.

A diferencia de la filtración rápida en arena, en la que los microorganismos se almacenan en los intersticios del filtro hasta que se vierten nuevamente en la fuente por medio del retrolavado, la FLA consiste en un conjunto de procesos físicos y biológicos que destruye los microorganismos patógenos del agua. Ello constituye una tecnología limpia que purifica el agua sin crear una fuente adicional de contaminación para el ambiente.

Básicamente, un filtro lento consta de una caja o tanque que contiene una capa sobrenadante del agua que se va a desinfectar, un lecho filtrante de arena, drenajes y un juego de dispositivos de regulación y control.



Filtro lento de arena en una zona rural

➤ *Propiedades y descripción de la desinfección mediante filtración lenta*

El filtro lento se caracteriza por ser un sistema sencillo, limpio y a la vez eficiente para el tratamiento de agua. Comparado con el filtro rápido, requiere de áreas más grandes para tratar el mismo caudal y, por lo tanto, tiene mayor costo inicial. Sin embargo, su simplicidad y bajo costo de operación y mantenimiento lo convierte en un sistema ideal para zonas rurales y pequeñas comunidades, teniendo en cuenta además que los costos por área de terreno son comparativamente menores en estas zonas.

La filtración lenta, como se ha mencionado, es un proceso que se desarrolla en forma natural, sin la aplicación de ninguna sustancia química, pero requiere un buen diseño, así como una apropiada operación y cuidadoso mantenimiento para no afectar el mecanismo biológico del filtro ni reducir la eficiencia de remoción microbiológica.

Huisman & Wood describieron en 1974 el método de desinfección por medio de la filtración lenta, como la circulación del agua cruda a baja velocidad a través de un manto poroso de arena. Durante el proceso, las impurezas entran en contacto con la superficie de las partículas del medio filtrante y son retenidas, desarrollándose adicionalmente procesos de degradación química y

biológica que reducen la materia retenida a formas más simples, las cuales son llevadas en solución o permanecen como material inerte hasta un subsecuente retiro o limpieza.

El agua cruda que ingresa a la unidad permanece sobre el medio filtrante tres a doce horas, dependiendo de las velocidades de filtración adoptadas. En ese tiempo, las partículas más pesadas que se encuentran en suspensión se sedimentan y las partículas más ligeras se pueden aglutinar, lo que facilita su remoción posterior. Durante el día, bajo la influencia de la luz solar, se produce el crecimiento de algas, las cuales absorben bióxido de carbono, nitratos, fosfatos y otros nutrientes del agua para formar material celular y oxígeno. El oxígeno así formado se disuelve en el agua, entra en reacción química con las impurezas orgánicas y hace que éstas sean más asimilables por los microorganismos.

En la superficie del medio filtrante se forma una capa constituida por material de origen orgánico, conocida con el nombre de “schmutzdecke” o “piel de filtro”, a través de la cual tiene que pasar el agua antes de llegar al propio medio filtrante. El schmutzdecke o capa biológica está formado principalmente por algas y otras numerosas formas de vida, como plankton, diatomeas, protozoarios, rotíferas y bacterias. La acción intensiva de estos microorganismos atrapa, digiere y degrada la materia orgánica contenida en el agua. Las algas muertas, así como las bacterias vivas del agua cruda son también consumidas en este proceso. Al mismo tiempo que se degradan los compuestos nitrogenados se oxigena el nitrógeno. También se remueve algo de color y una considerable proporción de partículas inertes en suspensión es retenida por cernido.

Una vez que el agua pasa a través del schmutzdecke, entra al lecho filtrante y es forzada a atravesarlo en un proceso que normalmente toma varias horas y en el que se desarrollan diversos procesos físicos y biológicos que constituyen el proceso final de purificación.

Mecanismos de la desinfección mediante filtración lenta

En el proceso de filtración lenta actúan varios fenómenos o mecanismos físicos similares a los de la filtración rápida previos al mecanismo biológico que desinfecta el agua, algunos de los cuales hemos mencionado líneas arriba. Estos mecanismos son muy importantes, dado que permiten la concentración y adherencia de las partículas orgánicas al lecho biológico para su biodegradación

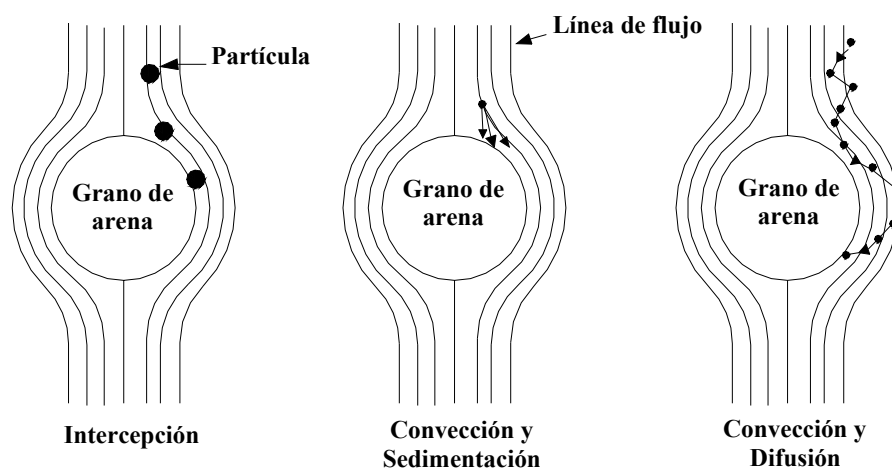
A continuación se describe brevemente la función de cada uno de los mecanismos físicos o de remoción que se producen en la filtración lenta, así como el mecanismo biológico responsable de la desinfección.

1. Mecanismos de transporte

Esta etapa de remoción básicamente hidráulica ilustra los mecanismos mediante los cuales ocurre la colisión entre las partículas y los granos de arena. Estos mecanismos son: cernido, intercepción, sedimentación, difusión y flujo intersticial.

- 1 Cernido: En este mecanismo, las partículas de mayor tamaño que los intersticios del material filtrante son atrapadas y retenidas en la superficie del medio filtrante.
- 1 Intercepción: Mediante este mecanismo las partículas pueden colisionar con los granos de arena.

- | Sedimentación: Este mecanismo permite que las partículas sean atraídas por la fuerza de gravedad hacia los granos de arena, lo que provoca su colisión. Este fenómeno se incrementa apreciablemente por la acción de fuerzas electrostáticas y de atracción de masas.
- | Difusión: Se produce cuando la trayectoria de la partícula es modificada por micro variaciones de energía térmica en el agua y los gases disueltos en ella, lo cual puede provocar su colisión con un grano de arena.
- | Flujo intersticial: Este mecanismo se refiere a las colisiones entre partículas debido a la unión y bifurcación de líneas de flujo que devienen de la tortuosidad de los intersticios del medio filtrante. Este cambio continuo de dirección del flujo crea mayor oportunidad de colisión.



Mecanismos de transporte

2. Mecanismo de adherencia

Este mecanismo es el que permite remover las partículas que, mediante los mecanismos arriba descritos, han colisionado con los granos de arena del medio filtrante. La propiedad adherente de los granos de arena es proporcionada por la acción de fuerzas eléctricas, acciones químicas y atracción de masas así como por película biológica que crece sobre ellos, y en la que se produce la depredación de los microorganismos patógenos por organismos de mayor tamaño tales como los protozoarios y rotíferas.

3. Mecanismo biológico de la desinfección

Como se indicó anteriormente, la remoción total de partículas en este proceso se debe al efecto conjunto del mecanismo de adherencia y el mecanismo biológico. Es necesario que para que el filtro opere como un verdadero “sistema de desinfección” se haya producido un *schmutzdecke* vigoroso y en cantidad suficiente. Solo cuando se ha llegado a ese punto, el FLA podrá operar correctamente. Entonces se dice que el filtro (o el manto) “está maduro”.

Al iniciarse el proceso, las bacterias depredadoras o benéficas transportadas por el agua utilizan como fuente de alimentación el depósito de materia orgánica y pueden multiplicarse en forma selectiva, lo que contribuye a la formación de la película biológica del filtro. Estas bacterias

oxidan la materia orgánica para obtener la energía que necesitan para su metabolismo (desasimilación) y convierten parte de ésta en material necesario para su crecimiento (asimilación). Así, las sustancias y materia orgánica muerta se convierten en materia viva. Los productos de la desasimilación son llevados por el agua a profundidades mayores y son utilizados por otros organismos.

El contenido bacteriológico está limitado por el contenido de materia orgánica en el agua cruda y es acompañado de un fenómeno de mortalidad concomitante, durante el cual se libera materia orgánica para ser utilizada por las bacterias de las capas más profundas y así sucesivamente. De este modo, la materia orgánica degradable presente en el agua cruda se descompone gradualmente en agua, dióxido de carbono y sales relativamente inocuas, como sulfatos, nitratos y fosfatos (proceso de mineralización), los cuales son descargados en el efluente de los filtros.

La actividad bacteriológica descrita es más pronunciada en la parte superior del lecho filtrante y decrece gradualmente con la profundidad y la disponibilidad de alimento. Cuando se limpian las capas superiores del filtro se remueven las bacterias, siendo necesario un nuevo período de maduración del filtro hasta que se logre desarrollar la actividad bacteriológica necesaria. A partir de 0,30 a 0,50 m de profundidad, la actividad bacteriológica disminuye o se anula (dependiendo de la velocidad de filtración); en cambio, se producen reacciones bioquímicas que convierten a los productos de degradación microbiológica (como aminoácidos) en amoníaco y a los nitritos en nitratos (nitrificación).



Como el rendimiento del filtro lento depende principalmente del proceso biológico, mientras la capa biológica está desarrollándose, la eficiencia es baja y no debe considerarse al FLA como un eliminador de materia orgánica, sino como un mejorador de la calidad del agua, sobretudo de la turbiedad.

La maduración de un FLA puede demorar de dos a cuatro semanas.

➤ **Subproductos de la desinfección mediante filtración lenta**

Los subproductos del proceso de filtración lenta son sustancias naturales de degradación biológica sin ningún riesgo para la salud, ya que el proceso no requiere sustancias químicas que reaccionen con la materia disuelta en el agua. En tal sentido, los subproductos de la filtración lenta son dióxido de carbono y sales relativamente inocuas, como sulfatos, nitratos y fosfatos, además de un contenido bajo de oxígeno disuelto. Estas condiciones pueden ser revertidas con un proceso de aireación.

➤ **Equipos e infraestructura**

Dada la sencillez de la filtración lenta, solo se requiere un equipo de bombeo cuando es necesario elevar la carga hidráulica para que el agua llegue hasta el filtro. Por otro lado, la calidad del agua cruda determina el uso de otras instalaciones adicionales al filtro lento a fin de adecuar la calidad del agua cruda a las condiciones de operación del filtro.

En el cuadro siguiente se muestra una síntesis de las alternativas de pretratamiento en función de las variaciones de calidad de la fuente para la instalación de un filtro lento de arena.

Criterios de selección de los procesos en función de la calidad de la fuente

ALTERNATIVAS	Límites de calidad del agua cruda aceptables		
	90% del tiempo	80% del tiempo	Esporádicamente
Filtro lento de arena (FLA) solamente	To ≤ 50 UNT Co ≤ 50 UC Cf ≤ (10) ⁴ /100 ml	To ≤ 20 UNT Co ≤ 40 UC	To max ≤ 100 UNT
FLA + prefiltro de grava (PG)	To ≤ 100 UNT Co ≤ 60 UC Cf ≤ (10) ⁴ /100 ml	To ≤ 60 UNT Co ≤ 40 UC	To max ≤ 150 UNT
FLA + PG + sedimentador (S)	To ≤ 300 UNT Co ≤ 60 UC Cf ≤ (10) ⁴ /100 ml	To ≤ 200 UNT Co ≤ 40 UC	To max ≤ 500 UNT
FLA + PG + S + presedimentador	To ≤ 500 UNT Co ≤ 60 UC Cf ≤ (10) ⁴ /100 ml	To ≤ 200 UNT Co ≤ 40 UC	To max ≤ 1000 UNT

Co = Color del agua cruda To = Turbiedad del agua cruda
Cf = Coliformes fecales UC = Unidades de color cloro platinado de cobalto
UNT = Unidades nefelométricas de turbiedad

El parámetro de diseño más importante en un FLA es la velocidad de filtración (V_f). La misma debe tener un valor en el rango:

$$0,1 \text{ m}^3/\text{m}^2 \text{ hora} - 0,3 \text{ m}^3/\text{m}^2 \text{ hora}$$

Se debe notar que $[\text{m}^3/\text{m}^2 \text{ hora}] = [\text{m}/\text{hora}]$

Otros parámetros de diseño importantes en relación con el material filtrante son:

Lecho de soporte:

Camada	Tipo	Diámetro de partícula (mm)	Espesor de la camada (mm)
Superior	Arena gruesa	1 - 2	50
Segunda	Gravilla fina	2 - 5	50
Tercera	Gravilla	5 - 10	50
Inferior	Grava	10 - 25	150

Medio filtrante:

Tamaño efectivo, d_{10}	0,15 – 0,45 mm
Coefficiente de uniformidad CU	1,5 – 4,0
Altura del medio filtrante	0,5 – 0,7 m

Cuando el filtro lento es la única unidad de tratamiento, la velocidad será de 0,10 m/h. Se podrán considerar velocidades mayores en casos excepcionales cuando se consideren otros procesos preliminares, como se observa en el cuadro siguiente.

Velocidad de filtración de acuerdo con el número de procesos preliminares

Procesos	V_f (m/h)
FLA	0,10 – 0,20
Sedimentación (S) + FLA	0,15 – 0,30
Prefiltración (PF) + FLA	0,15 – 0,30
S + PF + FLA	0,30 – 0,50

La velocidad de diseño también es importante al decidir el número de unidades con las que operará el filtro. Con velocidades mayores de 0,2 m/h deberá considerarse un mínimo de tres unidades.

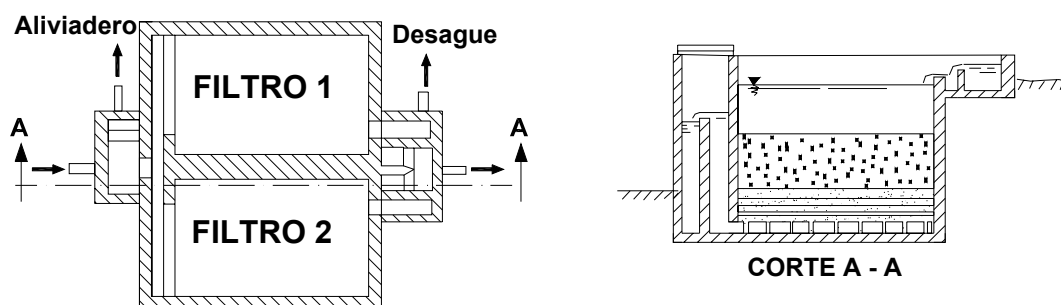
El área de cada unidad (A_s) es una función de la velocidad de filtración (V_f), del caudal (Q), del número de turnos de operación (C) y del número de unidades (N).

$$A_s = (Q \times C) / (N \times V_f)$$

Con operación continua el área de la unidad (en m^2) será igual a:

$$A_s = Q / (N \times V_f)$$

Los filtros lentos de arena pueden adoptar ser rectangulares o circulares, dependiendo del material con el que se elaboran: hormigón, ferrocemento o mampostería. La figura muestra un filtro lento modificado rectangular de hormigón.



Filtro lento modificado rectangular de hormigón

Requerimientos para la instalación

Para la instalación de la planta deben considerarse los siguientes aspectos:

a. Ubicación

- 1 Debe estar en una zona accesible, con vías de comunicación que faciliten su posterior construcción, operación y mantenimiento.
- 1 El agua subterránea debe estar ausente o muy profunda.
- 1 La zona debe ser segura y no estar expuesta a riesgos naturales o humanos.
- 1 De preferencia, la topografía de la zona seleccionada debe reunir los desniveles necesarios para que el sistema pueda operar totalmente por gravedad.

b. Aspectos relacionados con la comunidad

- 1 Efectuar estudios sociológicos para determinar las costumbres y creencias que puedan afectar la aceptación del sistema.
- 1 Comprobar la información demográfica disponible.
- 1 Determinar los recursos humanos y materiales disponibles para adecuar el diseño del sistema.
- 1 Estudiar la incidencia de enfermedades de origen hídrico y presencia de vectores.

c. Concepción del sistema

- 1 Para que la operación del sistema sea confiable, debe evitarse el uso de dispositivos para elevar el nivel del agua (bombas). De esta manera, la operación del sistema no dependerá del suministro de energía eléctrica ni de repuestos sofisticados que normalmente no están disponibles localmente y que incrementan el costo de mantenimiento del sistema.
- 1 Si tuviera que elevarse el nivel del agua por razones topográficas, se debería efectuar una sola etapa de bombeo que eleve el agua cruda hasta un nivel, desde el cual pueda distribuirse por gravedad al reservorio y a la red.
- 1 Preferentemente, el filtro lento debe operar en forma continua, esto permite unidades más pequeñas y abastecimiento continuo de nutrientes y oxígeno necesarios para mantener la capa biológica. Para garantizar esta situación, cuando se tiene una etapa de bombeo, es recomendable construir un tanque de almacenamiento de agua cruda para abastecer por gravedad la planta durante las 24 horas del día.

d. Condiciones del agua cruda

Las condiciones del agua cruda que más afectan la eficiencia del filtro son la temperatura, la concentración de nutrientes y de sustancias tóxicas y los afluentes con turbiedad y color altos. A continuación se describe brevemente:

- 1 **Temperatura**: Dado que en el filtro se desarrolla un proceso biológico, se ve afectado por las variaciones de temperatura y puede reducir 50% de su eficiencia cuando se opera a menos de 5° C.
- 1 **Concentración de nutrientes**: La velocidad de desarrollo de la formación biológica en el filtro depende de la concentración de nutrientes en el agua, debido a que ésta es la fuente de alimentación de los microorganismos.

- 1 **Concentración de algas:** Las algas son importantes en la formación del schmutzdecke. Pero su crecimiento excesivo debido a la elevada disponibilidad de luz y nutrientes, como presencia de fosfatos y nitratos en el agua, puede crear serios problemas de operación y en la calidad de agua tratada. El control de la formación de algas es difícil, pero puede solucionarse mediante el control de nutrientes en la fuente y del efecto de la luz que cubre los reservorios de agua cruda.
- 1 **Concentraciones altas de turbiedad:** La capacidad de los filtros lentos para reducir la turbiedad cuando ésta es muy elevada es limitada. Ello se debe a que una alta turbiedad causa enlodamiento de la superficie del filtro, disminuye la capacidad de formación de la capa biológica y reduce drásticamente la duración de la carrera de filtración, lo cual además de afectar la calidad del agua producida, incrementa los costos de operación y mantenimiento.

e. Material filtrante

- 1 Es necesario considerar una plataforma colindante con los filtros para efectuar la operación de lavado y secado de la arena. Asimismo, se requiere un depósito techado para guardar la arena embolsada y las herramientas, y cercar las instalaciones de la planta para evitar el acceso a niños y animales.

Operación y mantenimiento

Las tareas rutinarias de operación comprenden los ajustes y medición del caudal; monitoreo de la calidad del agua producida; limpieza de la superficie de la arena, que se efectúa por “rascado” de la porción superior del filtro (aproximadamente 5 cm de arena); lavado y almacenamiento de la arena, y la posterior reconstrucción del lecho filtrante. Este periodo entre limpiezas, llamado “carrera”, es variable. A veces puede ser necesario realizarla cada tres o cuatro semanas y en otras circunstancias, pasados muchos meses.

La adecuada operación y mantenimiento determinan la eficiencia del filtro, principalmente en la etapa de puesta en marcha o inicio de la operación del filtro nuevo. Durante la operación normal, es importante el estado de maduración de la capa biológica, la frecuencia de los raspados, el periodo de duración de cada operación de limpieza y la forma en que se efectúe el rearenado del filtro.

Con relación a la puesta en marcha, es necesario tener presente que la arena nueva no reduce la contaminación bacteriológica y que es necesario desechar el efluente inicial hasta comprobar que se está obteniendo un grado de eficiencia aceptable. Sin embargo, este proceso puede acelerarse sembrando el filtro con arena madura proveniente de otros filtros en operación.

El raspado del lecho filtrante debe iniciarse cuando el nivel del agua en la caja del filtro llega al máximo y el agua empieza a rebosar por el aliviadero.

Para disminuir el impacto sobre la eficiencia del tratamiento durante la operación de raspado del filtro, es necesario que esta operación se ejecute en un solo día para evitar la mortandad de los microorganismos benéficos en la capa de arena que permanecerá en el filtro y acortar el periodo de remaduración. En la operación de rearenado, esto es, cuando la altura del lecho ha llegado al mínimo aceptable (0,30 m) y hay que restituir a la arena el espesor de diseño, es importante aplicar el método de trinchera. Para ello, la arena del fondo que está semicolmatada se colocará en la

superficie del filtro, sobre la arena nueva, a fin de acelerar el período de maduración del lecho de arena.

Por lo menos cada cinco años se realizará el lavado completo del filtro de la siguiente manera: se retira con mucho cuidado la arena y la grava para no mezclarlas; se lava la arena; se cepillan las paredes de la caja del filtro; se reacomoda el drenaje, y se vuelve a colocar el lecho de arena y la grava. Si ha habido pérdida de arena y grava, será necesario reponerla. Si hay grietas en las paredes o en el fondo, deberán resanarse antes de colocar el lecho filtrante.

Cuando los sistemas están bien diseñados, operados y mantenidos, el efluente de las plantas de filtración lenta requiere de dosis muy bajas de cloro como última barrera; prácticamente sólo para asegurar que el agua conserve su calidad bacteriológica hasta ser consumida. Es un agua con muy bajo riesgo sanitario.

Criterios para el monitoreo y evaluación

La turbiedad y la contaminación bacteriológica del agua son los principales parámetros para la caracterización del agua superficial en las áreas rurales. Cuando el tratamiento se combina con un prefiltro o sedimentador, el objetivo específico de estas unidades es reducir la turbiedad, mientras que el del filtro lento es reducir la contaminación. Cuando sólo se cuenta con un filtro lento, éste debe cumplir los dos objetivos.

Un programa de monitoreo mínimo para controlar una planta de filtros lentos debería considerar la toma de muestras de agua cruda y tratada para constatar la calidad de la materia prima que está ingresando al sistema y la del producto final obtenido.

Las mediciones de turbiedad son simples y pueden ser efectuadas por un operador capacitado. Las mediciones diarias durante la época de lluvias permiten:

- a) Evaluar la calidad del agua cruda.
- b) Establecer y supervisar el rendimiento de la planta.
- c) Desarrollar criterios para adecuar la operación de la planta.
- d) Optimizar las características de las unidades.

Ventajas y desventajas de la filtración lenta

Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none"> • La mayor ventaja de esta unidad reside en su simplicidad. El filtro lento sin controlador de velocidad y con controles de nivel mediante vertederos es muy sencillo y confiable de operar con los recursos disponibles en el medio rural de los países en desarrollo. • No hay cambios organolépticos en la calidad del agua • Las comunidades aceptan el agua tratada por la FLA 	<ul style="list-style-type: none"> ▮ El filtro lento sin pretratamiento, no debe operar con aguas con turbiedad mayor de 20 ó 30 UNT; esporádicamente se pueden aceptar picos de 50 a 100 UNT. ▮ La eficiencia de esta unidad se reduce con la temperatura baja. ▮ La presencia de biocidas o plaguicidas en el afluente pueden modificar o destruir el proceso microbiológico en el que se basa la filtración lenta.

Costos de equipos y de la operación y mantenimiento

Los costos de inversión de los filtros lentos están determinados, principalmente, por los costos del cemento, grava, acero de refuerzo, arena de filtro, tuberías, válvulas y demás. Los precios de estos materiales varían, dependiendo de diversas circunstancias regionales y locales. Por lo tanto, lo que se presenta a continuación es una estimación de costos de materiales por unidad de producción para cuatro diseños típicos. Debe tenerse en cuenta que este cuadro está basado en información recogida de un proyecto de filtración lenta; no incluye costos de mano de obra ni honorarios de los contratistas.

DESCRIPCIÓN	Costos de Capital en \$ por unidad de producción (m ³ /h)	Costo de Operación y Mantenimiento al año
▪ Filtro con taludes protegidos	\$ 1.000 – \$ 4.000	10% del total de los costos de capital
▪ Filtro circular de ferrocemento	\$ 1.500 – \$ 3.000	
▪ Filtro circular de mampostería	\$ 1.500 – \$ 6.000	
▪ Filtro de hormigón	\$ 3.000 – \$ 12.000	

Fuentes de información

Cánepa de Vargas, L.; Pérez Carrión, J. *Manual I, II y III. Teoría y evaluación. Diseño. Operación, mantenimiento y control*. Lima, OPS/CEPIS (1992).

Rojas, R.; Guevara, S. *Construcción, operación y mantenimiento del filtro de arena*. Hoja de Divulgación Técnica, 76. Lima, OPS/CEPIS, UNATSABAR (2000).

Solsona, F. *Filtração dinâmica*. Publicación OPS/Brasil. Serie Brasil Saúde e Ambiente, Documento Técnico S-2 (disponible en la OPS/CEPIS) (1995).

Van Dijk, J.C.; Oomen, J. *Filtración lenta en arena para abastecimiento público de agua en países en desarrollo*. IRC/OMS/CEPIS. Serie Documentos Técnicos No. 11 (1978).

Capítulo 6

OZONO

Introducción

El ozono es conocido desde hace más de cien años. En 1840 se le dio el nombre actual “ozein”, que significa heder, oler. En 1857 se diseñó un generador y en 1906 se usó por primera vez en una planta de tratamiento de agua, en Niza, Francia.

En los Estados Unidos de América antes de 1980 había menos de 10 plantas, pero el número ha ido creciendo notablemente y como se explicará, a medida que los métodos de tratamiento se vuelvan más exigentes, la demanda será mayor.

Propiedades del ozono como desinfectante y descripción del método

El ozono (O_3) es un gas alótopo del oxígeno. A la temperatura y presión del ambiente es un gas inestable que se descompone rápidamente para volver a la molécula de oxígeno (O_2). Debido a esta característica, no se puede almacenar o envasar, sino que debe generarse *in situ* y usarse inmediatamente. Por lo general, la ozonización se utiliza cuando se requiere su propiedad más importante: su elevado potencial oxidante, que permite eliminar los compuestos orgánicos que dan color, sabor u olor desagradables al agua y, al mismo tiempo, cuando se desea inactivar los microorganismos patógenos del agua. Una característica importante de la ozonización es la ausencia de efecto residual, lo cual es un beneficio porque si el ozono se mantuviese en el agua le daría un sabor desagradable, pero a la vez es una desventaja, ya que, como se ha expresado, es necesario asegurar la calidad del agua hasta que llegue al consumidor mediante algún efecto residual.

A pesar de sus excelentes propiedades, su uso se ha restringido a ciudades grandes con fuentes de agua muy contaminadas y se ha empleado poco en comunidades pequeñas y de porte medio. El inconveniente principal para las comunidades pequeñas ha sido el costo inicial y el de operación, así como las dificultades de operación y mantenimiento. Sin embargo, cuando las fuentes de agua accesibles están muy contaminadas (biológica y químicamente), puede ser el método más recomendable para la oxidación de las sustancias orgánicas y desinfección primaria, siempre que cuente con la adición de un sistema de cloración secundario para mantener el efecto residual durante su distribución.

La ozonización se ha ensayado y probado extensamente; sin embargo, para las comunidades con menos de 10.000 habitantes probablemente se deberá considerar inicialmente un proyecto demostrativo desde el punto de vista operativo, administrativo y de infraestructura. En la actualidad, se están comenzando a fabricar equipos de ozonización de capacidad menor que empiezan a ser económicamente factibles, lo que permitirá su futura aplicación en comunidades pequeñas.

El método de desinfección por ozonización consiste en agregar cantidades suficientes de ozono lo más rápidamente que sea posible, de manera que satisfaga la demanda y mantenga un residuo de ozono durante un tiempo suficiente para asegurar la inactivación o destrucción de los microorganismos. La demanda de ozono en la mayoría de los sistemas de abastecimiento de agua suele ser mayor a la del cloro, debido a su gran potencial de oxidación. Los procesos de desinfección por ozono normalmente tratan de mantener un residual mínimo de 0,4 a 0,5 ppm después de 10 a 20 minutos de contacto con el agua.

Mecanismos de la desinfección con ozono

El mecanismo de desinfección en la ozonización se basa en el alto poder del ozono como oxidante protoplasmático general. Esta condición convierte al ozono en un eficiente destructor de bacterias y la evidencia sugiere que es igual de efectivo para atacar virus, esporas y quistes resistentes de bacterias y hongos.

A diferencia del cloro, la capacidad desinfectante del ozono no depende tanto de su período de retención en el agua (aunque esto tiene un efecto), sino más bien de la dosis suministrada (en la fórmula $C \times T$ prima entonces el valor de "C"). Esto se debe a que su alto potencial oxidante produce gran inestabilidad del ozono, incluso en el agua destilada, lo que quiere decir que quedará ozono remanente y por un corto tiempo solo cuando toda la materia con alta capacidad de oxidación haya sido oxidada. En caso contrario, es posible que no se haya satisfecho completamente la demanda de ozono. Dada su escasa permanencia, es comprensible entonces la importancia de determinar adecuadamente la demanda de ozono y la dificultad que reviste determinar el residual que asegure una desinfección completa.

Cuando hay presencia de material orgánico, la química se hace más compleja y se acelera la descomposición del ozono. Con un potencial de oxidación de 2,07 voltios, el ozono teóricamente puede oxidar la mayoría de los compuestos orgánicos y los convierte en dióxido de carbono y agua, pero como es selectivo en cuanto a las sustancias que oxida rápidamente, la cinética de las reacciones del ozono con muchos compuestos será demasiado lenta para que resulte en la conversión de estos a dióxido de carbono durante el tratamiento del agua. Como casi siempre la demanda total de ozono excede su suministro, estas reacciones cesarán mucho antes de que todas las sustancias orgánicas se hayan oxidado totalmente. En el tratamiento de sustancias orgánicas, el ozono se ha usado principalmente para la ruptura de enlaces múltiples como tratamiento preliminar, antes de la filtración y como ayuda para la coagulación.

Otra consideración que se debe tener en cuenta, al igual que con otros desinfectantes, es que la eficacia del ozono depende de su contacto con los microorganismos, por lo que debe evitarse que estos se agrupen y protejan (si el agua es turbia) y también se debe proveer algún sistema de mezcla o contacto con el ozono antes que el gas se disipe.

Subproductos de la desinfección con ozono

Respecto al nivel de concentración del ozono para la desinfección del agua de consumo humano, no se conoce ningún efecto adverso directo sobre la salud. Sin embargo, al igual que el cloro, el ozono puede producir subproductos (SPD) como los bromatos, el bromoformo, el ácido bromoacético, los aldehídos, las cetonas y los ácidos carboxílicos. Entre ellos, los aldehídos son probablemente los de mayor inquietud para la salud, pero la información aún es insuficiente para evaluar los riesgos de la exposición a los mismos en el agua potable.

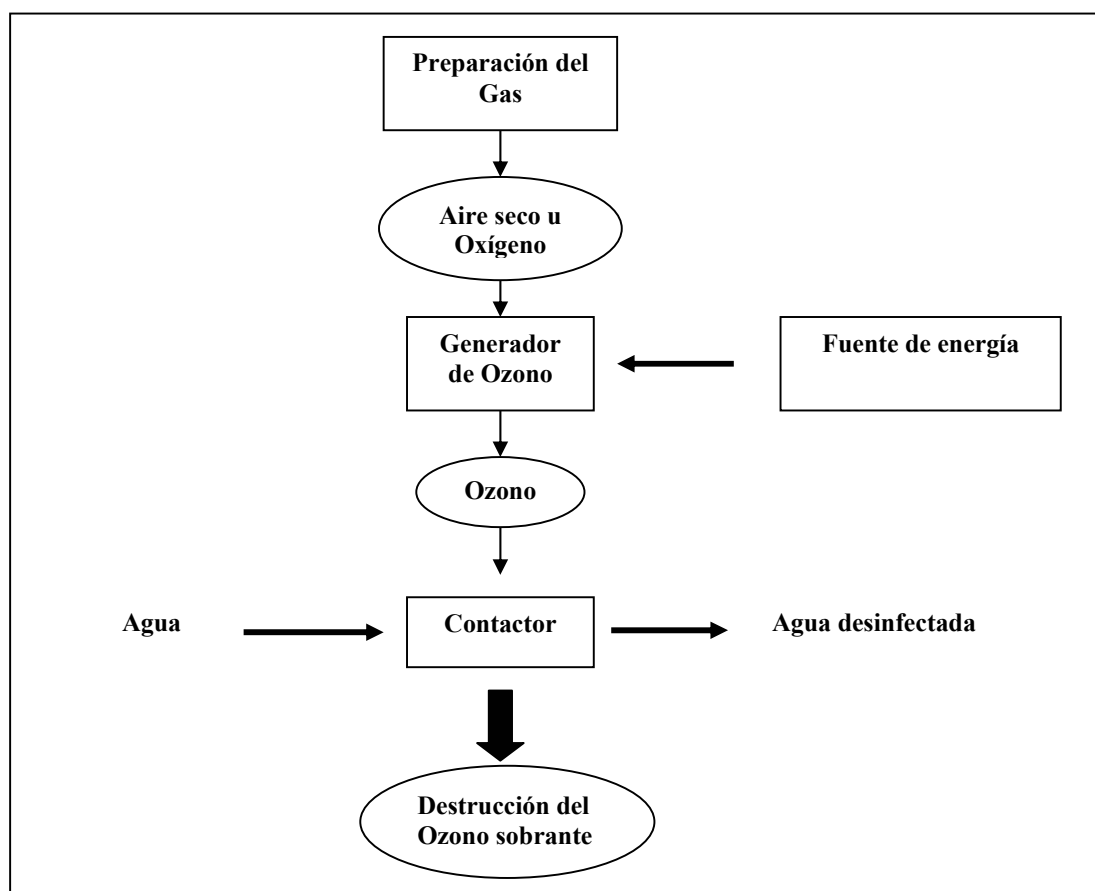
Tal como en el caso del cloro, se deben sopesar los riesgos para la salud por la ausencia de desinfección y los riesgos para la salud por la presencia de subproductos. Dado que todavía quedan muchos campos de investigación que deben explorarse con referencia a los SPD de la ozonización de aguas naturales o tratadas, las pruebas actuales indican que desde el punto de vista de los efectos para la salud, la ozonización podría considerarse segura.

Para la desinfección secundaria se recomienda que la cloración sea inmediata a la ozonización, lo cual permitirá una elevada reducción en la formación de THM. Asimismo, se recomienda que la ozonización esté seguida de carbón activado o de absorción por una capa

biológica, debido a que ciertos compuestos después del proceso son más biodegradables que lo usual y se corre el riesgo de recrudescimiento biológico en los sistemas de distribución.

Equipos

Los sistemas de ozonización constan de cinco componentes básicos: la unidad de preparación de gas (que puede ser tanto aire u oxígeno puro); el generador de ozono, la fuente de energía eléctrica, el contactor y la unidad para la eliminación del gas sobrante. En la mayoría de los casos, tal como se ha expresado, además de ozono se añade un desinfectante secundario para asegurar un residual duradero en el sistema de distribución.



Esquema básico del proceso de ozonización

Las secciones presentadas en el gráfico se describen a continuación con mayor detalle.

a) Preparación del gas

El propósito del dispositivo de preparación de gas es secar y enfriar el gas que contiene oxígeno. Los generadores del tipo descarga de corona utilizan aire seco u oxígeno puro como fuente de oxígeno que se va a convertir en ozono.

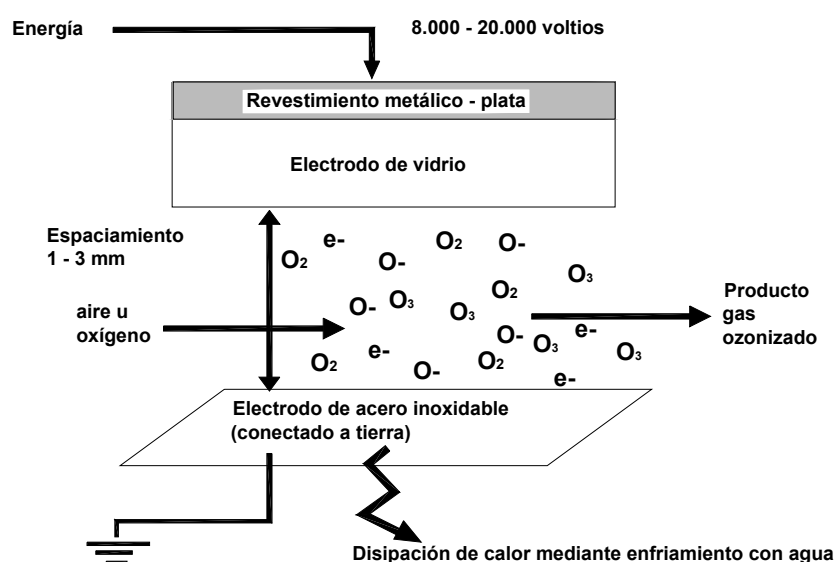
Cuando se utiliza aire, es vital secarlo hasta un punto de condensación de $-65\text{ }^{\circ}\text{C}$, a fin de maximizar el rendimiento del ozono y reducir al mínimo la formación de óxidos de nitrógeno, que aceleran la corrosión de

los electrodos. El aire también se debe enfriar porque el ozono se vuelve a descomponer rápidamente en oxígeno a temperaturas superiores a 30 °C.

Para secar el aire también se pueden utilizar desecantes químicos en lugar de refrigeración. Su costo es algo mayor y varía considerablemente de un lugar a otro. Pero en el caso de sistemas pequeños, el aumento del costo puede ser compensado por la sencillez de operación y mantenimiento. Se han usado con éxito torres de zeolitas que actúan como un cedazo molecular para producir oxígeno puro mediante la eliminación de nitrógeno en el aire. Actualmente, siguen haciéndose mejoras para aumentar el rendimiento del ozono.

b) Generadores de ozono

Los sistemas de ozonización empleados en el tratamiento de agua generan ozono en el sitio de aplicación y casi todos lo hacen por medio de una descarga de corona producida entre dos dieléctricos, a través de las cuales pasa oxígeno o aire seco.



Generador Dieléctrico de Ozono

Los generadores de ozono patentados que se encuentran en el mercado en su mayoría son del tipo de tubo, placa de Otto y placa de Lowther. El diseño de placa de Otto, que es el más antiguo, opera a presión atmosférica o negativa y tiene la ventaja de que puede funcionar hasta puntos de condensación de $-30^{\circ}C$ sin sufrir daños significativos, pero se está dejando de usar porque es el menos eficaz.

El dispositivo de placa de Lowther, que es enfriado por aire y puede usar aire atmosférico u oxígeno puro, es el que requiere menos energía de todos y se ha utilizado en sistemas pequeños de abastecimiento de agua, pero hay pocos datos del resultado de su funcionamiento en el largo plazo.

El tipo de tubo horizontal, un dispositivo enfriado por agua, se emplea más para fines industriales y grandes plantas de tratamiento de agua, pero se han desarrollado varios tipos más pequeños para plantas de tratamiento de menor capacidad.

Una unidad patentada que usa tubos dieléctricos de poco diámetro es capaz de generar hasta 14% de ozono a partir de oxígeno, siendo este uno de los valores notificados hasta la fecha.

c) Fuente de energía eléctrica

Las fuentes de energía eléctrica de baja frecuencia (50 a 60 Hz) y alta tensión (> 20.000 voltios) son las más comunes. Los adelantos tecnológicos han producido dispositivos que operan a alta frecuencia (1.000 a 2.000 Hz) y 10.000 V y se utilizan más en grandes sistemas de agua. Las fuentes de energía de frecuencias más altas suelen ser más eficaces, pero todavía no se han introducido en gran escala en los sistemas de abastecimiento para comunidades pequeñas.

d) Contactores

Los sistemas de ozonización utilizan contactores para transferir el ozono generado al agua que se va a desinfectar. El tipo de contactor depende del objetivo específico de la ozonización. Los objetivos se pueden clasificar como de reacciones rápidas: este es el caso de la inactivación de microorganismos, la oxidación de hierro, magnesio y sulfuros, y el mejoramiento de la floculación; y de reacciones lentas: la oxidación de sustancias más difíciles, como plaguicidas, sustancias orgánicas volátiles y otras sustancias orgánicas complejas que por razones cinéticas tienden a requerir tiempos de reacción más largos. En estas últimas reacciones, la ozonización suele completarse con luz ultravioleta o peróxido de hidrógeno y este efecto combinado generalmente se califica como un “proceso avanzado de oxidación”

Las fallas de los sistemas de desinfección por ozono generalmente se deben a fallas en el inyector y por defectos en el diseño y construcción del contactor. Hay dos diseños básicos del contactor: el de cámaras con difusores de burbujas y el reactor agitado por turbina. En el primero, las cámaras pueden estar en serie y separadas con deflectores o tabiques o en forma paralela, en cuyo caso recibe el nombre de “columnas múltiples”. Los estudios realizados han revelado que el difusor de burbujas de columnas múltiples ofrece la mejor eficiencia de transferencia. En un sistema de abastecimiento de agua con frecuencia se genera ozono a una presión de 1 kg/cm² y se dispersa en burbujas muy finas que se descargan en una columna de agua de 5 metros de altura en la que ocurre la oxidación y la desinfección. Pueden usarse columnas o cámaras de contacto (generalmente llenas de pedazos irregulares de material plástico para aumentar el tiempo de intercambio y dispersar las burbujas), mezcladores estáticos y difusores de hélice o turbina para acelerar la solución de gas de ozono y ayudar a asegurar la mezcla y el contacto.

En todos los tipos de contactos se utiliza el flujo de contracorriente, en que el agua fluye hacia abajo y las burbujas de aire suben a fin de maximizar el tiempo de contacto.

e) Destrucción del ozono sobrante

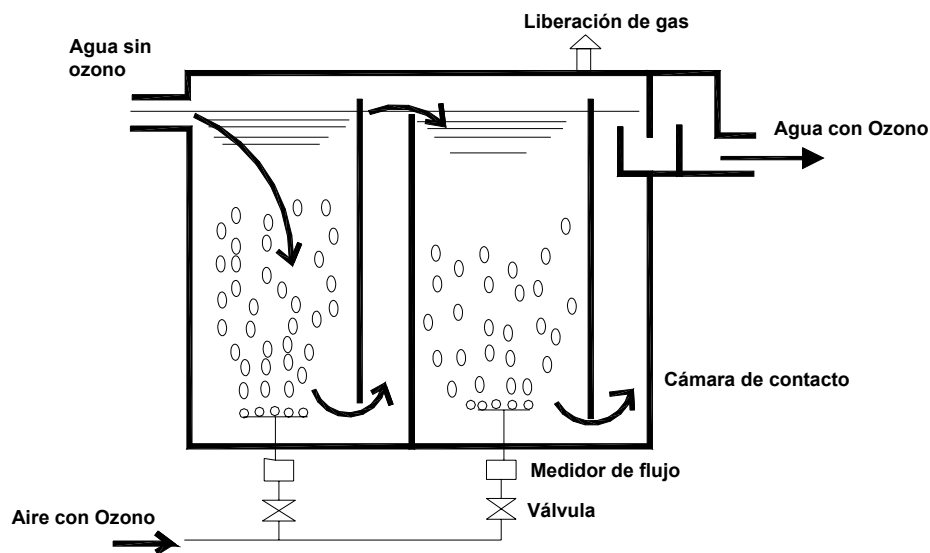
La concentración que alcance el ozono disuelto será directamente proporcional a la presión parcial del gas de ozono sobre el agua. Por lo tanto, aun con una eficiencia de transferencia de 90% (una de las mejores alcanzadas), el gas que escapa puede contener 500 a 1.000 ppm de ozono. Con frecuencia, el gas sobrante de ozono se hace recircular a un proceso unitario anterior para mejorar la oxidación o floculación con objeto de utilizarlo al máximo.

A pesar de la recirculación, generalmente quedará ozono (sobrante) en el escape de los gases, que se debe destruir o diluir suficientemente por razones de seguridad. En las plantas pequeñas de tratamiento de agua, la dilución con aire puede ser factible, pero en las plantas grandes se utiliza uno de los tres métodos siguientes para destruir el ozono sobrante: 1) descomposición térmica mediante la elevación de la temperatura a más de 300 °C; 2) descomposición catalítica por pasaje a través de metales u óxidos de metal, y 3) la absorción en carbón activado granular húmedo.

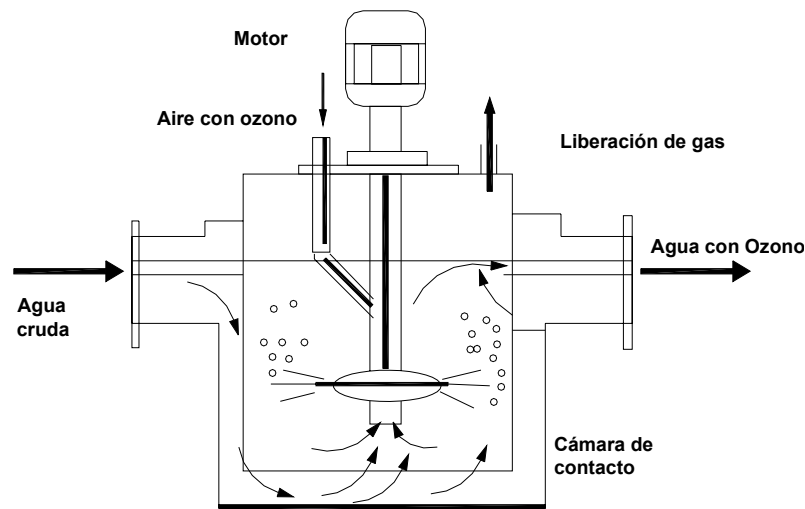
Instalación y requerimientos

- 1. **Requisitos de energía:** La energía requerida para la instalación del ozono es poca, pero la que se necesita para secar el aire es considerable. El consumo combinado de energía es de 25 y 30 kilovatios - hora de electricidad por kilogramo de ozono generado en los sistemas alimentados por oxígeno y por aire, respectivamente.

Como es importante mantener la desinfección mientras el agua está corriendo, puede ser necesario contar con generadores de energía de reserva en aquellos lugares donde la electricidad no sea fiable, a fin de garantizar la continuidad de la desinfección. Esto podría ser una consideración importante en algunas poblaciones pequeñas donde el suministro de electricidad no es continuo.



Contactor de cámaras separadas con deflectores y difusores



Difusor de turbina

Requisitos de instalación: Para producir la cantidad de ozono requerida por las poblaciones de porte medio y pequeñas, todos los elementos, excepto el contactor, se pueden armar en una unidad montada sobre un patín para transportarla hasta el sitio de uso. Este generalmente es el método menos costoso de instalar los sistemas de ozonización pequeños. Como los contactores para las plantas de ozonización pequeñas se pueden construir de hormigón, fibra de vidrio reforzada o de PVC, a menudo se construyen en el lugar.

Para un sistema de ozonización pequeño (incluido el contactor) se necesita un mínimo de 20 metros cuadrados de espacio. El edificio debe airearse bien con un ventilador y las puertas deben abrirse hacia fuera. Todas las tuberías de gases de ozono deben ser de acero inoxidable 304-L y 316-L para el servicio seco y húmedo, respectivamente. En el plano de la disposición del equipo se debe incluir espacio suficiente para la extracción y reemplazo de los componentes de los generadores de ozono. Los generadores del tipo de tubo requieren espacio adicional. El recinto debe construirse de material resistente a la corrosión, como ladrillo o bloque de hormigón.

Operación y mantenimiento

Para su funcionamiento cotidiano, los requerimientos operativos de los sistemas pequeños de ozonización pueden ser mínimos. Se estima que la tarea de mantenimiento diario tomará cerca de media hora al día. Estas cifras tan bajas se deben a que gran parte de la operación está automatizada. Sin embargo, en relación con la capacidad técnica, cuando hay que reparar o dar servicio al equipo de preparación de aire, al generador de ozono, al monitoreo automatizado o al sistema de control, se requiere un técnico altamente calificado.

Lo más común es automatizar completamente la función de monitoreo y ajuste de la dosificación, incluso en los sistemas más pequeños, pero esto solo se puede hacer en lugares donde el proveedor o el fabricante ofrece un servicio de apoyo seguro y confiable a los clientes. Muchas fallas de los generadores de ozono son causadas simplemente por fusibles quemados que no son detectados por el operador. El equipo electrónico probablemente sería demasiado complicado para que lo repare el operador de una planta de tratamiento de un pueblo o una ciudad pequeña de un país en desarrollo. Además, los instrumentos del sistema deben ajustarse y calibrarse continuamente.

y el secador de aire se debe mantener en muy buenas condiciones para evitar la falla prematura del dieléctrico debido a la humedad.

Monitoreo

El monitoreo y la prueba para detectar el ozono incluyen algo más que la simple vigilancia del residual en el sistema de distribución de agua. También es preciso vigilar el gas que escapa de la cámara o cámaras de contacto para asegurar que no se está desperdiciando ozono y que se ha aplicado una cantidad suficiente para obtener la oxidación y desinfección deseada. Además, es necesario controlar el ozono en el agua tratada para que la tasa de producción se pueda ajustar a los cambios en la calidad del agua afluente. Esto es particularmente importante si el agua no ha sido tratada adecuadamente antes de la ozonización. De cualquier forma, la vigilancia continua es necesaria para proporcionar un tratamiento fiable con el ozono.

Entre las pruebas para detectar el gas se encuentra el método de yoduro de potasio descrito en los “Métodos estándares” de la American Water Works Association de los Estados Unidos de América, el cual por ser una prueba tediosa y lenta, resulta más práctica como método estándar para la calibración de dispositivos de detección de ozono y no para pruebas de rutina.

Otro método es el de trisulfonato de índigo, el cual se basa en la medición de la decoloración de este compuesto. Sus atributos primarios son su sensibilidad, selectividad, exactitud y sencillez. La desventaja de este método es que se debe realizar en el laboratorio y no se presta para pruebas en el campo.

Otro método satisfactorio de medición del ozono en el agua es con instrumentos de tipo amperométrico que usan una celda de medición de flujo continuo de dos electrodos metálicos diferentes para generar una corriente proporcional al ozono presente. Estos electrodos se emplean actualmente en los sistemas de vigilancia y control automatizados de la ozonización en plantas de tratamiento de agua. Su inconveniente principal es la necesidad de calibrar y limpiar frecuentemente los electrodos, que se pueden contaminar con cierta facilidad.

Finalmente, hay unos dispositivos que emplean la absorción de la radiación de rayos ultravioletas junto a los instrumentos espectrofotométricos de haz doble, que se utilizan para la vigilancia continua del ozono, tanto en el agua tratada como en el gas que escapa de la cámara de contacto. Este equipo suele emplearse en los sistemas de control automatizados que ajustan la producción del ozono para armonizarla con los cambios en la calidad del agua a medida que estos ocurren, a fin de asegurar una oxidación y desinfección adecuada y reducir al mínimo el exceso de ozono en el gas que escapa.

Aunque con base en el monitoreo del residual de ozono se pueden hacer ajustes manuales a la dosificación, esto no es práctico, excepto cuando la calidad del agua es sumamente estable, como la que puede encontrarse en algunos pozos. En estas circunstancias es posible hacer un ajuste manual a intervalos suficientemente espaciados para que resulte práctico. Hoy en día, la automatización completa de la vigilancia y el ajuste es la práctica más común, aun en los sistemas más pequeños. Sin embargo, esto solo es factible cuando el proveedor o fabricante proporciona apoyo técnico inmediato a los clientes, lo que no ocurre en comunidades pequeñas porque se carece de las capacidades técnicas necesarias para mantener y reparar este tipo de equipo.

Ventajas y desventajas

La importancia principal de los procesos de oxidación para la desinfección es que gran parte del ozono generalmente será consumido por otras sustancias que suelen estar presentes en el agua y habrá que satisfacer esa demanda antes de asegurar la desinfección.

Desde el punto de vista de la eficacia biocida, el ozono es el desinfectante más potente que se utiliza en los suministros de agua. Los tiempos de contacto y la concentración para inactivar o matar los agentes patógenos transmitidos por el agua son mucho más bajos que los del cloro libre o cualquier otro desinfectante. La capacidad de desinfección del ozono no cambia gran cosa en el intervalo normal del pH de los abastecimientos de agua.

Como desventaja principal, el ozono no proporciona un residual estable aunque sea un desinfectante primario excelente que logra la destrucción de microorganismos, por lo tanto, habrá que añadir un desinfectante secundario para proporcionar ese residual y proteger el agua de una posible contaminación en el sistema de distribución. Por estas razones y debido a que el costo es relativamente alto, *rara vez se emplea el ozono solamente para desinfectar*, se usa más bien cuando es necesario mejorar simultáneamente otros aspectos del tratamiento mediante su poder de oxidación.

El ozono tiene otras dos limitaciones importantes como desinfectante único: su vida media en el agua generalmente es menos de 30 minutos y además reacciona con sustancias orgánicas para producir derivados de peso molecular inferior, que son más biodegradables que sus precursores.

Ello podría resultar en un nuevo crecimiento microbiano en el sistema de distribución porque descompone las sustancias orgánicas y las convierte en formas que los microorganismos, que se encuentran comúnmente en los sistemas de distribución, pueden utilizar como nutrientes. Debido a estas limitaciones, el ozono suele usarse en combinación con otros desinfectantes (desinfectantes secundarios) con residuales más débiles pero más duraderos a fin de impedir el nuevo crecimiento de microorganismos en el sistema de distribución.

La capacidad del ozono para reaccionar con sustancias orgánicas puede aprovecharse para eliminar los compuestos convertidos que se han hecho biodegradables mediante una filtración subsiguiente a la ozonización.

Desde el punto de vista económico, el uso más favorable del ozono parece ser cuando, además de la desinfección, se emplea simultáneamente para otros fines en el tratamiento de agua, como para descomponer sustancias orgánicas sintéticas, eliminar fenoles, evitar la formación de trihalometanos, mejorar la floculación y para otras funciones similares. Tal como se indicó anteriormente, el ozono es un oxidante tan fuerte que casi siempre se utiliza con propósitos múltiples en el tratamiento de los suministros de agua, en lugar de utilizarlo solamente como desinfectante.

Costos

En relación con los costos de equipos, un generador típico para una pequeña población de 10.000 habitantes, (con una dotación de 100 litros/habitante x día), tiene un costo aproximado de US\$ 20.000. Sin embargo, ese costo puede ser engañoso, ya que un generador debe ir acompañado de una serie de equipos auxiliares que conllevan un costo adicional, en muchos casos elevado.

Como ejemplo se puede citar el costo de un sistema para tratar 1.500 m³ (15.000 habitantes), cuyos componentes se discriminan de la siguiente manera.

Componente	Costo (US\$)
Generador	25.000
Tanque de intercambio	15.000
Analizador de O ₃ disuelto	7.000
Auxiliares, repuestos y extras	5.000
Total del sistema	52.000

A esto hay que sumar los costos de instalación, que las compañías cobran aparte y el costo de los técnicos que estas compañías aportan; costos que oscilan entre 500 y 750 dólares americanos por día, más los gastos de pasajes y estadías por el tiempo que dure la instalación y puesta a punto.

Los gastos de mantenimiento, sobretudo si dependen de técnicos que deban trasladarse desde lugares lejanos, pueden ser también significativos. Desde el punto de vista de los gastos de operación, los mismos no son altos y se estima que un costo promedio está en el rango de 0,03 a 0,06 dólares americanos por m³ de agua tratada.

Para el medio rural, un equipo pequeño y simple, sin aditamentos ni analizadores que trata hasta 200 m³ de agua por día, puede costar entre 5.000 y 10.000 dólares americanos.

Fuentes de información

Deininger, R.; Skadsen, J.; Sanford, L.; Myers, A. *Desinfección del agua con ozono*. Trabajo presentado en el Simposio OPS: Calidad de Agua, Desinfección Efectiva (1998). Publicado también en CD-Rom. Disponible en la OPS/CEPIS.

DeMers, L.D. et al. *Ozone System Energy Optimization Handbook*. AWWA Research Foundation, ISBN 0-9648877-1-1 (1996).

George, D.B. et al. *Case Studies of Modified Disinfection Practices for Trihalomethane Control*. AWWA Research Foundation, ISBN 0-89867-515-4 (1990).

Masschelein, W.J. *Ozonation Manual for Water and Wastewater Treatment*. John Wiley & Sons, ISBN 0-471-10198-2 (1982).

Rakness, K.L. et al. *Ozone System Fundamentals for Drinking Water*. J. Amer. Water Works Assoc., Vol 2, No 7 (1996).

Reiff, F.; Witt, V. *Guía para la selección y aplicación de tecnologías de desinfección del agua para consumo humano en pueblos pequeños y comunidades rurales en América Latina y el Caribe*. Documento OPS/OMS, Serie Técnica N.º 30 (1995).

Rice, R.G. *Analytical Aspects of Ozone Treatment of Water and Wastewater*. Lewis Publishers, ISBN 0-87371-064-9 (1986).

USEPA. *Guidance Manual for Compliance with the Filtration and Disinfection requirements for Public Water Systems Using Surface Water Sources* (1989).

Referencia adicional: International Ozone Association: www.int-ozone-assoc.org

Capítulo 7

DIÓXIDO DE CLORO



Introducción

El dióxido de cloro (ClO_2) es un desinfectante cuya capacidad biocida sobrepasa a la del cloro y sus derivados. Debido a sus cualidades oxidantes selectivas, su aplicación es una alternativa a ser considerada donde además de la desinfección se requiere mejorar la calidad organoléptica del agua. Tiene un gran efecto en el control del sabor y el olor, así como para destruir sustancias orgánicas que proporcionan color o que son precursoras de trihalometanos (THM). Por ello, se aplica especialmente cuando las aguas crudas contienen altas concentraciones de precursores, que con la cloración tradicional darían lugar a la formación de subproductos de la desinfección (SPD). A pesar de ello, su uso como desinfectante en plantas de tratamiento se ve limitado a causa de su complejidad y sensibilidad en la producción y a su relativo costo elevado.

El dióxido de cloro no se vende como un producto listo para su uso, por lo que debe generarse *in situ*. Además, solo se utiliza como desinfectante primario y su producción y manejo entrañan complejidad y riesgos. Por ello, no se recomienda para comunidades pequeñas con poca capacidad técnica; de allí su escasa popularidad en los países en desarrollo y su limitada aplicación en sistemas de mediano a gran porte en los países desarrollados. Posiblemente, para el medio rural de los países en desarrollo eso lo mantendrá en una prioridad baja frente a otros desinfectantes más “amistosos”, como el cloro, la radiación ultravioleta y la FLA y solo será comparable en popularidad con la también excelente pero sensible y exigente ozonización.

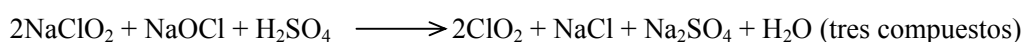
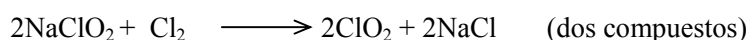
Una aclaración es, sin embargo, pertinente. Se está desarrollando mucha investigación sobre el dióxido de cloro y en los últimos años han aparecido nuevas tecnologías y formas de producción que hacen que esta técnica sea una de las más activas e innovadoras junto con los métodos sinérgicos, que se detallan más adelante en el manual. Es probable que la ciencia aporte en cualquier momento un nuevo método que disminuya los inconvenientes que se presentan hoy en día y que quede como única oferta la sumatoria de todas sus cualidades y ventajas.

Propiedades del dióxido de cloro como desinfectante y descripción del método

El dióxido de cloro es un gas de color verde amarillento, estable y sumamente soluble en agua hasta alcanzar concentraciones de 2%. Una de las propiedades más interesantes del dióxido de cloro es su eficacia biocida en un amplio rango de pH que va de 3 a 10 (mejor de 4 a 9). Además de sus propiedades desinfectantes, el dióxido de cloro mejora la calidad del agua potable, es decir, neutraliza olores, remueve el color y oxida el hierro y el manganoso. El dióxido de cloro es sensible a la luz ultravioleta.

Aunque han aparecido nuevas metodologías (SCD o “estabilizadas”) que pueden cambiar la actual situación, hoy el ClO_2 no puede comprimirse ni distribuirse en cilindros como el cloro gaseoso ni puede transportarse debido a su inestabilidad. El producto, por lo tanto, debe producirse *in situ* mediante el uso de generadores especiales.

Comúnmente se genera mediante dos mecanismos: la reacción de clorito de sodio con cloro gaseoso (sistema de dos compuestos químicos) o mediante la reacción de clorito de sodio con hipoclorito de sodio y ácido sulfúrico (sistema de tres compuestos químicos).



Estrictamente como desinfectante, el ClO₂ presenta las siguientes ventajas:

- 1 Su potencial bactericida es relativamente independiente del pH entre 4 y 10.
- 1 Es mejor que el cloro para el tratamiento de esporas.
- 1 Requiere poco tiempo de contacto.
- 1 Tiene buena solubilidad.
- 1 No hay corrosión en altas concentraciones, lo que reduce los costos de mantenimiento.
- 1 No reacciona con amoníaco o sales de amonio.
- 1 Mejora la coagulación.
- 1 Remueve hierro y manganeso mejor que el cloro.

Las propiedades residuales del dióxido de cloro son limitadas, por tal motivo, suele emplearse el cloro como desinfectante secundario para asegurar protección adicional en el sistema de distribución.

➤ Mecanismos de desinfección del dióxido de cloro

El dióxido de cloro existe en el agua como ClO₂ (poca o ninguna disociación) y, por lo tanto, puede pasar a través de las membranas celulares de las bacterias y destruirlas. El efecto que tiene sobre los virus incluye su adsorción y penetración en la capa proteica de la cápside viral y su reacción con el RNA del virus. Como resultado, el ClO₂ daña la capacidad genética del virus.

El dióxido de cloro tiene menor efecto microbicida que el ozono, pero es un desinfectante más potente que el cloro. Una investigación reciente en los Estados Unidos y Canadá demostró que el dióxido de cloro destruye enterovirus, *E. coli* y amebas y es efectivo contra los quistes de *Cryptosporidium*.

El siguiente cuadro muestra de manera comparativa la eficacia biocida, la estabilidad y el efecto del pH del dióxido de cloro frente a tres desinfectantes comunes.

Eficacia biocida, estabilidad y efecto del pH

Desinfectante	Eficacia biocida	Estabilidad	Efecto del pH en la eficacia
Ozono	1	4	Poca influencia
Dióxido de cloro	2	2	Poca influencia
Cloro	3	3	Disminuye considerablemente al aumentar el pH
Cloraminas	4	1	Poca influencia

1 = Más ; 4 = Menos

Este cuadro permite identificar que el ozono, con un potencial de oxidación más fuerte, es el menos estable de los cuatro compuestos. También se ha observado que las cloraminas pueden tener la menor efectividad biocida, pero presentan un efecto residual más prolongado.

El dióxido de cloro reacciona en el agua con compuestos fenólicos, sustancias húmicas, sustancias orgánicas e iones metálicos. Esta acción oxidante a menudo mejora el gusto, olor y color del agua, además elimina la probabilidad de producción de THM cuando se realiza una adecuada dosificación *in situ* de los elementos constituyentes del dióxido de cloro en el agua.

Subproductos de la desinfección con dióxido de cloro

Mientras los desinfectantes que contienen cloro reaccionan con diversas sustancias mediante la oxidación y sustitución electrofílica, el dióxido de cloro solo reacciona mediante la oxidación. Esta es la razón por la cual el uso de dióxido de cloro puede disminuir la formación de THM en el agua tratada. Si eventualmente se producen niveles considerables de THM en las aguas tratadas con dióxido de cloro, esto a menudo se debe a problemas en los generadores de dióxido de cloro, generalmente por exceso en el suministro de cloro, sustancia que participa *per se* en la formación de esos THM.

En muchos casos, los productos de la oxidación con dióxido de cloro no contienen átomos de halógeno y específicamente el dióxido de cloro en presencia de sustancias húmicas no da lugar a niveles significativos de THM. No se ha observado la formación de trihalometanos que contengan bromo al tratar materiales húmicos con dióxido de cloro. Tampoco reacciona con el amoníaco para formar cloraminas.

De cualquier modo, no se puede negar la existencia de SPD y los productos de la reacción del dióxido de cloro con material orgánico en el agua incluyen clorofenoles y los ácidos maleicos, fumáricos y oxálicos. Un estudio de los subproductos de la reacción del dióxido de cloro en un tratamiento piloto reveló más de 40 SPD, aunque su toxicidad en la mayor parte es desconocida.

Durante la oxidación de la materia orgánica, el dióxido de cloro se reduce al ión clorito. Es precisamente el clorito y también los cloratos los más importantes SPD producidos con el uso de este desinfectante.

La OMS no ha establecido un valor guía para el dióxido de cloro debido a su deterioro rápido a clorito, clorato y cloruro, y porque el valor guía provisional de la OMS para el clorito, 200 mg/litro, es un protector adecuado contra la toxicidad potencial del dióxido de cloro.

Equipos

No existe ningún estándar industrial para el rendimiento de los generadores de dióxido de cloro. La eficiencia del generador se define no solo en función de la conversión del clorito de sodio en dióxido de cloro, sino también en función de la generación de subproductos como ion clorato, cloro libre y clorito sobrante. Cuando el generador no funciona adecuadamente, estos subproductos pueden salir del generador de dióxido de cloro en cantidades excesivas y disminuir los resultados esperados. Además, el rendimiento deficiente de los generadores dará como resultado costos de operación superiores a los deseados.

Los generadores modernos de dióxido de cloro son capaces de funcionar sistemáticamente en los niveles deseados cuando se les opera adecuadamente.

Se debe tener en cuenta que el sistema de desinfección por dióxido de cloro se recomienda para ciudades donde se pueda contar con recursos humanos y materiales necesarios para una buena operación y mantenimiento así como para el seguimiento de apropiadas medidas de seguridad.

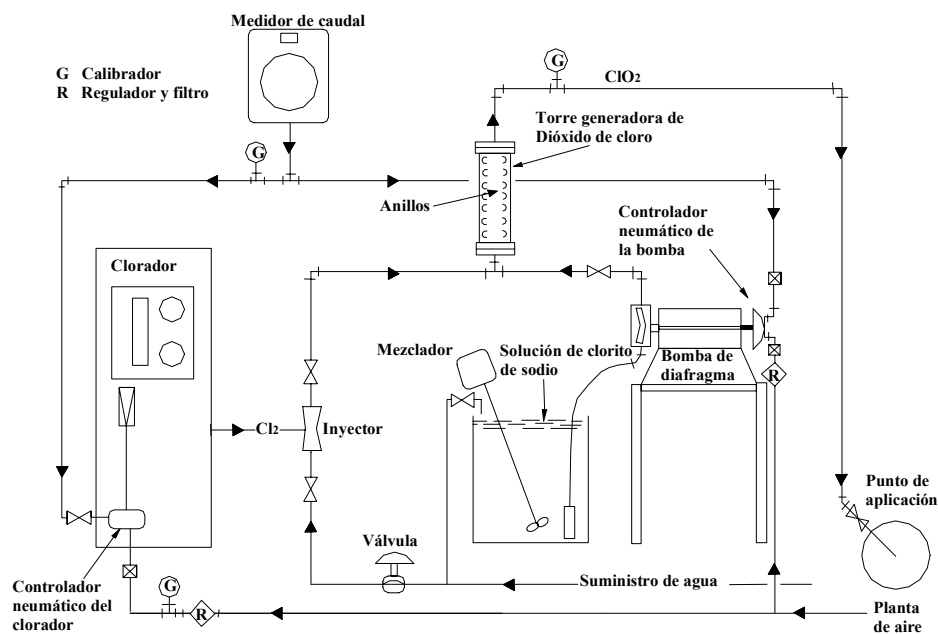
Generador de dióxido de cloro con alimentación proporcional automática

A pesar de que cada integrante de una planta de generación de ClO_2 es relativamente sencillo (bombas, caudalímetros, mezcladores, inyectores, etc.), el conjunto representa un sistema complejo que requiere personal técnico capacitado para entenderlo, operarlo, mantenerlo y repararlo.

La figura ilustra una instalación típica de dióxido de cloro que utiliza una señal de presión de aire para lograr un control proporcional del suministro de sustancias químicas. Si se cambian algunos componentes internos del sistema neumático a eléctrico se pueden obtener los mismos resultados.

Puede ser que la estación de cloración consista en una bomba de diafragma que suministre una solución de clorito de sodio a la torre de reacción, instalada en la línea de descarga de solución de dióxido de cloro. La bomba de diafragma se controla neumáticamente, de tal manera que sea compatible con el control automático proporcional del dosificador.

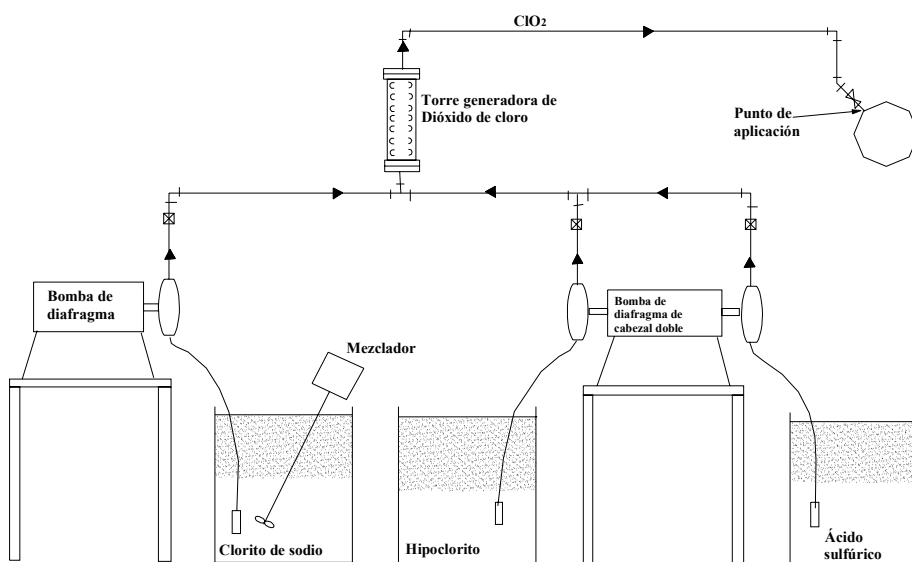
El caudal de agua tratada por la estación de dióxido de cloro se rige por el grado de concentración de la solución de cloro. La concentración máxima posible bajo condiciones hidráulicas ideales alcanza las 5.000 ppm. Mientras que el límite inferior es 500 ppm, para producir la reacción necesaria.



Generador de dióxido de cloro (sistema de dos componentes)



**Planta para producir
100 Kg de ClO_2 /hora
Cocepción, Chile
(600.00 hab)**



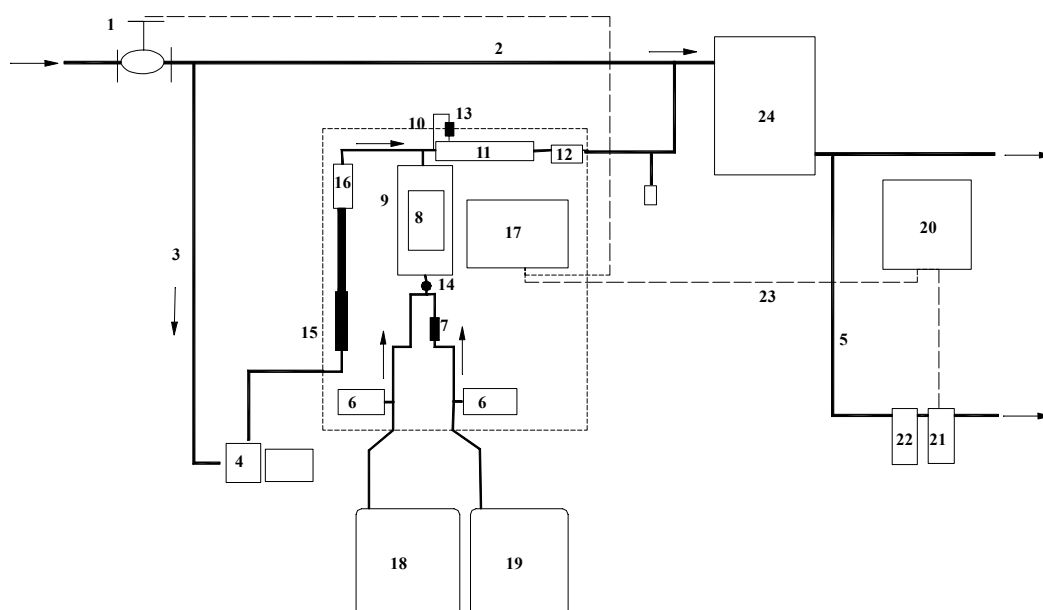
Generador de ClO_2 (sistema de tres componentes)

1 ***Equipo adaptado para la generación de dióxido de cloro a partir de hipoclorito***

La figura ilustra el equipo para las instalaciones que utilizan hipoclorito. Estas instalaciones usualmente se limitan a tratar un caudal de 30 a 45 l/s, lo que equivale a una población máxima entre 30.000 y 40.000 habitantes. Tales instalaciones pueden ser utilizadas en pequeños suministros de agua por pozo, con únicamente una operación de arranque y parada automática.

1 ***Equipo generador moderno de dióxido de cloro***

Como se ha expresado, un sistema de ClO_2 puede ser relativamente complejo y ello es visible en un equipo de tecnología moderna que permite una dosificación proporcional al flujo de agua a través de controladores digitales de flujo. Esta eficiencia en la operación permite, por un lado, optimizar los costos de operación, por lo que resulta más económico ya que no se produce desperdicio de clorito de sodio ni de ácido clorhídrico y, por otro lado, una operación tan cuidada imposibilita la formación de THM que aparecen cuando no hay una proporción adecuada en la dosificación de los insumos del dióxido de cloro. Estos equipos pueden generar desde 30 a 4.000 g/hora de dióxido de cloro, lo cual permite tratar caudales desde 20 l/s hasta 2,5 m³/s para una dosis de 0,5 mg/l en el agua. La flexibilidad de este equipo permite abastecer poblaciones pequeñas de 20.000 habitantes hasta ciudades de dos millones de habitantes.



Esquema de instalación de un equipo generador de dióxido de cloro moderno

Donde:	
1. Ingreso de agua	13. Válvula de ventilación
2. Tubería principal	14. Dispositivo de succión
3. Derivación para el sistema de desinfección	15. Esqueleto de sostén del equipo
4. Bomba de refuerzo	16. Válvula anti-retorno
5. Tubería de derivación para monitoreo.	17. Dispositivo de control del nivel de producción
6. Bombas dosificadoras	18. Envase de seguridad de ácido
7. Sensor de flujo	19. Envase de seguridad de clorito
8. Reactor	20. Medidor de dióxido de cloro suministrado
9. Soporte del reactor	21. Probeta de dióxido de cloro
10. Válvula dosificadora (sensible a la presión)	22. Controlador de nivel de agua
11. Mezclador	23. Conector
12. Válvula de retención	24. Cámara de contacto (10 – 15 minutos)



Equipo pequeño para bajo caudal

➤ **Instalación y requerimientos**

El dióxido de cloro en solución acuosa es altamente corrosivo; aun más que el cloro en algunos aspectos. Por ejemplo, se ha sabido que las mangueras de hule para concentraciones de cloro de 1.500 a 2.000 ppm han estado en servicio durante 20 años. La misma manguera no podría estar más de 4 ó 5 años de servicio en un alimentador de dióxido de cloro de una torre de generación. Los materiales recomendados para las líneas de conducción de la solución de dióxido de cloro son en orden de preferencia: PVC tipo I y polietileno. Deberá evitarse el uso de tuberías de goma.

Se deberá tener especial consideración en el almacenamiento del clorito de sodio y consultar a expertos en seguridad. El almacenamiento deberá realizarse en una edificación externa, preferiblemente separada de las estructuras principales, y deberá ser construida en la medida de lo posible con material no combustible, como acero corrugado, concreto prefabricado o ladrillos. En lugares calurosos se deberá disponer de suficiente agua para mantener fresco el área del clorito de sodio y prevenir el deterioro por el calor.

La instalación de estos equipos requieren la disponibilidad de energía eléctrica y personal capacitado y adecuadamente implementado para el manejo seguro de los insumos que se utilizan en la generación del dióxido de cloro. Asimismo, se deberán tener las sustancias químicas necesarias, como ácido clorhídrico o sulfúrico, clorito de sodio, hipoclorito de sodio o cloro gaseoso, según el tipo de equipo que se haya seleccionado.

Operación y mantenimiento

En la operación, el clorito de sodio deberá manipularse con mucho cuidado para evitar su derrame. En caso de producirse, nunca deberá usarse un paño absorbente; siempre se debe enjuagar la superficie con abundante agua. Nunca se debe usar poca agua, ya que esto puede ser peor que no usarla para nada.

Monitoreo

Dado que las reacciones del dióxido de cloro incluyen la formación de ion clorito como subproducto, un equipo de pruebas sencillo no puede proporcionar los datos analíticos requeridos para su control. Se requiere el análisis del producto del generador de dióxido de cloro y del agua tratada para cuantificar con precisión la dosificación y los subproductos. Es necesario diferenciar específicamente el dióxido de cloro, el ion clorito y el cloro libre en el generador para determinar su rendimiento y eficiencia. El método recomendado para determinar el rendimiento y eficiencia del generador es la titulación amperométrica en cuatro pasos. Existen equipos de prueba para concentraciones de menos de 5 mg/l en el agua tratada, pero tienen limitaciones e interferencias.

La verdad es que el monitoreo del ClO_2 es una desventaja adicional, ya que la confección de un análisis de rutina significa contar con personal capacitado y tener en cuenta que cada determinación química requiere un promedio de 45 minutos.

Ventajas y desventajas del método

Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none">• Efectivo contra muchos microorganismos y más potente que el cloro en un tiempo de contacto corto.• Mayor poder de oxidación, lo que contribuye a la remoción de olor, color y mal sabor.• No produce trihalometanos (THM)• No se ve afectado por las variaciones de pH• Mejora la remoción del hierro y manganeso	<ul style="list-style-type: none">• Es complejo• Es más caro que el cloro.• Se forman subproductos de clorito y clorato.• Debe producirse en el lugar donde se va a utilizar.• Para su operación y mantenimiento requiere mano de obra capacitada.• Difícil de analizar en laboratorio

Costos

Los costos de capital para los equipos de producción de dióxido de cloro son variables y dependen de diversos factores. No existe una forma precisa de evaluar en forma genérica los costos y en cada caso es necesario requerir los presupuestos correspondientes a los proveedores, quienes analizan el tipo de proceso seleccionado, el tipo de agua cruda, características de la planta de tratamiento, país, lugar, condiciones de la instalación, etc.

Desde el punto de vista operativo, el estudio producido por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos, EPA, se toma generalmente como norma. En 1998, la EPA analizó los costos para cumplimentar la Safe Drinking Water Act (que es la norma federal del país) mediante desinfección con ClO_2 .

Costos operativos del dióxido de cloro en US\$ (1998)

Para una población de (habitantes)	Costo de la desinfección (\$/m ³)
10.000	0,02
60.000	0,01

Fuentes de información

ALLDOS International; *Fotos*; www.alldos.de

Cowley, G. *Disinfection with Chlorine Dioxide*. Publicación de la Sterling Pulp Chemicals, Toronto (2002).

Deininger, R.; Ancheta, A.; Ziegler, A. *Dióxido de cloro*. Trabajo presentado en el Simposio OPS: Calidad de Agua, Desinfección Efectiva (1998). Publicado también en CD-Rom. Disponible en la OPS/CEPIS.

White, C. *Handbook of chlorination*. Van Nostrand Reinhold (1972).

Capítulo 8

MINIFILTRACIÓN



Introducción



➤ La filtración convencional (lenta y rápida) usa material particulado, mientras que la minifiltración emplea membranas especiales. A diferencia de los métodos que utilizan cloro, dióxido de cloro u ozono, que operan con el principio de la oxidación química, la minifiltración es un método de desinfección que opera bajo el principio físico de la filtración.

A pesar de su eficacia para remover microorganismos patógenos, estos métodos se han empleado poco en ciudades de los países en vías de desarrollo debido a sus altos costos de inversión y de operación y mantenimiento. En las pocas plantas de este tipo existentes en América Latina se ha constatado que su producción es excelente y que pueden funcionar con operadores capacitados o no, ya que los procesos pueden estar automatizados casi por completo. Estas plantas operan como eficientes robots que toman agua sucia y producen un efluente de excelente calidad.

Sin embargo, debido a que la automatización es microprocesada, los problemas que puedan surgir solo podrán ser resueltos por los mismos fabricantes. Esto representa una carga de altos costos, demoras y usuarios que quedan temporalmente sin servicio. Adicionalmente, estos sistemas tienen la desventaja de que requieren un desinfectante secundario para asegurar la inocuidad del agua hasta su consumo, ya que el tratamiento no proporciona efecto residual.

Propiedades de la minifiltración como desinfectante y descripción del método

La **minifiltración** incluye a la **microfiltración**, la **ultrafiltración**, la **nanofiltración** y la **ósmosis inversa**. La diferencia entre estas categorías reside en el tamaño de los poros de la membrana filtrante. En tal sentido, la propiedad desinfectante de estas membranas depende de la capacidad que tengan para “retener” los microorganismos patógenos debido a que las dimensiones de estos son superiores al tamaño de los poros. Desde el punto de vista de la retención con capacidad de desinfección, el cuadro siguiente presenta los métodos y los diámetros del poro que retienen especies ó microorganismos. Los rangos presentados no son exactos, pero permiten dar una idea del rango relativo de cada uno de ellos.

Características de la minifiltración

FILTRO (membrana)	DIÁMETRO DE PORO Micrones (μ)	PRESIÓN (psi)	RETENCIÓN (sustancias filtradas)
Ósmosis inversa	< 0,001	200 – 1.500	Sales, radicales libres
Nanofiltración	0,001 – 0,01	70 – 250	Azúcares, moléculas
Ultrafiltración	0,01 – 0,1	15 – 200	Coloides, virus
Microfiltración	0,1 – 0,2	10 – 50	Bacterias, quistes

La desinfección por medio de la microfiltración se lleva a cabo a través de una membrana con poros de hasta 0,2 micrones. Aunque es la membrana de mayor tamaño en el rango de la minifiltración, su capacidad es suficientemente buena para que una planta potabilizadora de agua aborde en un solo paso algunos de los problemas más discutidos con respecto a las tecnologías actuales. Entre ellos:

Desde el punto de vista del tratamiento:

- 1 Operación más simple

- 1 Reducción de productos químicos para la coagulación
- 1 Remoción de sólidos suspendidos y turbiedad
- 1 Disminución de lodos que necesitan disposición.

Desde el punto de vista de la desinfección:

- 1 Remoción de bacterias en general
- 1 Remoción de quistes de *Giardia*, *Cryptosporidium* y otros parásitos
- 1 Reducción de virus
- 1 Disminución del uso de desinfectantes químicos (si se hace precloración).

Este tipo de tratamiento se logra con cualquiera de los métodos de minifiltración indicados anteriormente debido a que el tamaño del poro es más pequeño, consecuentemente, su capacidad de retención es mayor.

La desinfección por medio de la *nanofiltración* por ejemplo, usa una membrana con poros y presiones operativas cuyos valores se ubican entre los de las membranas de ultrafiltración y los de ósmosis inversa. Las presiones de operación típicas varían entre 70 y 250 psi (libras por pulgada cuadrada).

Las membranas de nanofiltración retienen una porción del total de sólidos disueltos (principalmente iones divalentes) y remueven la mayor parte de la materia orgánica disuelta presente en las aguas naturales, lo cual quiere decir que la nanofiltración es también muy eficiente para remover color.

En las plantas potabilizadoras la nanofiltración es útil para:

- 1 Desalinizar aguas salobres
- 1 Remover sustancias orgánicas precursoras de trihalometanos (THM) de las aguas superficiales.

Mecanismo de la desinfección con minifiltración

La desinfección en la minifiltración se alcanza al hacer pasar el agua que se va a tratar a través de la superficie de contacto de la membrana, donde las partículas del agua son retenidas o permeadas en función de su tamaño físico. Para ello se aplican diferencias de presión moderadas; la presión puede ser positiva cuando se aplica sobre el afluente y negativa (vacío) cuando se aplica sobre el efluente tratado.

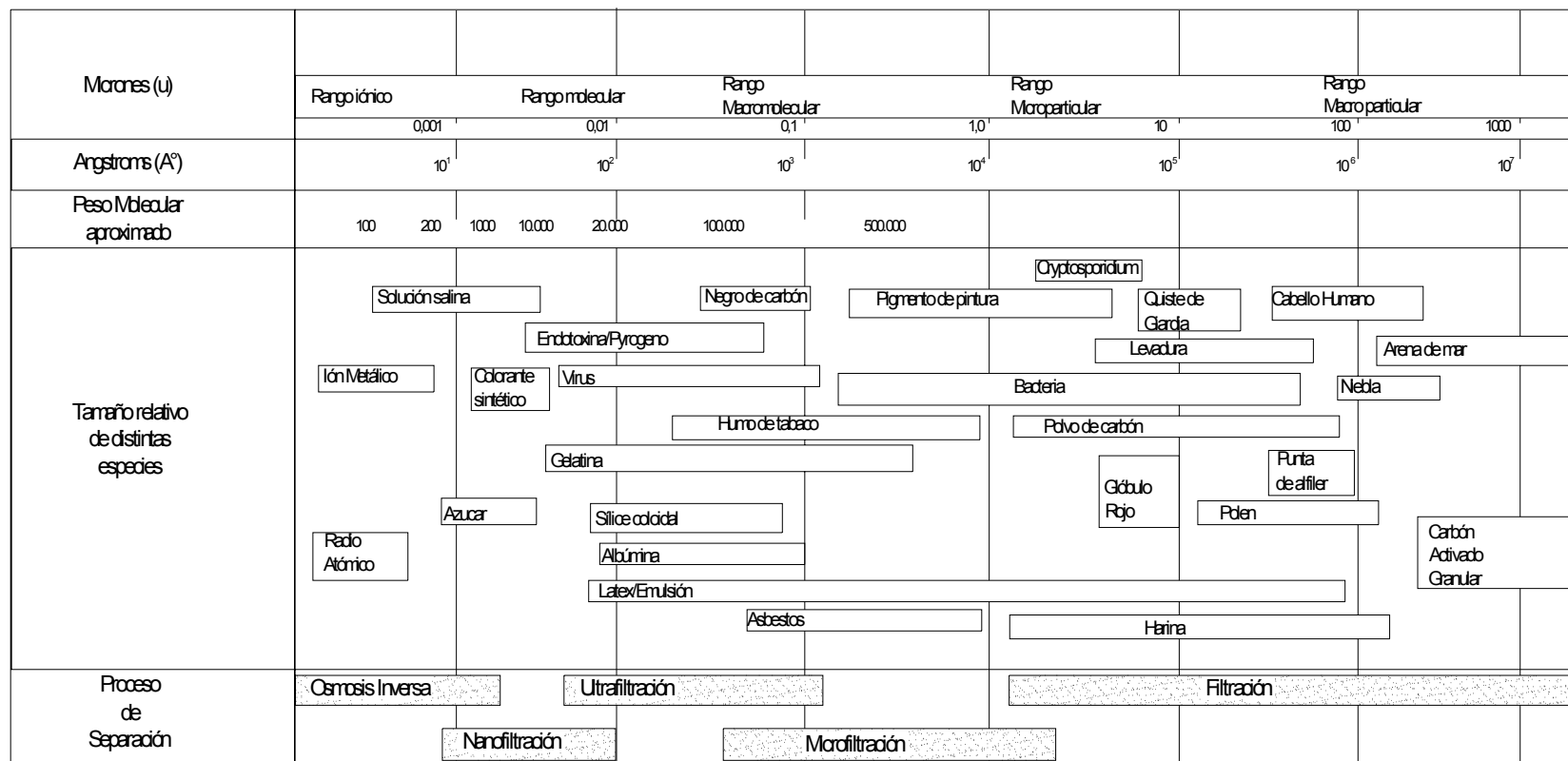
El cuadro de la siguiente página, permite ver en detalle una serie de especies, compuestos y microorganismos que las distintas técnicas permiten remover.

Subproductos de la desinfección con minifiltración

En la desinfección por minifiltración, que es un proceso netamente físico, no se genera ningún subproducto porque el método no emplea compuestos químicos.

Materiales y equipos empleados

Las membranas que se emplean en la minifiltración se componen de capas de hojas muy delgadas microporosas sujetas a una estructura de soporte más gruesa y porosa. Las membranas pueden ser de acetato de celulosa o de distintos tipos de cerámica, polisulfonatos y polivinildieno, mientras que la estructura de soporte generalmente está confeccionada en polipropileno, poliéster o hasta de politetrafluoretileno.



Clasificación de la minifiltración

Mientras que las membranas de cerámica y de metal se usan generalmente en aplicaciones industriales, las membranas poliméricas se están convirtiendo en una herramienta común para el tratamiento del agua potable y en aplicaciones municipales.

Como se ha mencionado, los dispositivos de la minifiltración trabajan con un diferencial de presión positivo o negativo (vacío) y se emplean diferentes tipos de membrana para cada uno de ellos.

a) Membranas operadas a presión

Inicialmente, estas membranas estaban diseñadas como láminas planas enrolladas en forma de espiral. Pero debido a su baja tolerancia a los sólidos y a las altas presiones que requerían para operar, sus costos operativos resultaban elevados. Ello dio lugar a que se usaran poco para la microfiltración. Sin embargo, se aplican cuando el objetivo no es la retención de sólidos, como sucede en la desalinización de agua salobre y agua de mar por medio de la nanofiltración u ósmosis inversa.

En la última década, para atender las necesidades de microfiltración con bajos costos operativos se desarrollaron las membranas de fibra hueca. Estas se han convertido rápidamente en el estándar de la industria y se aplican en el área de agua potable.

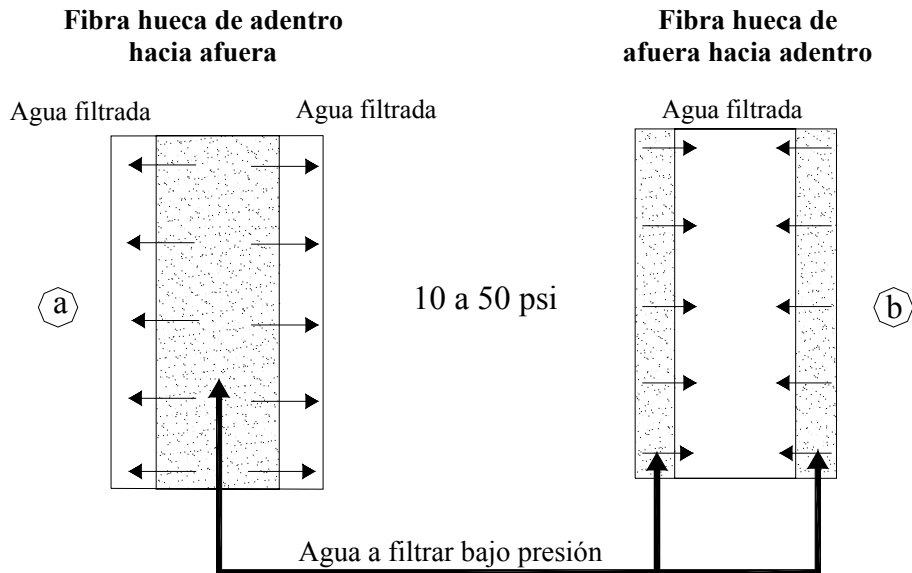


Algunas estructuras de membranas

Existen dos tipos de membranas de fibra hueca operadas a presión:

1 *Membranas de adentro hacia afuera*, en las que el afluente ingresa al interior de la membrana y el agua limpia se obtiene al pasar del interior de la membrana al exterior (figura a).

1 *Membranas de afuera hacia adentro*, en las que el afluente ingresa desde el exterior de la membrana y el agua limpia se obtiene al pasar del exterior de la membrana al interior (figura b).



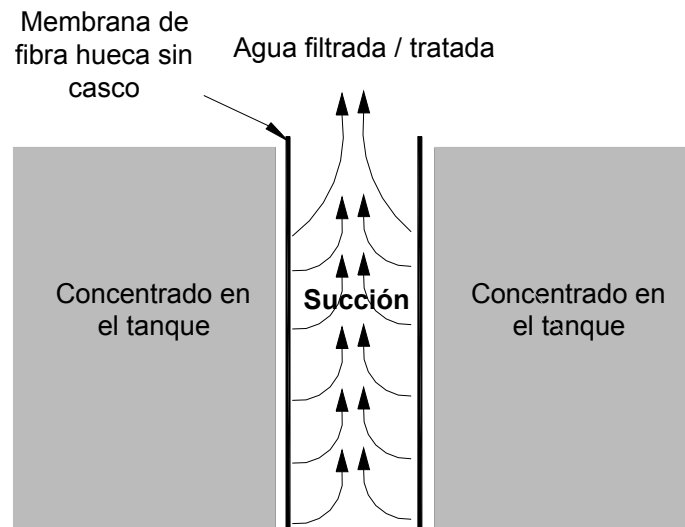
Modalidades de microfiltración bajo presión

Todas las membranas de fibra hueca a presión están instaladas en recipientes presurizados que aplican la presión necesaria para la transferencia adecuada del fluido. La presión de operación típica de estas membranas es de 10 a 50 psi.

b) Membranas operadas al vacío

Las membranas al vacío operan con una succión creada dentro de las fibras huecas por medio de una bomba. El agua tratada pasa a través de la membrana, entra a las fibras huecas y es bombeada para su distribución. Se introduce un flujo de aire en el fondo del módulo de la membrana para crear una turbulencia que frota y limpia el exterior de las fibras de la membrana y les permite funcionar con una tasa de flujo alta. Este aire también oxida el hierro y otros compuestos orgánicos y se obtiene agua de mejor calidad que la suministrada por la filtración común.

Cuando se usa una membrana de fibra hueca de afuera hacia adentro, la planta no necesita pretratamiento aunque el agua de alimentación contenga arcillas y partículas finas. Por ello reemplaza, en un solo paso, a la coagulación, floculación, clarificación y filtración por arena de las plantas convencionales y además elimina el pretratamiento requerido por las membranas espirales y las membranas de adentro hacia afuera.



Concepto operativo de una membrana de afuera hacia adentro sumergida



Membranas de minifiltración

En una planta de este tipo, las membranas están sumergidas en el denominado “tanque de proceso”, desde allí, el agua fluye hacia el interior de la membrana. El agua filtrada, ya limpia, es extraída por medio de una bomba. Un ventilador genera el aire requerido para mantener la membrana limpia. A continuación se presenta el diagrama de flujo de la planta.

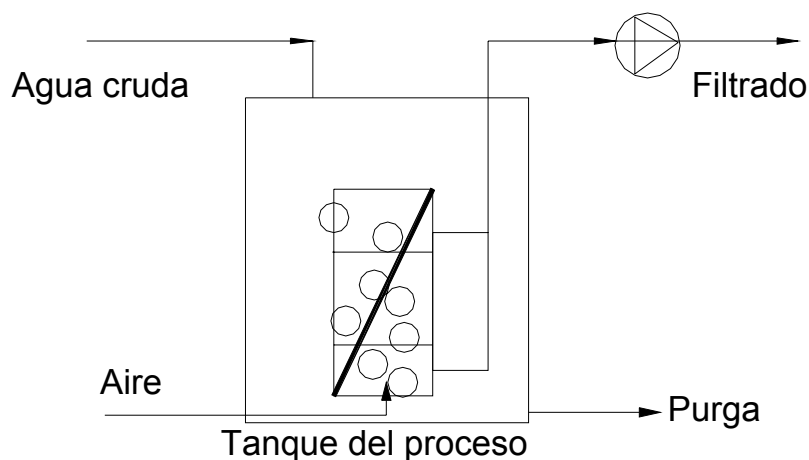


Diagrama de flujo de un microfiltro con membrana sumergida



Instalación de una membrana Szeged en el tanque del proceso ZeeWeed

➤ **Instalación y requerimientos**

Los equipos de minifiltración empleados en una planta potabilizadora están conformados por un conjunto de dispositivos filtrantes que trabajan en paralelo y que constituyen una sola estructura. Algunas de ellas son tan simples como pequeñas plantas empaquetadas y otras, como la de la figura, conllevan un buen grado de complejidad. La gama de equipos es amplia y pueden instalarse en comunidades grandes o pequeñas.

Todo el sistema de minifiltración es mecánico y requiere energía eléctrica, por lo que deberá estar bajo techo y no a la intemperie. Habrá que construir una habitación suficientemente amplia para facilitar la operación y el mantenimiento. Su instalación estará bajo responsabilidad de manos calificadas y deberá exigirse al proveedor la instalación del equipo. Se recomienda que dicha habitación sea construida con material noble por motivos de seguridad. Su diseño deberá contemplar el suficiente ingreso de luz para realizar cualquier operación durante el día. Para las operaciones que se realicen de noche se deberá contar con un buen sistema de luz artificial. Se recomienda que la puerta de ingreso sea metálica y no de madera, ya que en dicha habitación habrá equipo de valor económico y técnico.

Debe tenerse en cuenta que si bien el empleo de la minifiltración reduce las necesidades de pretratamiento, sin embargo, requiere del uso de un desinfectante de carácter secundario para asegurar la inocuidad del agua.

También hay que tener en cuenta la calidad de agua a tratar, ya que para diferentes pH y temperaturas hay un material de membrana indicado. Las primeras membranas de filtración se hacían de acetato de celulosa. Sin embargo, ese material no soporta niveles de pH que salgan del rango de 2 a 9 ni tampoco temperaturas mayores de 35° C. Además, las membranas de acetato de celulosa tienen una resistencia química limitada.

Para resolver estas limitaciones se han desarrollado las membranas poliméricas y de cerámica antes mencionadas. Comparadas con las de acetato de celulosa, las membranas de polisulfonatos se desempeñan independientemente del pH y pueden soportar temperaturas hasta de 110° C con buena resistencia química.

Las membranas de cerámica se usan en sistemas tubulares, generalmente en aplicaciones donde se necesita resistencia a pH extremos y niveles de temperatura extremos también.



Instalación típica de un equipo de minifiltración (OI)

Finalmente, y por obvias razones, si el agua cruda es excesivamente turbia, será aconsejable disponer de algún sistema de pretratamiento como un prefiltrado o una filtración gruesa por gravilla.

Operación y mantenimiento

La operación y el mantenimiento dependen del tipo de membrana y el material de la misma. Sin embargo, en todos los casos se deberá mantener un control sobre la presión, ya que a presiones mayores a un bar disminuye la capacidad de filtración. Para mantener esta tasa cuando se usa una membrana en el rango de microfiltración es esencial prevenir incrustaciones de los rechazos en la superficie de la membrana o dentro del soporte de la membrana. Esta acumulación de material aumenta la resistencia al flujo de permeado.

Se deberá tener cuidado de que el inyector de aire funcione permanentemente, ya que así se evitarán incrustaciones o deposiciones que colmaten el filtro. El sistema está diseñado para evitar la colmatación, siempre y cuando su operación sea la correcta.

Monitoreo

Para el monitoreo se deberán realizar pruebas y tomar muestras de agua tratada y no tratada a fin de controlar la eficiencia del sistema. Los parámetros que se deben analizar son: la cantidad de sólidos en suspensión y en solución en el agua tratada, y también el porcentaje de remoción de microorganismos. Hay que analizar los dos parámetros porque los microorganismos se protegen en los sólidos en solución y en suspensión.

Ventaja y desventajas

- 1 No requiere el uso de compuestos químicos en la operación.
- 1 Reduce la turbiedad, los sólidos suspendidos y parte del color del agua al eliminar las sustancias orgánicas.
- 1 Reduce la presencia de precursores de trihalometanos que puedan formarse con la cloración secundaria.
- 1 Reduce los costos de operación y disposición, permite mediciones más controladas y confiables, usa menos espacio y, maneja flujos y calidades constantes o variables.
- L Las membranas para tratamiento de agua, pueden trabajar en continuo, ahorran energía, son fácilmente escalables y combinables con otros procesos.
- 1 Entre las ventajas del uso de membranas en el tratamiento de agua potable se encuentran: el efecto de barrera absoluta contra los microorganismos, menor requerimiento de cloro para la desinfección secundaria y menor tamaño de la planta. Cada tipo de membrana también tiene sus ventajas específicas.
- 1 Los sistemas con membrana, especialmente los de bajo caudal, son compactos, fáciles de operar y pueden en el futuro convertirse en una tecnología interesante para pequeñas comunidades y ubicaciones remotas. Dado que son modulares, las plantas de membrana pueden construirse para tratar volúmenes tan pequeños como 40 l/minuto (suficiente para una población de 500 habitantes), pero actualmente también se están produciendo para plantas de tratamiento con flujos de hasta 1 m³ /s. La mayor planta de nanofiltración en Europa al comienzo del milenio (Mery Sur Ouse, París) trata 1,6 m³/seg y sirve a 500.000 residentes.
- 1 Otra ventaja importante es la remoción de hierro y manganeso debido a la oxidación de las formas hidrosolubles de estos elementos.
- 1 Entre las desventajas, aún existen problemas de contaminación de los materiales de soporte en la microfiltración, en los cuales se producen incrustaciones y por tanto disminuyen la eficiencia del proceso.
- 1 El proceso es simple y puede operar automáticamente, pero en caso de problemas es necesario recurrir a personal altamente capacitado que generalmente no se encuentra localmente
- 1 Los costos son mucho mayores que los de los métodos de desinfección más populares.

Costos de equipo, operación y mantenimiento

Es difícil determinar costos para estos equipos, pues dependen en alto grado del país y de la comunidad en donde se han de instalar. En todos los casos, esos costos son considerados altos y como regla general se calculan entre US\$ 200 a US\$ 300 de inversión de capital por cada metro cúbico agua a tratar por día. Los costos de capital para la ósmosis inversa pueden alcanzar niveles más altos, en ocasiones hasta casi 1.000 \$/m³ de agua a tratar.

Sería injusto, sin embargo, comparar esos elevados costos con los de una cloración simple, que son extremadamente bajos. La razón de ello es que la cloración es un tratamiento de desinfección, mientras que la minifiltración es un tratamiento de potabilización (mucho más amplio que el anterior) que conlleva también a la desinfección, la que podría considerarse como un subproducto del tratamiento.

Las mismas consideraciones podrían aplicarse a los costos de operación y mantenimiento y las cifras típicas pueden considerarse entre US\$ 0,4 y US\$ 0,8 por metro cúbico de agua tratada.

Fuentes de información

American Water Works Association Research Foundation; Lyonnaise des Eaux; Water Research Commission of South Africa. *Tratamiento del agua por procesos de membrana*. Ed. McGraw-Hill /Interamericana de España (1998).

Fane, A.G. *An overview of the use of microfiltration for drinking water and waste water treatment*. Anales del Simposio sobre "Microfiltration for water treatment". Irvine, California (1994).

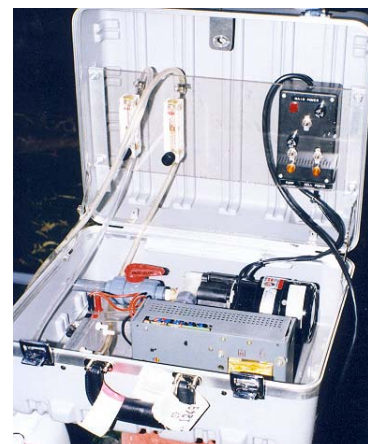
Mourato, D. *Aplicaciones de las membranas de microfiltración y nanofiltración en el área de agua potable*. Trabajo presentado en el Simposio OPS: Calidad de Agua, Desinfección Efectiva (1998). Publicado también en CD-Rom. Disponible en la OPS/CEPIS.

Zenon Municipal Systems. *Membrane systems for municipal drinking water treatment*. www.zenon.com

Zenon Municipal Systems, *Fotos*, www.zenon.com

Capítulo 9

MÉTODOS ALTERNATIVOS



Introducción

Si desinfectar es eliminar los microorganismos patógenos que puedan afectar la salud humana, desde el punto de vista estricto de las posibilidades desinfectantes, existe un sinnúmero de posibilidades de aniquilar esas pequeñas formas de vida. Históricamente se han realizado experimentos en los que los cambios bruscos, continuos y radicales tan solo de pH han servido para desinfectar aguas contaminadas.

La temperatura también es un factor clave. La ebullición es tal vez el más conocido y viejo método de desinfección. Pero no es necesario llegar a 100° C; basta una adecuada relación entre temperatura y tiempo para que, tal como se ha visto en el capítulo sobre la SODIS, se produzca la desinfección por la denominada “pasteurización”. Otros experimentos han mostrado que los cambios bruscos y repentinos de alta a baja temperatura, sin requerimiento de tiempo de permanencia, también son efectivos para eliminar microorganismos.

A fines del siglo XIX, cuando ya se conocía la existencia de las bacterias y su relación con las enfermedades, se trabajó con presiones. Se colocaba agua contaminada en recipientes herméticos y se sometía a presión. Al cabo de unos minutos, la presión era llevada bruscamente a la presión atmosférica y el resultado era simple y llano: agua pura, libre de gérmenes.

Experimentos similares con agitaciones continuas y violentas por largos períodos también habrían resultado en desinfección. En ciertas culturas antiguas se colocaba el agua para bebida en jarrones de plata. Sin conocer el mecanismo, sabían que luego de un tiempo de contacto en esos recipientes, esa agua era segura para consumir. La lista es prácticamente interminable. Se pueden eliminar microorganismos mediante una variedad de metodologías.

Sin embargo, es obvio que solo pocas entre tantas posibilidades son viables. El poder de aniquilación únicamente no es suficiente. Debe ir acompañado de características específicas, como la simplicidad del equipo y la facilidad de operación y mantenimiento. Si se utilizan sustancias químicas, deben estar disponibles en el lugar de uso. Debe haber rapidez en la acción desinfectante y la economía del método es vital. No deben haber riesgos que sean excesivos ni deben cambiar las características del agua; ya se ha hablado del problema de los subproductos de la desinfección.

Todo ello limita la larga lista de “posibles” y este manual ha descrito en detalle (hasta este punto), solo aquellos que por sus características especiales han merecido tal distinción. Pero hay otros, que sin ser excesivamente obtusos y sin haber entrado en la categoría de los más dotados, presentan características intermedias. Son aquellos que han sido utilizados en situaciones especiales (por ejemplo, en emergencias y desastres) o los que están en etapa de experimentación o desarrollo, o que por solo una o dos razones específicas (por ejemplo, costo o limitación del caudal a tratar) son buenas pero no ocupan la primera línea. En este capítulo se hará una breve descripción de ellas como información necesaria para el ingeniero o técnico que desea conocer todas las posibilidades de la desinfección.

Desinfección con bromo

Descripción

____ Siendo de la familia de los halógenos, el bromo es muy parecido y actúa también en forma semejante al cloro: una vez disuelto en el agua produce ácido hipobromoso (HOBr) un primo hermano del ácido hipocloroso (HOCl). El poder de desinfección del HOBr es muy alto, aunque ligeramente menor que el del hipocloroso.

La ventaja del uso del bromo es que a temperatura ambiente es líquido, lo que lo hace más simple de manipular y dosificar que el cloro. Hay que destacar, sin embargo, que la sustancia como tal es corrosiva y agresiva, por lo su manejo también requiere mucho cuidado. Además, la

disponibilidad del bromo en cualquier país o ciudad no se compara con la fácil adquisición del cloro.

Efectos del bromo sobre la salud y producción de SPD

El bromo se vaporiza con mucha facilidad y los gases son muy agresivos, por lo que se debe evitar su inhalación. Hay que destacar que al igual que el cloro, tanto éste como el bromo no parecen indicar ningún potencial cancerígeno per se o cuando se disuelven en el agua. El agua clorada y el agua bromada no son cancerígenas. Pero el bromo al igual que el cloro, forma trihalometanos y si hay presencia de ácidos fúlvicos y de amoníaco en el agua cruda, entonces formará bromoformo. Este es el riesgo, pues estos compuestos sí son cancerígenos y al igual que muchos otros SPD son motivo de preocupación.

Acción desinfectante del bromo

Como se ha mencionado, el HOBr actúa de manera similar al HOCl; esto es, penetrando las membranas de las células de los microorganismos. Una vez dentro de la célula, su sola presencia parece “desorganizar” la estructura de aquellos pero atacan también reaccionando con grupos sulfhidrilos, inactivando enzimas y deteniendo el proceso metabólico, lo que lleva a la muerte del microorganismo.

Equipos

Al ser líquido, el bromo se dosifica por medio de una bomba de diafragma o pistón y sus requerimientos operativos como las medidas de seguridad son semejantes a las usadas y descritas para el cloro.

Monitoreo

No existe una prueba específica para el bromo. En análisis de rutina y aunque el método está sujeto a interferencias, se utiliza el método de la orto-tolidina, tal como se emplea en la determinación de cloro.

Costos

Como se ha indicado, el bromo actúa en el agua de forma similar al cloro y podría haber sido tan popular como este último si no fuera por las diferencias de costo. A igualdad de equipos dosificadores, se estima que la bromación es cinco veces más cara que la cloración y a eso hay que sumarle la difícil disponibilidad del bromo.

Ventajas y desventajas de la desinfección con bromo

La desinfección con bromo presenta casi todas las ventajas de la cloración, pero tiene dos grandes desventajas frente a éste: su costo mucho más elevado y la dificultad para adquirirlo en cualquier comunidad, sobre todo en aquellas alejadas y menores de los países en desarrollo.



Desinfección con plata

Descripción

La mayoría de los metales presenta la propiedad llamada “oligodinamia” que significa “efecto o poder en pequeña cantidad”. Metales como la plata, el cobre, el mercurio, el manganeso y el hierro, entre otros, son potenciales desinfectantes del agua. Sin embargo, de todos ellos y por variadas razones, solo la plata ha tenido algún uso en la desinfección del agua para consumo humano y como tal ha sido utilizada desde la antigüedad.

Efectos de la plata sobre la salud y producción de SPD

La plata no es particularmente tóxica para los seres humanos y al ser ingerida, el cuerpo absorbe solo fracciones muy pequeñas de ella. En ciertos tratamientos médicos que usan dosis altas del metal se ha detectado descoloramiento de la piel, pelo y uñas (argiriosis), pero en las concentraciones que se utilizan para desinfectar el agua, no se ha observado ese inconveniente. La OMS no ha propuesto un valor guía para la plata en el agua de bebida, precisamente por esa relativa seguridad que manifiesta. En el tratamiento con plata no se producen sabores, olores ni colores anormales en el agua. Tampoco hay formación de SPD.

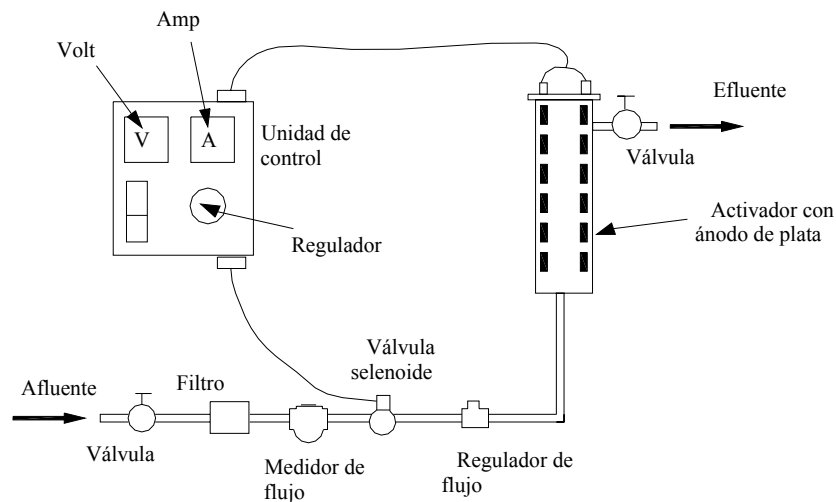
Acción desinfectante de la plata

La plata solo tiene propiedades desinfectantes en su estado coloidal, esto es cuando se presenta en partículas extremadamente pequeñas que permanecen en suspensión y que por su tamaño se cargan eléctricamente con mucha facilidad. En ese estado también es conocida como proteína de plata, sales de plata, proteína de plata ligera y proteína de plata fuerte. Las sales que se utilizan son: cloruro de plata y yoduro de plata.

La plata en su forma coloidal no elimina a los virus, pero se considera de gran eficacia para destruir diversas bacterias. El mecanismo de desinfección actúa por la inactivación de las enzimas de las células bacterianas y hongos que usan oxígeno para su metabolismo, pues causa una disrupción celular, aunque en tiempos muy variables y dependientes de la temperatura. Al respecto, a temperatura de 10 °C o menores se requieren tiempos muy largos, lo que hace difícil determinar el poder germicida con exactitud. La plata coloidal puede permanecer largo tiempo en el agua, pero debido a esa lentitud en las reacciones de eliminación de materia orgánica, se considera que la plata no posee un buen poder residual. Las dosis recomendadas para una alta eficiencia germicida están en el rango de 25 a 75 microgramos de plata por litro (0,025 – 0,075 mg/l).

Equipos

En la desinfección con plata se emplean tres métodos. El primero o “de contacto” requiere hacer pasar el agua a través de dispositivos saturados de plata, como tanques con paredes y pantallas recubiertas con pinturas especiales que la contienen. El segundo método consiste en dosificar soluciones de plata de baja concentración de la misma forma como se hace con las soluciones de cloro y empleando equipos y dosificadores similares. El tercer método, el electrolítico, parece ofrecer el procedimiento más práctico para usar la plata. Hace uso de un número de electrodos de plata conectados al polo positivo (ánodo) de una fuente eléctrica de bajo poder. Un electrodo inerte se usa como polo negativo, donde se produce y libera hidrógeno. Por electrólisis, los iones de plata son liberados por los electrodos dentro de la corriente de agua a ser tratada en proporción a la corriente suministrada. Esto es muy apropiado, pues mediante la variación de la corriente, se varía la dosificación.



Equipo electrolítico de plata típico.

El método electrolítico solamente se emplea en pequeños sistemas de abastecimiento de agua. Desde el punto de vista práctico y seguro, se precisa de cierto nivel de automatización y complejidad en el sistema de control, que debe tener sensores para verificar la correcta desinfección. Esto simplemente no se puede hacer en forma manual. También es recomendable tener una conexión a una válvula solenoide que pueda cortar automáticamente el flujo de agua en cualquier momento que el sistema no pueda producir la dosificación adecuada.

Monitoreo

En lo que respecta al monitoreo, no hay una prueba simple para la medición del contenido de plata en el agua y la que se aplica presenta un considerable error de exactitud. El método más efectivo es la dosificación del agua con cantidades controlables de plata; es decir, el control se efectúa básicamente en la dosificación y no en el control analítico después de la misma.

Costos

El costo de la pintura no es excesivamente alto, pero este método es el menos apropiado. Para una pequeña población, la dosificación de una solución requiere los equipos ya mencionados para el cloro, en donde la gama de bombas dosificadoras de diafragma es muy variable y los costos no son abultados. El costo de las soluciones, en cambio, es más elevado y en todo caso notoriamente más alto que las soluciones equivalentes de cloro con igual capacidad bactericida.

Para los pequeños sistemas, los equipos electrolíticos presentan costos considerables que van de \$ 1.000 en más. El costo final depende del tamaño, del caudal a desinfectar y de los equipos auxiliares. En lo que respecta al costo de operación de estos últimos equipos, además del costo de la solución de plata, debe considerarse el costo de la energía eléctrica. En lo que respecta al mantenimiento, éste también es de consideración porque el reemplazo de los electrodos es

relativamente frecuente, puesto que son la única fuente de iones de plata y se gastan relativamente rápido.

Ventajas y desventajas de la desinfección con plata

Las aparentes virtudes de la plata para el tratamiento del agua son que no produce sabor, olor ni color en el agua tratada y no hay formación de productos adicionales.

Es una metodología muy simple y fácil de manejar en las áreas rurales del mundo en desarrollo. Por ello puede ser utilizada en los planes de desinfección del agua en el nivel familiar.

____ Su desventaja es que resulta difícil controlar la dosificación por falta de un método simple de análisis de laboratorio. La segunda desventaja, y esta ha sido históricamente una barrera casi infranqueable, es que los costos de producción son altos. Tanto el método electrolítico donde los electrodos necesarios para producir los iones de plata se desgastan relativamente rápido, como la dosificación de plata coloidal son de alto costo. Se estima que el costo de la desinfección con plata resulta 200 a 300 veces superior al costo de la cloración.

Desinfección con yodo

Descripción

El yodo pertenece a la familia de los halógenos y a temperatura ambiente es sólido. Tiene baja solubilidad en el agua y es la sustancia menos agresiva de su familia (cloro + bromo).

Efectos del yodo sobre la salud y producción de SPD

A diferencia del cloro y el bromo, sustancias que per se no producen problemas cuando se ingieren en las concentraciones normales que se encuentran en el agua, el yodo sí presenta problemas por sí mismo. En realidad, la preocupación cuando se utiliza el yodo no está tanto en los SPD, sino en su misma acción.

Si bien el yodo es indispensable para la síntesis de las hormonas de la tiroides, no está claro qué ocurre cuando se suministra en el agua de consumo con eventuales excesos. En el mundo se han registrado numerosos casos de “yodismo”, lo que puede definirse como una reacción alérgica de las personas hipersensibles al yodo cuando las dosis consumidas son mayores que las requeridas diariamente. Según la OMS, “el consumo de agua yodada no aparenta haber causado efectos adversos en la salud humana, a pesar de que se han observado algunos cambios en el estado de la glándula tiroides”. Asimismo, la OMS expresa en las “Guías OMS para la calidad del agua de bebida”, volumen 2, que: “existe poca información relevante sobre los efectos del yodo”. Y agrega que: “debido a que el yodo no es recomendado para la desinfección del agua por largos períodos de tiempo, la exposición al mismo a partir de la ingesta de agua de bebida es poco probable”.

Al igual que los otros miembros de su familia, esta sustancia produce SPD. Sin embargo, debido a su menor potencial de oxidación y menor reactividad, ésta genera menos THM que los otros.

Acción desinfectante del yodo

Al igual que el cloro y el bromo, una vez disuelto en el agua el yodo forma el hipo-ácido correspondiente (en este caso el hipoyodoso) HOI. Sin embargo, dependiendo del pH, una parte (que puede ser considerable), permanece en el agua como I₂. El siguiente cuadro da una idea de las

concentraciones relativas de cada compuesto dependiendo del pH y las mismas se han contrastado con las concentraciones relativas del ácido hipocloroso y del ión hipoclorito.

Porcentaje de especies del yodo y del cloro según el pH de la solución

pH	I ₂	HOI	OI-	Cl ₂	HOCl	OCl-
5	99	1	0	0	99,5	0,5
6	90	10	0	0	96,5	3,5
7	52	48	0	0	72,5	27,5
8	12	88	0,005	0	21,5	78,5

Cabe destacar que el ión hipoyodito no es un buen desinfectante, pero que tanto el I₂ como el ácido hipoyodoso sí lo son y además presentan características microbicidas muy deseables. Ambos son buenos bactericidas y destruyen inclusive esporas, quistes y virus.

Cuando se utiliza yodo como desinfectante de emergencia y en volúmenes pequeños, las dosis son mayores que las que se emplean en la desinfección de sistemas de agua. En estos casos es común utilizar soluciones desde 1 hasta 8 mg/l, con tiempos de contacto de 30 minutos como mínimo. Cuando se utiliza tintura de yodo, que se prepara con una concentración de 2%, se recomienda una dosis de dos gotas por litro de agua a desinfectar.

Equipos

El yodo puede ser adicionado al agua pasando una corriente de vapor a través de un manto de cristales de la sustancia y disolviendo luego el vapor en agua. Sin embargo, el método más recomendado es el de preparar una solución saturada pasando una corriente de agua por un lecho también de cristales de yodo y luego dosificarlos con una bomba de diafragma convencional.

Monitoreo

Hay dos métodos para determinar el yodo en el agua. El más utilizado es la titulación amperométrica y el segundo es la espectrofotometría utilizando como reactivo la N,N dimetilnilina o leuco cristal violeta (LCV). Si bien no son métodos complicados, requieren cierto nivel de capacitación de los operadores o químicos de planta para realizar estas pruebas.

Costos

Como en el caso del bromo, a igualdad de una serie de parámetros de operación (equipos, sencillez, fácil manejo, etc.), tanto el costo (10 a 20 veces mayor) y la dificultad en obtenerlo en zonas alejadas en los países en desarrollo lo hacen muy poco competitivo con el cloro y sus derivados.

Ventajas y desventajas de la desinfección con yodo

Presenta la sencillez de la cloración. Sin embargo, el uso del yodo durante períodos prolongados para la desinfección del agua ha sido debatido por muchos organismos de salud, principalmente en relación con los efectos fisiológicos que el yodo puede ejercer en personas sensibles a esta sustancia. Y aunque no han habido pruebas contundentes ni información amplia ni confirmada, al tomar la decisión de implementar o no la yodación como método de desinfección se deben tomar esas consideraciones por encima de los costos superiores, que también son razones contundentes.

Su facilidad de manejo, en cambio, lo convierte en una buena opción para la desinfección en casos de emergencia.

Desinfección con dicloro isocianurato de sodio (NaDCC)

Descripción

El dicloro isocianurato de sodio, llamado muchas veces “isocianurato de sodio” y que se reconoce por la sigla “NaDCC”, es un compuesto que libera cloro en concentraciones muy precisas. Presenta una excelente capacidad de manipulación y una concentración alta de cloro activo (60%). Es muy práctico en su uso, y el agua tratada no tiene el olor y sabor que puede dejar un tratamiento con los compuestos de cloro usuales. Tiene una larga estabilidad lo que es ideal para mantenerlo en depósito por períodos de tiempo mucho mayores que cualquier otro compuesto de cloro. Se estima que en condiciones adecuadas puede sobrepasar los cinco años de almacenamiento sin perder su potencia.

Efectos del NaDCC sobre la salud y producción de SPD

Como se verá en el punto siguiente, el NaDCC al ser disuelto en agua produce una molécula de cianurato de sodio. No está claro cual es la acción de este compuesto, así como la del mismo isocianurato sobre la salud humana; y es precisamente esta falta de información la que ha evitado el uso indiscriminado del método a pesar de todas sus bondades.

La OMS ha expresado que “existe preocupación sobre el potencial tóxico que pudiera tener el NaDCC sobretodo en usos prolongados como desinfectante de aguas para consumo humano” y agrega que: “la causa de esa preocupación es la falta de suficiente evidencia sanitaria y toxicológica para emitir un juicio definitivo”.

Esto significa que no se condena a este compuesto porque sea perjudicial para la salud, sino que simplemente no se aconseja su uso en desinfección prolongada, debido a la falta de información tanto sobre los daños que pueda causar en la salud, como así también por la falta de conocimientos sobre su inocuidad.

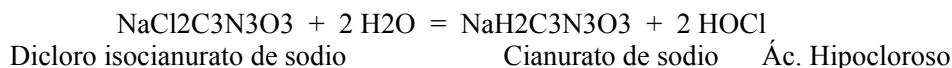
Esta situación muy posiblemente se aclarará con los estudios que se vayan realizando y la información que se comience a evaluar a nivel mundial; pero por el momento, el uso de este compuesto solo es recomendado en algunos países para desinfecciones de emergencia, lo que tácitamente está suponiendo que su uso será por espacios cortos de tiempo.

En relación a los SPD, se está en la misma situación. No solo no se conoce los problemas derivados de los eventuales SPD generados a partir de los cianuratos, sino que sumados a esos eventuales, deben contarse los clásicos SPD del ácido hipocloroso, entre los que ya se han mencionado en numerosas oportunidades a los THM.

Todo lo analizado en el caso del isocianurato de sodio permite elaborar la siguiente sugerencia: Desinfección sistemática no. Desinfección de emergencia sí.

Acción desinfectante del NaDCC

El dicloro isocianurato de sodio, es un compuesto orgánico derivado del isocianurato que cuando se disuelve en el agua libera ácido hipocloroso según la siguiente reacción:



Su potencial desinfectante deriva de la presencia del último de los compuestos, el ácido hipocloroso, cuyas cualidades se han descrito en el capítulo 3.

Equipos

Se utiliza cualquier equipo dosificador de los ya mencionados en el capítulo del cloro, ya que el NaDCC se disuelve en agua para formar una solución típica.

Monitoreo

Lo que se monitorea es el cloro residual, por lo que tanto el método del DPD o de la ortotolidina son viables.

Costos

Son ligeramente mayores que los compuestos tradicionales del cloro, tales como hipoclorito de sodio o calcio.

Ventajas y desventajas de la desinfección con NaDCC

Entre las ventajas se destacan la simplicidad, estabilidad y facilidad de manejo del compuesto. No deja los olores ni sabores característicos de otros compuestos de cloro. Deja un residual.

La mayor contra es la falta de evidencia en cuanto a su inocuidad cuando consumido por largos períodos de tiempo.

Desinfección con mezcla de gases oxidantes

Descripción

Si bien en la primera mitad del siglo XIX Faraday sentó las bases de la electrólisis y trabajó extensamente en la producción de cloro a partir de cloruro de sodio, tal técnica quedó desde aquellos tiempos hasta la era actual, como una importante rama de la industria pesada moderna, de la que la ingeniería sanitaria hizo uso con la incorporación masiva del cloro como desinfectante del agua.

En la década de 1970 y posiblemente influenciados por los nuevos conceptos de la tecnología apropiada, que surgió como una forma de remediar la falta de una tecnología realista y aceptable por las comunidades rurales de los países en desarrollo, hubo un vuelco en la percepción de la electrólisis de Faraday. Ya no se la veía como una técnica solo factible de operar en grandes fábricas, sino como la base para una metodología simple, que con solo electricidad y sal de mesa (cloruro de sodio), permitía a las pequeñas comunidades y aún a los usuarios individuales, la preparación de su propio cloro *in situ*, en su propia casa.

Surgen así investigadores que concentran su trabajo en reducir la escala, desde la gran fábrica al taller rural, a la planta de tratamiento del pequeño pueblo, a la casa de familia. Se producen entonces una serie de equipos de electrólisis, los que se pueden dividir en dos grandes grupos: la

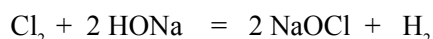
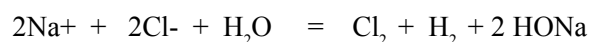
electrólisis con membrana y sin membrana. Los equipos de membrana reproducen la técnica de la producción industrial del cloro y los equipos sin membrana producen soluciones de hipoclorito de baja concentración.

Un hecho interesante acompaña a las investigaciones de estos equipos. Tratando de escapar de las restricciones que las numerosas patentes plantean a cualquier electrólisis de cloruro de sodio, los investigadores juegan con la posición de los electrodos, especialmente con los ánodos dimensionalmente estables (DS Anodes), y producen equipos que no solo generan cloro, sino que por las disposiciones de los electrodos, también generan otras especies altamente oxidantes, entre las que se cuentan radicales de variados tipos: ozono, oxígeno naciente, oxígeno atómico y otros. Esta mezcla de gases oxidantes es denominada genéricamente por la OPS como MOGGOD (mixed oxidant gases generated on site for disinfection o mezcla de gases oxidantes generados *in situ* para desinfección). Estos gases configuraban una mezcla altamente concentrada y oxidante debido a que la producción en la celda electrolítica estaba independizada en semiceldas separadas.

El compartimento catódico producía hidrógeno y el anódico los gases oxidantes. Ambos compartimentos o semiceldas estaban separados por una membrana especial, solo permeable a ciertos iones.

Esta peculiaridad, la membrana, fue responsable del éxito inicial y del fracaso siguiente, ya que la membrana requería una operación delicada y un mantenimiento, que aunque simple, era imprescindible para que el equipo operara en forma óptima. En la década de 1980, se instalaron muchos equipos en pequeñas comunidades, pero pocos sobrevivieron a las necesidades de operación y mantenimiento que el medio rural de los países en desarrollo no podía brindarles y hoy son muy pocos los que sobreviven.

La otra técnica, la de electrólisis sin membrana, es mucho más simple. Se trata tan solo de dejar que la producción de cloro en el medio básico siga su ruta de reacciones químicas y produzca sin mucha intervención ni riesgo una solución, que si bien es muy débil (generalmente es una solución de 0,6% en cloro activo), es fácil de utilizar y manipular. Este proceso no es obviamente la producción de mezcla de gases oxidantes, pero se incluye aquí pues su origen fue común. El hipoclorito se produce según la siguiente reacción:



Si bien los sistemas MOGGOD tuvieron un inicio promisorio, la necesidad de operación y mantenimiento hizo que solo tuvieran éxito aquellos de producción de hipoclorito.

Efectos de la mezcla de gases oxidantes sobre la salud y producción de SPS

Como estos equipos básicamente son productores de cloro, son válidas todas las consideraciones sobre efectos de salud y sobre producción, manejo y riesgos relacionados con los SPD del cloro, tal como fuera mencionado en el capítulo 3.

Acción desinfectante de la mezcla de gases oxidantes

Se aplican las mismas consideraciones que para el cloro. Sin embargo, se debe destacar que en el caso de los MOGGOD, algunos componentes de la mezcla producían una acción tan fuerte y

tan sinérgica (ver más adelante en este mismo capítulo) que se pensó que ningún microorganismo ni ningún compuesto orgánico podría resistir tal poder oxidante.

Equipos

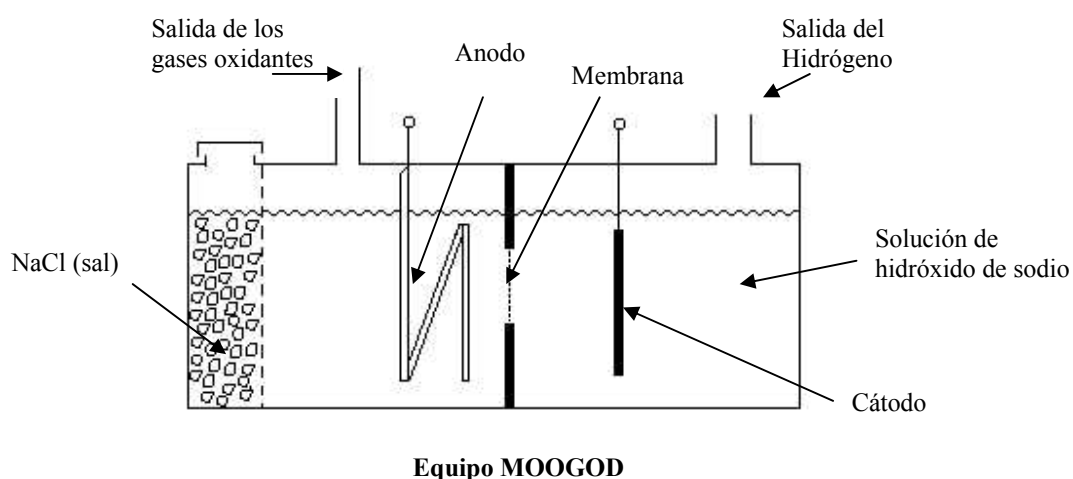
En el caso de los productores de hipoclorito *in situ*, ya se vieron los equipos en el capítulo 3 “Cloro”.

Unos pocos equipos diseñados en los Estados Unidos producen hipoclorito *in situ*, pero dentro de una corriente de agua y existen unos 200 de ellos en parques nacionales y pequeñas comunidades de ese país.

La siguiente figura muestra los componentes de un equipo MOGGOD.

Los gases oxidantes que salen del equipo son inyectados en una tubería que cuenta con un Venturi.

Equipo de producción de hipoclorito dentro de una corriente de agua



Monitoreo

Los gases oxidantes se monitorean exactamente igual que el cloro residual y las técnicas empleadas son también las mismas: orto-tolidina y DPD.

Costos

En general, los equipos MOGGOD eran pequeños, con pocas excepciones de equipos grandes. El rango de precios variaba desde US\$ 500 hasta US\$ 4.000. Los costos operativos son muy bajos, ya que la sal de mesa (el insumo principal) siempre tuvo y tiene un costo sumamente reducido. Al trabajar con bajo amperaje, la electricidad tampoco representaba costos considerables.

Ventajas y desventajas de la desinfección con mezcla de gases oxidantes

Los equipos de producción de hipoclorito *in situ* están dando buenos resultados. Una vez producida la solución de hipoclorito, las posibilidades que se abren son 1) dosificarlo en sistemas de agua potable, 2) usarlo para desinfectar el agua, pero no en el nivel comunitario, sino unifamiliar y 3) efectuar programas de distribución de frascos con hipoclorito para la desinfección casera. Si bien han habido avances en los tres campos, la fase de producción de hipoclorito en un nivel centralizado (un hospital, una escuela, un centro comunitario) y la distribución a un número determinado de familias es la que más éxito ha tenido.

Desinfección por radiación

Descripción

En el capítulo 4 se abordó el tema de la desinfección ultravioleta, que consiste simplemente en colocar una sustancia (en este caso el agua) ante una radiación de una cierta longitud de onda.

Existen otros dos tipos de radiación que solo se han usado experimentalmente, pero que potencialmente podrían utilizarse en el futuro con buena capacidad de desinfección. Esas radiaciones son las “gamma” y las “X”.

Efectos de la radiación sobre la salud y producción de SPS

Al igual que con las radiaciones ultravioletas, no se presentan problemas sanitarios ni SPD.

Acción desinfectante de la radiación

Cualquier radiación está caracterizada por una longitud de onda particular. La longitud de onda es inversamente proporcional a la frecuencia de la onda, lo que significa que a menor longitud de onda mayor frecuencia; y es casi intuitivo que una mayor frecuencia está asociada con una mayor fuerza o energía. De hecho así es, y siendo las radiaciones gamma y X de mayor frecuencia que la ultravioleta, su energía es mayor, por lo tanto, su capacidad bactericida es mejor que la de esta radiación.

Se han reconocido dos mecanismos de desinfección por radiación: uno donde la potencia de la radiación daña el DNA del microorganismo y el segundo donde el choque de aquella contra algunos átomos de oxígeno componentes de la célula o células genera ozono y otros radicales que la disturban hasta su aniquilación.

Equipos

No existen equipos específicos para el tratamiento de agua por radiación gamma o X. Los que existen están basados en las emisiones de bombas de cobalto; son bastante complicados y su operación si bien no es difícil, requiere personal especialmente capacitado.

Costos

No hay datos fidedignos de los costos de este tipo de tratamiento del agua y dadas sus pocas posibilidades de ser una técnica de uso extendido, tampoco se han hecho estudios comparativos entre las diferencias de desinfectar comestibles y agua. Sin embargo, no hay duda de que si se implementara esta técnica ahora, sus costos serían muy superiores a los métodos de desinfección más tradicionales y extendidos.

Métodos de desinfección sinérgicos

Descripción

Según el diccionario, el término “*sinergia*” significa “la interacción y actividad combinada de dos o más entes biológicos, sustancias o componentes. La resultante es cualitativa y cuantitativamente distinta de la sumatoria de las capacidades individuales”. Dicho de otra forma, en la sinergia se cumple que: $1 + 1 \neq 2$; pudiendo ser el resultado por ejemplo: 0,7 ó 3.

En el caso específico de las sustancias utilizadas como desinfectantes, si sumando las capacidades individuales de cada uno de ellos se obtuviera una capacidad resultante mayor que la suma de las dos (en el caso del ejemplo, si sumando $1 + 1$ se obtuviera 3), entonces se habría descubierto una nueva sustancia mucho más potente o con mejores atributos que cualquiera de los atributos de las dos sustancias individuales y aún de los atributos sumados de ellas dos. Eso es lo que ocurre exactamente en algunos casos especiales. Y eso es lo que se llama “sinergia de la desinfección”.

No existen muchos de ellos, pero los que se mencionan a continuación son promisorios y hablan de un nuevo campo que se irá agrandando y enriqueciendo con nuevas investigaciones, experiencias y descubrimientos.

Los casos que más se han estudiado son los siguientes:

- 1 Plata/peróxido de hidrógeno
- 1 Plata/cobre
- 1 Plata/cobre/cloro
- 1 Yodo/cloro
- 1 Ozono/peróxido de hidrógeno
- 1 Ozono/UV.

Efectos de los métodos de desinfección sinérgicos sobre la salud y producción de SPS

Existe información sobre cada una de las sustancias desinfectantes por separado, pero como se ha dicho, si la resultante de la unión no tiene los mismos atributos que los componentes individuales, entonces también se debe suponer que los efectos sobre la salud o la formación de SPD no serán necesariamente los esperados. Puede haber sorpresas y serán necesarios largos

estudios para llegar a la certeza de la inocuidad o para determinar el nivel de riesgo asociado con cada producto sinérgico.

Acción desinfectante de los métodos sinérgicos

En todos los casos, la acción desinfectante es mucho mayor que la suma de cada sustancia componente del producto sinérgico. Los mecanismos no siempre se han llegado a conocer, pero la mayoría son los que ya se han mencionado (oxidación, destrucción de enzimas, disturbios en los mecanismos de vida y reproducción de las células, etc.), pero obviamente todos ellos ampliados y potenciados.

Equipos

No difieren de los equipos que utilizan cada una de las técnicas individual-mente. En el caso del método yodo/cloro, la dosificación de cada uno de ellos o de la mezcla, se realiza por medio de las mismas bombas dosificadoras de diafragma.

Monitoreo

No hay mucha información sobre estos monitoreos, pero se sobreentiende que responden a las técnicas normales de detección química vigentes.

Costos

No hay clara información sobre costos, pero sin lugar a dudas son mayores que los costos de uso de cada sustancia individualmente.

Ventajas y desventajas de los métodos de desinfección sinérgicos

La ventaja es un gran poder desinfectante que en algunos casos elimina los riesgos y peligros asociados al uso de las sustancias en forma individual. Un caso típico es la disminución de los SPD.

Filtros de nivel familiar

Descripción

Si bien los pequeños filtros caseros no tienen capacidad para tratar volúmenes considerables de agua, se incluyen en este manual porque si están bien manejados y acompañados de programas de información y educación comunitaria representan una forma importante de mejorar la calidad del agua consumida por la población dispersa en las áreas rurales.

El tema es un tanto conflictivo pues en el mercado existe una cantidad enorme de filtros, con una gama de procesos (técnicas) y una variedad de formas y capacidades, que hacen muy difícil su clasificación y calificación. Es también importante destacar que muchos de esos filtros están confeccionados de forma comercial y no científica. Muchos de ellos están hechos para ganar dinero y no necesariamente son lo que proclaman ser.

Finalmente es altamente importante recalcar la necesidad de que el usuario mantenga una conducta sin fallas respecto a la limpieza de los elementos y al cambio de los cartuchos. De no ser así, tal como se comentará, estos filtros pueden transformarse en un problema mayor que el que pretendían solucionar.

Los filtros caseros se usan para: 1) eliminar la turbiedad, 2) remover olores y sabores y algunas sustancias orgánicas, entre ellas los SPD, y 3) desinfectar. Algunos equipos solo cubren una de esas funciones, mientras otros satisfacen dos o los tres propósitos mencionados. Obviamente que si se desea agua segura, deberá utilizarse la variedad de filtro que permita la desinfección.

En los filtros caseros, la desinfección se realiza por filtrado o por algún método físico o químico. En el primer caso, el agua pasa por velas de poro muy pequeño que retiene hasta microorganismos bacterianos. Son velas de cerámica de poro generalmente menor de 0,4 micrones de diámetro.

En el segundo caso, los filtros desinfectantes más comunes emplean UV o arenas recubiertas de plata.

No hay comentarios especiales sobre este tema, pues ya se han comentado al hablar de las radiaciones UV y la desinfección con plata. Estos filtros práctica-mente no tienen posibilidad de producir SPD (con una aclaración que se verá en el próximo punto).



Sistema CEPIS

Filtro con velas colocadas dentro de arena fina y con una cubierta superior de geotextil para reducir la colmatación de las velas. El agua filtrada se recoge en la parte inferior y se mantiene allí protegida hasta su consumo.

Acción desinfectante de los filtros de nivel familiar

Al igual que con el tema de los efectos sobre la salud, la acción desinfectante se ha comentado anteriormente al describir la radiación UV. En el caso de las velas cerámicas, el efecto es simplemente mecánico. El microorganismo queda retenido en los poros del filtro que son menores en diámetro que el tamaño de aquél. Es precisamente aquí donde surge la necesidad de un comentario importante.

En muchas oportunidades se ha comprobado que la carga bacteriana del efluente de un filtro casero es mayor que la del agua cruda que entra al mismo. La explicación es que los microorganismos que van quedando retenidos son materia orgánica muerta, que lentamente se va acumulando y pasa a ser alimento nutritivo para los nuevos microorganismos que van llegando. El pasaje por los poros de unos pocos microorganismos (cosa posible en este contexto de enorme profusión y saturación) crea colonias “del otro lado del filtro” y lentamente todo el filtro (de uno y otro lado de la cerámica) se transforma en una masa de microbios. En la jerga de la química y la ingeniería sanitaria se llama a muchos de estos filtros “los nidales”, pues allí las bacterias tienen las condiciones ideales para multiplicarse.

Esto de ningún modo quiere decir que los filtros caseros sean malos o riesgosos. Lo que es riesgoso es la conducta de los usuarios, ya que el problema de los nidales aparece cuando se ha sobrepasado la capacidad del filtro, situación que ocurre cuando las aguas crudas son excesivamente turbias y contaminadas y cuando el usuario no limpia el filtro o no cambia los cartuchos y velas con la periodicidad aconsejada por el fabricante. Es por ello que siempre se recomiendan acciones de seguimiento y permanentes campañas de motivación y educación para que la gente opere estos elementos como es requerido.

Equipos

Existe gran número de estos sistemas. Tomando las posibilidades más usuales: un cartucho de papel o celulosa grueso para eliminar la turbiedad grosera, un filtro de vela o un elemento con una lámpara UV para eliminar microorganismos y un cartucho de carbón activado para eliminar olores y sabores, se puede armar un sistema y con seguridad se va a encontrar esa opción en el mercado.



Asimismo, los caudales son también variados, desde aquellos que tratan varios metros cúbicos por día hasta los pequeños que se colocan a la salida del grifo y que filtran unos pocos litros por día.

Monitoreo

No existen formas simples de monitorear. Solo se puede monitorear a través de análisis bacteriológicos, los que no siempre son posibles en el medio donde se emplean estos filtros.

Costos

Los costos son muy variados, desde unas pocas decenas hasta un millar de dólares para los verdaderamente sofisticados y completos.

Fuentes de información

AWWA. *Standard methods for the examination of water and wastewater*. 19th Edition (1995).

OMS, *Guías para la calidad del agua potable. Recomendaciones. Volumen 1.* (1995).

Reiff, F.; Witt, V. *Guía para la selección y aplicación de tecnologías de desinfección del agua para consumo humano en pueblos pequeños y comunidades rurales en América Latina y el Caribe*; Documento OPS/OMS, Serie Técnica No. 30 (1995).

Rojas, R., Guevara, S. *Celdas electrolíticas para producción in situ de hipoclorito de sodio*. Publicación CEPIS/GTZ (1999).

WHO. *Guidelines for drinking water quality, Health criteria and other supporting information. Volume 2* (1996).

WHO/WRC. *Disinfection of rural and small community water supplies* (1989).

Capítulo 10

DESINFECCIONES ESPECIALES Y DE EMERGENCIA



Pozos excavados

Los pozos excavados han sido desde la antigüedad una fuente importante de agua y muchos pueblos siguen abasteciéndose de ellos. Las aguas de esos pozos provienen de las napas freáticas que especialmente en las aldeas y villas casi siempre están contaminadas por las infiltraciones de las letrinas cercanas. Por añadidura, la mayoría de los pozos no está bien protegida ni cuenta con mecanismos para extraer agua que impidan el manoseo por parte de los usuarios. Puede que el agua del pozo ya esté contaminada o que se contamine por la manipulación al extraer el agua, pero lo cierto es que solo excepcionalmente un pozo excavado público estará libre de riesgos de transmisión de enfermedades hídricas.

Ante esta situación, las instituciones nacionales e internacionales, los órganos de salud pública y los profesionales de la salud han abogado durante décadas por la realización de campañas de desinfección de pozos excavados.

El primer resultado es que hoy existen numerosos tipos de dosificadores, que casi siempre utilizan cal clorada. Entre ellos, pueden mencionarse las vasijas con orificios, las bolsas plásticas, los frascos concéntricos y toda la gama de pots cerámicos porosos. El segundo resultado es que todos estos métodos empíricos son malos y no cumplen apropiadamente el fin que persiguen.

Lo que sucede es que un pozo excavado tiene un trato muy desigual, ya que en horas de la noche no se lo opera y durante el día su agua es extraída en cantidad variable y a ritmos diferenciados. Ello significa que si se dispone de sistemas de dosificación constante, fatalmente a horas distintas del día las concentraciones que resulten serán muy variables también. El resultado final y global es que los usuarios detestan la cloración de estos pozos pues en ocasiones el agua está tan cargada de cloro que rechazan su ingesta y en otras, simplemente, el agua enferma a quien la toma.

Esta realidad concreta ha derivado en la tendencia actual, sostenida por numerosas instituciones de salud pública, de abandonar la desinfección ineficiente de los pozos excavados y en vez de ello recomendar que la población colecte el agua (sucia y contaminada) del pozo, la transporte a su morada y la filtre y desinfecte en su propia casa. Como desinfectante se puede utilizar hipoclorito de sodio preparado por medio de electrólisis tanto en el nivel comunitario como familiar o por cualquier otro medio disponible en la comunidad (soluciones de plata por ejemplo).

Si bien esto requiere el apoyo de buenos planes de educación y monitoreo, a la larga, los resultados son mucho más positivos que la muy controvertida desinfección de pozos abiertos.

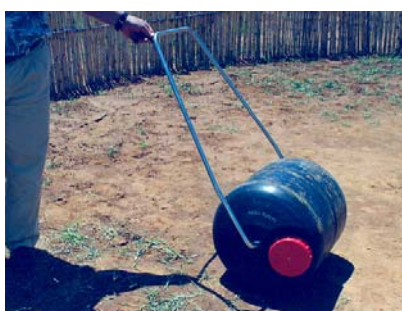
**El clásico pozo excavado
con todas sus condiciones
para la contaminación**



Método de filtración en el nivel familiar



Desinfección con hipoclorito en el hogar



Desinfección de tanques, carros rodantes y tuberías

Tanques nuevos

Todos los tanques, reservorios y cisternas (tanques enterrados) nuevos deben desinfectarse antes de que se pongan en servicio. De igual manera, los tanques que han estado fuera de servicio para su reparación o limpieza también deben desinfectarse antes de que sean puestos nuevamente en servicio. Previa a la desinfección, los pisos y paredes de los tanques deben limpiarse, barrerse y fregarse para extraer la tierra y sedimentos.

Uno de los métodos de desinfección para un tanque nuevo es llenarlo hasta el nivel de rebosamiento con agua limpia a la cual se ha agregado suficiente cloro para producir una concentración de 50 a 100 mg de cloro por litro de agua.

La solución de cloro se añade al agua lo antes posible durante la operación de llenado con el fin de asegurar una mezcla minuciosa y su contacto con todas las superficies a ser desinfectadas. Después de que el tanque se ha llenado, se deja reposar, preferentemente durante 24 horas y nunca menos de seis horas. Esta agua debe eliminarse luego y una vez que el tanque esté vacío, se vuelve a llenar para su suministro normal.

Tanque elevado

Un segundo método, que es muy satisfactorio y práctico para las condiciones rurales, es la aplicación directa de una solución fuerte (200 mg de cloro/l) a las superficies internas del tanque. La superficie debe quedar en contacto con esa solución al menos durante 30 minutos antes de que el tanque se llene de agua.



Cisternas y tanques rodantes

Un tanque sobre ruedas es lo mismo que un tanque estacionario, salvo por la obvia condición de que puede desplazarse. Por tanto, también deben ser idénticos los requerimientos para la desinfección y la metodología a emplear. Existen, sin embargo, tres sutiles diferencias: 1) la accesibilidad al interior, 2) el material de tanque y 3) el dueño.

La accesibilidad es importante, pues si un tanque no permitiera el ingreso de una persona, difícilmente podría realizarse una inspección ni una buena desinfección. En ocasiones, no hay otro remedio que rascar las paredes y barrer el piso. Si un tanque no tiene una accesibilidad razonable, no debe permitirse su uso como contenedor de agua potable.

En muchas zonas rurales en donde se transporta agua por medio de estos tanques rodantes, las condiciones son humildes y los recursos escasos. Muchas veces los tanques son meros depósitos de hierro colocados sobre cuatro ruedas. Es posible que ni siquiera tengan un recubrimiento interior que proteja el material del tanque del efecto oxidante del agua y mucho menos de un agente tan agresivo como el cloro.

Ello lleva a otra condición que también debe ser cumplida en forma incondicional: todo tanque debe ser de material apropiado para contener agua o debe estar pintado debidamente con un recubrimiento aprobado para el agua potable.

Este punto está ligado al dueño de carro. Sucede que ante los requerimientos de mejora de sus vehículos, estos individuos son generalmente difíciles de convencer o de obligar a que realicen las modificaciones necesarias. Se les debe persuadir a través de la educación, información y sensibilización, pero también habrá que utilizar el poder de las autoridades de salud o de la misma policía para forzar el cumplimiento de las condiciones sanitarias correspondientes. En algunas situaciones se ha comprobado que los tanques rodantes han contribuido a la diseminación de enfermedades, cuando deberían cumplir la honorable y social tarea de mejorar la calidad de vida de muchos pobladores.

Redes y tuberías nuevas

Las redes de distribución durante su operación y las tuberías durante su colocación y manipuleo tienen la tendencia a contaminarse, independientemente de las precauciones que se hayan tomado en su manejo. Por consiguiente, deben desinfectarse antes de que se pongan en uso. Los sistemas de distribución deben ser desinfectados cuando se contaminan en caso de ocurrir una rotura, inundaciones, etc.

Cada tubería debe limpiarse por raspado con cualquiera de los instrumentos que la tecnología moderna ha diseñado para ese fin y luego deben enjuagarse para eliminar toda la materia extraña desprendida. Inmediatamente antes de su uso, el material de empaque y unión debe limpiarse y de ser posible desinfectarse. En seguida se desinfectan las tuberías internamente.

Para la desinfección de las tuberías, un medio práctico de aplicar la solución de cloro (que debe tener una concentración de 50 mg de cloro/litro) es enjuagando con el desinfectante cada sección a ser desinfectada. Para ello se cierra el ingreso de agua a la sección y se deja drenar totalmente a través de un hidrante o válvula. Luego se cierra el hidrante o la válvula y se aísla la sección del resto del sistema. La solución desinfectante se alimenta a través de un embudo o una manguera dentro de un hidrante o de una abertura hecha especialmente para esta finalidad en la parte más alta de la tubería. Es de notar que debido a que las válvulas de aire se colocan generalmente en los puntos altos, el remover una de estas válvulas es a menudo una forma conveniente de proporcionar un punto de entrada a la solución desinfectante. La solución debe permanecer en la sección de 12 a 24 horas. Nunca menos de seis horas.

Tanques domiciliarios

Es sabido que la mayoría de los programas nacionales de vigilancia de calidad del agua, o los de control que desarrollan las compañías de servicios, son específicos para el agua que se produce y distribuye; y que tales controles se realizan hasta la entrada del fluido en los domicilios particulares. También se sabe que en muchos países en desarrollo, por cuestiones de economía del proyecto, los servicios de agua potable se construyen considerando la provisión de tanques domiciliarios que sirven como depósitos “pulmón”. En vez de construir grandes tanques y cisternas se prefiere, en ocasiones, distribuir esa capacidad de almacenamiento en una sumatoria de pequeños tanques colocados en cada una de las viviendas abastecidas.

Como se ha comprobado en muchas oportunidades y en numerosos países, el agua que ha sido producida y distribuida con excelente calidad se malogra justo antes de ser consumida por los usuarios. La razón principal de este hecho es el mal estado de los tanques domiciliarios. Uno de los autores de este manual participó en un proyecto de investigación sobre la condición del agua en los tanques de una importante ciudad de un país en desarrollo. Se comprobó que en el 75% de los casos, los tanques contaminaban el agua que ingresaba a ellos.



Dos servicios bien diferentes

En otro programa de desinfección de tanques, desarrollado en una pequeña población rural de otro país en desarrollo, el mismo autor comprobó al término del programa, que la lista de los animales muertos hallados dentro de los tanques domiciliarios limpiados y desinfectados presentaba desde cucarachas a pájaros y desde ratas a hurones; y como complemento se encontró una serie impresionante de objetos tan variados como pequeños muebles, ramas, latas, juguetes y hasta una bicicleta.

Esta situación común, que ocurre en los países donde el agua se almacena en tanques domiciliarios, se debe a la falta de legislación que obligue a los propietarios de las viviendas a cuidar, limpiar y desinfectar los mismos; a falta de programas de protección de tales elementos desarrollados por los organismos de salud pública. Finalmente, también se debe a una notoria carencia de educación sanitaria de los usuarios, ya que la desidia mostrada por los responsables de mantener limpios los tanques (los propietarios de las viviendas) casi siempre se debe a la falta de conocimiento sobre la necesidad de mantener tales tanques en condiciones de excelencia sanitaria por los riesgos que ello evita.

Sea por iniciativa de las instituciones de salud pública, de la compañía del servicio de agua o del propietario de la vivienda, la limpieza y desinfección de los tanques domiciliarios debería ser algo popular, con normas y reglas simples e instrucciones fáciles de seguir.

Hay varias formas de limpiar y desinfectar un tanque domiciliario y ellas no difieren de las que se mencionaron en el punto sobre tanques y reservorios nuevos. Es necesario, sin embargo, tener en cuenta un par de detalles diferentes, ya que estos elementos son casi siempre más pequeños que los tanques o reservorios de un sistema o servicio. Los tanques domiciliarios pueden tener cualquier volumen, pero los más comunes en las viviendas unifamiliares son los que tienen una capacidad entre 400 y 1.000 litros. Estos volúmenes dificultan en ocasiones la limpieza adecuada de sus interiores. La segunda característica especial es la tapa. Muchos de los problemas de los tanques domiciliarios se deben a tapas que no cierran bien o a la falta de ellas.



A continuación se ofrece una serie de instrucciones simples y explícitas que pueden suministrarse a la población junto con las explicaciones sobre la necesidad de mantener limpios y desinfectados los tanques domiciliarios:

1. Prepare una reserva razonable de agua en recipientes limpios y cerrados con tapa, pues durante la operación de limpieza y desinfección no contará con su provisión.

2. Comience retirando la tapa del tanque y amarrando la válvula de flotación para que no siga entrando agua de la red. A partir de este momento nadie podrá utilizar agua dentro de la vivienda hasta que el proceso haya terminado.
3. Abra la válvula de desagüe (“desagote”) del tanque hasta que solo queden unos 10 cm de agua en el fondo.
4. Con un cepillo de cerdas duras y ayudado por el agua del fondo cepille las paredes interiores del tanque hasta que queden lo más limpias posible. Puede ayudarse con un cepillo de mano y trapos limpios. Una linterna puede ser de utilidad.
5. Elimine toda el agua con la suciedad por el desagote (no lo haga por las instalaciones y grifos de la vivienda).
6. Si fuera necesario, repita la operación hasta que las paredes internas estén limpias.
7. Desamarre la válvula de flotación, deje que entre el agua de la red y llene el tanque con agua hasta $\frac{1}{4}$ parte de su volumen. Agregue entonces el hipoclorito de sodio o de calcio de forma que la concentración final (cuando el tanque esté lleno) sea de 100 mg de cloro por litro de agua. (En países donde se expendan un solo producto, por ejemplo hipoclorito de sodio de una concentración fija en todo el ámbito nacional, por ejemplo 8%, el cálculo de cuánto se debe agregar podrá ser realizado por las autoridades que preparen el instructivo y entonces simplemente se deberá decir: “agregue tal o cual volumen de lejía o agua sanitaria por cada mil litros de capacidad del tanque”. En donde haya varios compuestos de cloro de libre comercialización deberá hacerse el cálculo con las fórmulas que se muestran a continuación).

A partir de:	Hipoclorito de sodio	Hipoclorito de calcio
Descripción	Es comercializado en forma líquida bajo distintos nombres (lejía, agua sanitaria, lavandina, etc.), en concentraciones variables de cloro, siendo las presentaciones de 7% a 10% las más comunes.	Es comercializado en forma sólida. El contenido de cloro de este producto es variable, siendo las de 60% a 70% las más comunes.
Fórmula a emplear	$V = \frac{V_t \times 10}{\%}$ <p>Donde: V = Volumen en mililitros del hipoclorito de sodio a echar en el tanque Vt = Volumen del tanque = Volumen de agua que se agregará al mismo para preparar la solución desinfectante 10 = Factor para que el resultado sea expresado en mililitros del producto % = La concentración de cloro en el producto, según lo especifica el fabricante (en la fórmula solo debe colocarse el número, por ejemplo “7” cuando la concentración de cloro en el producto es de 7%)</p>	$P = \frac{V_t \times 10}{\%}$ <p>Donde: P = Peso del producto (hipoclorito de calcio) en gramos a disolver en el tanque Vt = Volumen del tanque = Volumen de agua que se agregará al mismo para preparar la solución desinfectante 10 = Factor para que el resultado sea expresado en gramos del producto % = La concentración de cloro en el producto, según lo especifica el fabricante (en la fórmula solo debe colocarse el número, por ejemplo “65” cuando la concentración de cloro en el producto es de 65%)</p>
Ejemplo	<p>Para un tanque de 500 litros e hipoclorito de sodio de 8% de concentración, la cantidad del producto a agregar en el tanque será:</p> $V = \frac{500 \times 10}{8} = 625 \text{ ml}$	<p>Para un tanque de 800 litros e hipoclorito de calcio de 70 % de concentración, la cantidad del producto a disolver en el tanque será:</p> $P = \frac{800 \times 10}{70} = 114 \text{ g}$

8. Una vez que ha agregado el desinfectante, llene el tanque hasta el máximo nivel.
9. Cuando el tanque esté lleno con la solución desinfectante, abra cada uno de los grifos (llaves) de la casa y deje salir el agua hasta notar el fuerte olor a cloro. Cierre entonces los grifos. Esta operación es importante para desinfectar no solo el tanque sino también todas las tuberías y grifos de la casa. **Esta agua no debe beberse ni utilizarse para ningún fin.**
10. Deje el sistema en estas condiciones durante 12 horas para que el cloro actúe (puede ser menos tiempo, pero nunca menos de seis horas). De ser posible, es aconsejable dejar en reposo durante toda una noche.
11. Luego de la desinfección, deje salir el agua contenida en el tanque por el desagote y abra todos los grifos dentro de la casa para eliminar el agua con cloro que aún queda en las tuberías.
12. Permita la libre entrada del agua de la red al tanque y utilícela para beber y otros fines, puesto que las instalaciones ya están desinfectadas.
13. Asegúrese de que el tanque quede bien tapado y que no haya posibilidad de entrada de animales o aves dentro del mismo. Sería ideal que la tapa quedara asegurada por un candado.
14. Repita la limpieza y desinfección del tanque cada seis meses y nunca deje transcurrir más de un año entre operaciones.

Desinfección del agua en situaciones de emergencia

Las medidas de largo plazo para la provisión de agua segura, más la higiene personal y la educación sanitaria, ayudarán enormemente a proteger y a promover la salud pública. Sin embargo, los desastres naturales como ciclones, terremotos e inundaciones a veces interrumpen completamente los sistemas de abastecimiento de agua. Mientras se realizan los esfuerzos para volver a poner los sistemas en operación, se debe asignar alta prioridad al abastecimiento de agua potable a la población afectada.

Si bien no hay una medida que sea la panacea para todas las situaciones, lo siguiente puede ser útil para asegurar un suministro de agua seguro, dependiendo de las condiciones locales y de los recursos disponibles. Una acción simultánea para superar la situación debería incluir la búsqueda minuciosa de todas las fuentes de agua posibles dentro de una distancia razonable al área afectada. El agua de sistemas privados de abastecimiento y aún de otras fuentes puede ser transportada por tanques rodantes hasta los puntos de consumo..

En una situación de emergencia, si la cantidad es importante, la calidad es obligatoria y como es lei motiv de este manual, para lograr la seguridad bacteriológica se debe asegurar una desinfección adecuada. No hacerlo puede significar el desarrollo de las temidas pandemias que no solo enferman física, sino espiritualmente a una población, que por el mismo desastre sufrido está en estado de choque psicológico.

Luego de un desastre hay dos momentos. Uno “absolutamente inmediato” y otro “inmediato mediato”, que tiene lugar después del segundo o tercer día de ocurrido el evento. En el primero, cuando aún está demasiado fresco el impacto del evento (sea un terremoto, un ciclón, etc.) hay mucho desorden y una falta de medios de todo tipo. En esos casos solo queda

recomendar hervir el agua como método de tratamiento. Una vigorosa ebullición durante un minuto elimina cualquier microorganismo que pueda estar presente en el agua contaminada.

En el segundo momento, esto es, cuando han transcurrido dos o tres días después del impacto del siniestro, ocurre un fenómeno que configura una situación peculiar por la que deben pasar, sobretodo, los oficiales de salud. Y ello no se debe a la falta de desinfectantes, sino por el contrario; al exceso de ellos. Después de que un fenómeno azota un área, debido a las donaciones, ésta queda inundada con una gran variedad de desinfectantes; normalmente, compuestos basados en cloro, pero de diferentes composiciones y concentraciones. Es entonces útil tener el conocimiento indispensable para manejarlos adecuadamente.

Al respecto, presentamos dos sugerencias:

- 1 En primer lugar, es importante que la población nunca prepare o maneje soluciones de hipoclorito de alta concentración (soluciones «stock» o madre). Al usuario debe entregársele una solución desinfectante lista para ser usada en un sistema de tipo «batch» (para la desinfección de un tanque o recipiente domiciliar).
- 1 En segundo lugar, una solución ideal «stock» para usarse en situaciones de emergencia es la que presenta una concentración de 5.000 mg de cloro/litro.

Los oficiales de salud deben preparar las soluciones stock a partir de productos clorógenos con la siguiente fórmula.’

$$\frac{V \text{ agua} \times C \text{ stock}}{C \text{ producto} \times 10} = W \text{ producto}$$

Donde:

Vagua	=	Volumen de solución stock que será preparada, en litros
Cstock	=	Concentración de la solución stock (si, como se ha sugerido, se pretende una concentración de 5.000 de mg de cloro/litro de agua, entonces el valor para Cstock debe ser = 5.000)
Cproducto	=	La concentración de cloro en el producto, según lo especifica el fabricante (en la fórmula solo debe colocarse el número, por ejemplo 65 cuando la concentración de cloro en el producto es 65%)
10	=	Factor para que el resultado sea dado en gramos del producto
Wproducto	=	Gramos de producto a disolver en Vagua

No existe una norma fija pero se estima que una buena medida es la siguiente:

La dosis de desinfección que se sugerirá a la población debe ser de 5 mg/l en momentos de emergencia extrema y luego de 2 mg/l bajo condiciones menos demandantes.

En todo momento se debe aconsejar “dejar trabajar” al cloro por espacio mínimo de 30 minutos.

Las diluciones que la población debe preparar a partir de la solución stock se presenta en el siguiente cuadro.

Volumen de agua a desinfectar (litros)	Volumen de solución stock (de 5.000 mg/l) a agregar para obtener una concentración final de 5 mg/l	Volumen de solución stock (de 5.000 de mg/l) a agregar para obtener una concentración final de 2 mg/l
1	20 gotas = 1 ml	8 gotas
5	100 gotas = 5 ml	40 gotas = 2 ml
10	10 ml	4 ml
20	20 ml	8 ml
100	100 ml	40 ml
200	200 ml	80 ml
1.000	1 litro	400 ml

En el caso de que se disponga de tintura de yodo (que es una solución al 2%), se recomienda agregar cinco gotas por litro de agua y dejar actuar por lo menos durante 30 minutos.

Capítulo 11

DATOS COMPARATIVOS SOBRE TÉCNICAS DE DESINFECCIÓN



Introducción

En las hojas anteriores de este manual se han detallado las técnicas que se utilizan para la desinfección del agua en casi todo el mundo. En este capítulo se presentan cuadros que sintetizan las características, bondades y desventajas de cada una de ellas, así como los lugares más apropiados para aplicar el método. La información así organizada facilitará el proceso de selección de la tecnología más adecuada de acuerdo con la realidad local; proceso que deben enfrentar los ingenieros, los funcionarios del gobierno, las empresas de agua, las organizaciones comunales y las familias. comunidades y sus dirigentes, a la necesidad de seleccionar una de ellas para desinfectar el agua para consumo humano de una determinada comunidad, los criterios que se empleen para escoger la técnica más adecuada, deben basarse en una serie de evaluaciones que no solo han de medir.

Resumen de las técnicas de desinfección

Para ayudar a la decisión, se mostrará a continuación una serie de listados y tablas que servirán a la vez que como elementos de juicio, como resúmenes de los visto hasta el momento.

SODIS	
Método	Continuo
Aplicabilidad	Familiar y villorrios pequeños
Forma de acción	Pasteurización
Equipos	Los típicos calentadores de agua solares. Pueden ser confeccionados localmente y hasta por los propios usuarios
Complejidad	Muy baja
Ventajas	Muy simple. Aceptable por los usuarios. No hay cambios en las propiedades del agua (salvo la temperatura). No hay SPD.
Desventajas	La desinfección depende de numerosos y variados parámetros. Difícil estandarizar y asegurar que la desinfección ha sido exhaustiva. No hay residual.
Costo de capital	Moderado
Costo de o&m	Casi nulo
Disponibilidad	Intermedia. Puede confeccionarse localmente
Mantenimiento	Simple pero continuo
Controles	Simple pero continuos
Control analítico	Difícil pues no hay residual que medir. Solo se puede confirmar la eficiencia con análisis bacteriológicos
Recomendaciones	Muy buena opción para población rural dispersa y pequeñas aldeas

SODIS	
Método	Batch (cocinas, botellas y recipientes)
Aplicabilidad	Familiar
Forma de acción	Pasteurización
Equipos	Botellas de gaseosas. Ollas y cocinas solares simples
Complejidad	Nula
Ventajas	Muy simple. Aceptable por los usuarios. No hay cambios en las propiedades del agua (salvo la temperatura). No hay SPD.
Desventajas	La desinfección depende de numerosos y variados parámetros. Difícil estandarizar y asegurar que la desinfección ha sido exhaustiva. No hay residual.
Costo de capital	Nulo

Costo de o&m	Nulo
Disponibilidad	Alta. El método usando botellas de gaseosa es universal
Mantenimiento	Simple
Controles	Pocos
Control analítico	Difícil pues no hay residual que medir. Solo se puede confirmar la eficiencia con análisis bacteriológicos
Recomendaciones	Muy buena opción para población rural dispersa y pequeñas aldeas

CLORO	
Método	Gas
Aplicabilidad	Muy amplia. Medianas y grandes poblaciones (5.000 a 10.000 habitantes en más)
Forma de acción	Oxidación de la materia orgánica
Equipos	Dosificadores montados en cilindros y tanques, trabajando bajo presión o al vacío. Requieren bombas para recircular agua y otros equipos auxiliares. Deben existir recintos especialmente adecuados y equipos de protección personal
Complejidad	Intermedia
Ventajas	Simpleza. Es el método más popular en el mundo. En casi todos los países se produce cloro gas. Económico. Hay residual en el agua tratada y es fácilmente medible
Desventajas	En algunas comunidades alejadas hay que asegurarse la provisión del gas. Requiere personal con cierto grado de capacitación. Puede producir cambios en gusto y sabor. Produce SPD
Costo de capital	Intermedio
Costo de o&m	Muy bajo (de los métodos más populares, la cloración por gas presenta el costo más bajo)
Disponibilidad	Intermedia. Hay que recurrir a las grandes ciudades para equipos y repuestos
Mantenimiento	Intermedio. El personal debe estar capacitado
Controles	Muy frecuentes o casi constantes. Idealmente deben haber sistemas de alarma automáticos
Control analítico	Muy simple. Existe una gama de comparadores de cloro residual sencillos y baratos
Recomendaciones	A pesar de algunas desventajas sigue siendo el método más popular para las ciudades intermedias y grandes y lo será por largo tiempo. Es una de las mejores opciones

CLORO	
Método	Solución dosada a presión atmosférica
Aplicabilidad	Pequeñas comunidades y hasta algunas intermedias
Forma de acción	Oxidación de la materia orgánica
Equipos	Una gran variedad de artilugios muy simples. Algunos de ellos, provenientes de la tecnología apropiada son excelentes y muy populares. Es la tecnología más difundida en zonas rurales de los países en desarrollo
Complejidad	Muy baja
Ventajas	Simpleza. Junto con el uso del gas, es el método más popular de desinfección por cloración. En casi todos los países se producen hipocloritos. Los dosificadores pueden producirse localmente. Económico. Hay residual en el agua tratada y es fácilmente medible
Desventajas	Aunque es más popular que el cloro gas, en algunas comunidades alejadas hay que asegurarse la provisión del hipoclorito. Puede producir cambios en gusto y sabor. Produce SPD
Costo de capital	Mínimo. Algunos dosificadores son de costo prácticamente nulo
Costo de o&m	Muy bajo
Disponibilidad	Alta a intermedia
Mantenimiento	Aunque muy simple, requiere mantenimiento y supervisión
Controles	Aunque rápidos y simples deben ser frecuentes
Control analítico	Muy simple. Existe una gama de comparadores de cloro residual sencillos y baratos
Recomendaciones	El mejor método para zonas rurales de países en desarrollo

CLORO	
Método	Solución dosada a presión
Aplicabilidad	Casi todo el rango de poblaciones, aunque mejor en aquellas intermedias
Forma de acción	Oxidación de la materia orgánica
Equipos	Bombas a diafragma o pistón
Complejidad	Intermedia a baja
Ventajas	Sistema muy simple y casi automático. En casi todos los países se producen hipocloritos. Las bombas pueden repararse localmente. Económico. Hay residual en el agua tratada y es fácilmente medible
Desventajas	Aunque es más popular que el cloro gas, en algunas comunidades alejadas hay que asegurarse la provisión del hipoclorito. Requiere electricidad. Puede producir cambios en gusto y sabor. Produce SPD
Costo de capital	Moderado a bajo
Costo de o&m	Bajo
Disponibilidad	Amplia, aunque solo en ciudades intermedias a grandes
Mantenimiento	Simple
Controles	Aunque rápidos y simples deben ser frecuentes
Control analítico	Muy simple. Existe una gama de comparadores de cloro residual sencillos y baratos
Recomendaciones	Excelente opción para pequeñas comunidades y sistemas de bombeo

CLORO	
Método	Electrólisis in situ
Aplicabilidad	Familiar. Población rural dispersa. Pequeñas comunidades
Forma de acción	Oxidación de la materia orgánica
Equipos	Hay dos tipos de sistemas diferenciados por su capacidad de producción. Los pequeños para uso familiar o para población rural dispersa son pequeños y simples. Los industriales para usar en plantas potabilizadoras son más grandes y complejos
Complejidad	Baja para los pequeños y familiares e intermedia a alta para los industriales
Ventajas	Simple. Sirven para población dispersa. Producen hipoclorito de baja concentración que es muy manejable. Hay residual en el agua tratada y es fácilmente medible
Desventajas	Produce hipoclorito de baja concentración que si bien es mejor para un plan de distribución en goteros, es un inconveniente para desinfectar grandes caudales. Requiere electricidad. Puede producir cambios en gusto y sabor. Produce SPD
Costo de capital	Bajo a intermedio para los sistemas pequeños. Alto para los industriales
Costo de o&m	Moderado
Disponibilidad	Los equipos y repuestos solo se consiguen en determinados países y en aquellos en desarrollo, casi siempre hay que importarlos. El insumo principal: la sal de mesa existe en cualquier lugar
Mantenimiento	Moderado a bajo (hay que vigilar la deposición de carbonatos en el ánodo)
Controles	Aunque rápidos y simples deben ser frecuentes
Control analítico	Muy simple. Existe una gama de comparadores de cloro residual sencillos y baratos
Recomendaciones	Es el mejor método para cualquier plan de distribución de desinfectante en áreas rurales dispersas

CLORO	
Método	Erosión de tabletas
Aplicabilidad	Pequeñas comunidades
Forma de acción	Oxidación de la materia orgánica
Equipos	Aunque todos operan exactamente igual, existe una variada gama para permitir la desinfección de distintos caudales.

Complejidad	Baja
Ventajas	Muy simple. Aunque son de fabricación moderna, los dosificadores parecen salidos de la tecnología apropiada. Económico. Los equipos pueden operar a presión atmosférica o en tuberías bajo presión. Hay residual en el agua tratada y es fácilmente medible
Desventajas	Siendo un método ideal para el medio rural, se depende sin embargo de un insumo (las tabletas) que hay que importar o traer desde otros lugares. Puede producir cambios en gusto y sabor. Produce SPD
Costo de capital	Bajo
Costo de o&m	Bajo
Disponibilidad	No muy buena. No siempre se dispone de las tabletas
Mantenimiento	Moderado a bajo (hay que vigilar la formación de cavernas en el depósito de tabletas)
Controles	
Control analítico	Muy simple. Existe una gama de comparadores de cloro residual sencillos y baratos
Recomendaciones	Donde se ha asegurado la provisión de tabletas se ha popularizado

RADIACIÓN ULTRAVIOLETA	
Método	Lámpara dentro o fuera del agua
Aplicabilidad	Toda la gama de poblaciones desde muy pequeñas a muy grandes
Forma de acción	Destrucción del ADN de los microorganismos
Equipos	Variada gama, con tubos fuera del agua o dentro de ella
Complejidad	El equipo básico en sí (la lámpara UV) es de escasa o nula complejidad. Sin embargo los equipos auxiliares que deben acompañar a aquella le confieren un variado rango de complejidad dependiendo del grado de seguridad buscado
Ventajas	Simple. No requiere del uso de ninguna sustancia química. Corto tiempo de exposición. No hay cambios organolépticos en el agua. No hay SPD
Desventajas	Para asegurar la dosis adecuada hay que contar con varios equipos de control. No hay forma de medir la eficacia de la desinfección en forma simple y rápida. Requiere electricidad. No hay residual
Costo de capital	Bajo en sistemas simples y sin demasiada protección. Elevado en los muy protegidos. Intermedio en aquellos con solo lo imprescindible para una buena operación
Costo de o&m	Bajo a moderado
Disponibilidad	Hay que depender de proveedores externos en las zonas alejadas o rurales.
Mantenimiento	Simple pero cuidado. Hay que asegurar la limpieza de los encamisados cuando los tubos están sumergidos
Controles	Solo se deben “controlar los controles” del proceso (los equipos que monitorean la emisión de la radiación, la vida de las lámparas, etc)
Control analítico	No hay forma de medir la eficacia de la desinfección, salvo realizar un análisis bacteriológico
Recomendaciones	Un método muy interesante por lo simple. No solo tiene aplicación y demanda en las grandes ciudades. También es una buena opción para zonas rurales

FILTRACIÓN LENTA	
Método	Filtración lenta por arena (FLA)
Aplicabilidad	Pequeñas poblaciones. En menor grado poblaciones intermedias
Forma de acción	Eliminación de los microorganismos por acción de la capa biológica (“fagocitosis”) que recubre los granos de arena.
Equipos	Filtros lentos de arena, casi siempre confeccionados in situ, con hormigón, acero u otros materiales
Complejidad	Baja
Ventajas	Muy simple. Opera prácticamente solo. A la vez que desinfecta, elimina turbiedad del agua cruda. No cambia las propiedades organolépticas del agua. No necesita electricidad. No hay SPD

Desventajas	Para que trabaje efectivamente como un equipo de desinfección, debe estar muy bien construido; contar con la arena apropiada, bien clasificada y lavada; y operar bajo las condiciones de temperatura, caudal, velocidad de filtración, etc., adecuadas. No hay forma de medir la eficacia de la desinfección en forma simple y rápida. No hay residual
Costo de capital	Moderados a intermedios, aunque como el FLA generalmente se construye para eliminar turbiedad, el costo del componente de la desinfección se disimula en el costo total del filtro
Costo de o&m	Prácticamente nulo
Disponibilidad	Alta. Los materiales para su construcción; y la arena, que es el corazón del sistema, se encuentran en casi cualquier lugar
Mantenimiento	Bajo
Controles	Muy simples
Control analítico	No hay forma de medir la eficacia de la desinfección, salvo realizar un análisis bacteriológico
Recomendaciones	El método más antiguo de tratamiento de aguas, revitalizado como equipo desinfectante es una opción siempre válida para poblaciones rurales

OZONO	
Método	A aire seco u oxígeno
Aplicabilidad	Una gama amplia aunque por sus características intrínsecas (especialidad, costo, requerimientos de operación, etc) es más popular en los medianos y grandes sistemas
Forma de acción	Oxidación de la materia orgánica
Equipos	Básicamente de dos clases: alimentados a aire seco o a oxígeno. Los de menor porte se venden en paquete (armados dentro de un esqueleto fijo o container, que se traslada en camiones, barcos o trenes)
Complejidad	Alta
Ventajas	Excelente desinfectante. En ocasiones mejora la calidad organoléptica del agua tratada.
Desventajas	Sistema complejo para muchas comunidades de países en desarrollo, aún para aquellas de gran porte. Requiere personal capacitado para operación y control. Hay formación de SPD, aunque no tan importantes como los del cloro. No hay residual. Requiere segura provisión de electricidad
Costo de capital	Alto
Costo de o&m	Entre los desinfectantes, es uno de los más altos
Disponibilidad	Muy baja. Los equipos se deben adquirir en países desarrollados.
Mantenimiento	Alto y cuidado
Controles	La mayoría de los equipos se venden con sus sistemas de control. Pero hay que estar atentos a los avisos de alarma de los mismos
Control analítico	Aunque complejos, existen métodos para detección en laboratorio. No existen métodos de campo, y además no es factible hacer un análisis del agua de red, ya que la vida media del O ₃ es muy baja
Recomendaciones	Por el momento, solo para países con capacidad para implementar la técnica

DIÓXIDO DE CLORO	
Método	Sistemas de 2 ó 3 compuestos
Aplicabilidad	Una gama amplia aunque por sus características intrínsecas (especialidad, costo, requerimientos de operación, etc) es más popular en los medianos y grandes sistemas
Forma de acción	Oxidación de la materia orgánica
Equipos	Cada sistema (el de dos o el de tres compuestos) es en realidad una sumatoria de distintos equipos. La mayoría de los sistemas se vende en paquete
Complejidad	Si bien cada uno de los equipos son relativamente simples (bombas, contactores, tanques, etc) el todo conlleva un grado evidente de complejidad
Ventajas	Excelente desinfectante. Mejora la remoción del hierro y manganoso. No se ve afectado por las variaciones de pH del agua. En ocasiones mejora la calidad organoléptica del agua

	tratada.
Desventajas	Sistema complejo para comunidades de países en desarrollo, aún para aquellas de gran porte. Requiere personal capacitado para operación y control. Hay formación de SPD, aunque no tan importantes como los del cloro. No hay residual. Requiere buena provisión de los insumos químicos y electricidad asegurada
Costo de capital	Alto
Costo de o&m	Alto
Disponibilidad	Muy baja. Los equipos se deben adquirir en países desarrollados.
Mantenimiento	Alto y cuidado
Controles	La mayoría de los equipos se venden con sus sistemas de control. Pero hay que estar atentos a los avisos de alarma de los mismos
Control analítico	Titulación amperométrica de cuatro pasos, lo que significa instrumental específico y personal capacitado
Recomendaciones	Por el momento, solo para países con capacidad para implementar la técnica

MINIFILTRACIÓN	
Método	Microfiltración, ultrafiltración, nanofiltración y ósmosis inversa
Aplicabilidad	Variada gama de posibilidades, aunque generalmente se utiliza para comunidades pequeñas e intermedias
Forma de acción	Retención de microorganismos por filtración mecánica
Equipos	Micro, ultra, nanofiltración y O.I. se diferencian por el diámetro del poro de la membrana filtrante. Los equipos varían según los pretratamientos, la forma de filtrar (dentro-fuera o fuera-dentro), las presiones ejercidas para favorecer la filtración y el tratamiento que se debe dar a las membranas. Casi siempre los equipos vienen en paquete
Complejidad	Alta. Si bien el sistema es filosóficamente muy simple, en la práctica los equipos son complejos
Ventajas	Provee agua de excelente calidad y la desinfección en realidad es un subproducto del tratamiento para mejorar la calidad del agua. No hay cambios organolépticos. No hay formación de SPD
Desventajas	Su complejidad. La necesidad de contar con personal de operación y mantenimiento bien capacitado. En caso de problemas, éstos son difíciles de solucionar con técnicos locales. No hay residual. Requiere electricidad
Costo de capital	Muy alto
Costo de o&m	Intermedio a alto
Disponibilidad	Muy baja. Los equipos se deben adquirir en países desarrollados.
Mantenimiento	Alto y cuidado
Controles	La mayoría de los equipos se venden con sus sistemas de control. Pero hay que estar atentos a los avisos de los mismos
Control analítico	No hay forma de medir la eficacia de la desinfección, salvo realizar un análisis microbiológico
Recomendaciones	Es una técnica interesante y con futuro, pero por el momento al igual que el ozono o el dióxido de cloro, solo son recomendables para los países en desarrollo por su complejidad y costos mucho más elevados que los métodos más populares

BROMO	
Método	Solución
Aplicabilidad	Poblaciones pequeñas y medianas
Forma de acción	Oxidación de la materia orgánica
Equipos	Igual que las soluciones de hipoclorito. Hay una gran variedad de artilugios muy simples. Algunos de ellos, provenientes de la tecnología apropiada son excelentes y muy populares
Complejidad	Muy baja
Ventajas	La misma simpleza de las soluciones de hipoclorito de sodio que ha ganado tantos adeptos. Los dosificadores pueden producirse localmente. Hay residual en el agua tratada y es

	medible igual que el cloro
Desventajas	Ni se acerca en popularidad al cloro y sus derivados pues no tiene los mismos usos que éste. Es muy difícil conseguir bromo en los países en desarrollo. Además su costo es mucho mayor que el del cloro. Produce SPD
Costo de capital	Bajo. Algunos dosificadores son de costo prácticamente nulo
Costo de o&m	Muy bajo
Disponibilidad	De los dosificadores alta a intermedia. Del insumo químico, el bromo, muy baja
Mantenimiento	Aunque muy simple, requiere un mantenimiento y supervisión superior a los del cloro
Controles	Los mismos que se debe tener con la tecnología del cloro
Control analítico	Igual que el cloro. Se utilizan los mismos comparadores
Recomendaciones	Es una buena técnica pero por la dificultad en conseguir bromo no es recomendable para los países en desarrollo

PLATA	
Método	Dosificación en solución
Aplicabilidad	Nivel familiar. Pequeñas comunidades
Forma de acción	Oligodinamia
Equipos	Los mismos que se utilizan para dosar soluciones de hipoclorito de sodio. (Bombas dosificadoras, equipos de dosificación bajo presión o a presión atmosférica, etc)
Complejidad	Muy baja
Ventajas	Simpleza. Efectividad. No hay cambios organolépticos en el agua tratada. No hay SPD
Desventajas	Las soluciones de Ag no son populares ni fáciles de conseguir. Es difícil controlar la concentración de Ag en el agua y no hay métodos simples para medir la concentración residual. Mucho más caro que el uso de hipoclorito
Costo de capital	Moderados a bajos
Costo de o&m	Bajo a intermedio (dependiendo de donde está ubicada la disponibilidad de las soluciones)
Disponibilidad	En general, baja
Mantenimiento	Simple
Controles	Aunque rápidos y simples deben ser frecuentes
Control analítico	No existe un método práctico para el nivel rural
Recomendaciones	Buena opción para ser utilizada en planes de desinfección a nivel familiar

PLATA	
Método	Electrólisis
Aplicabilidad	Pequeñas comunidades
Forma de acción	Oligodinamia
Equipos	Celdas electrolíticas colocadas dentro de recipientes cerrados a presión
Complejidad	Baja
Ventajas	Simpleza. Efectividad. No hay cambios organolépticos en el agua tratada. No hay SPD
Desventajas	Es difícil controlar la concentración de Ag en el agua y no hay métodos simples para medir la concentración residual. Mucho más caro que el uso de hipoclorito. Debe haber buena provisión de corriente eléctrica en el lugar
Costo de capital	Moderados a intermedios
Costo de o&m	Intermedio (dependiendo de donde está ubicada la disponibilidad de repuestos, electrodos, etc)
Disponibilidad	En general, baja
Mantenimiento	Simple
Controles	Aunque rápidos y simples deben ser frecuentes y debe existir algún sistema de control automático para el caso que falle la corriente eléctrica
Control analítico	No existe un método práctico para el nivel rural

Recomendaciones	En el nivel rural solo recomendado cuando la opción del cloro o sus derivados no sea viable
-----------------	---

YODO	
Método	Dosificación en solución
Aplicabilidad	Familiar. Pequeñas comunidades
Forma de acción	Oxidación de la materia orgánica
Equipos	Los mismos que se usan para la cloración aunque son preferibles las bombas dosificadoras
Complejidad	Baja, aunque hay un paso adicional de cierto cuidado, que es la preparación de la solución de yodo, si es que se parte del yodo cristalino
Ventajas	Muy simple y menos agresivo que el cloro. No hay problemas con los SPD. Hay residual
Desventajas	Está cuestionado por la sensibilidad que provoca en algunas personas. Es bastante más caro que el uso del cloro y su disponibilidad es mucho menor
Costo de capital	Moderado
Costo de o&m	Bajo
Disponibilidad	De los equipos (bombas) buena, aunque solo en ciudades intermedias a grandes. Del yodo baja
Mantenimiento	Simple
Controles	Simples pero deben ser frecuentes
Control analítico	El yodo se puede determinar en agua por titulación amperométrica o por espectrofotometría (LCV) que requieren instrumental adecuado y personal con cierta capacidad. No hay métodos rápidos de campo
Recomendaciones	No es un método recomendable y por ello es poco utilizado para desinfecciones de rutina. Por su facilidad de manejo es una buena opción para desinfecciones de emergencia

DICLORO ISOCIANURATO	
Método	Solución dosificada a presión atmosférica
Aplicabilidad	Pequeñas comunidades y hasta algunas intermedias. Población en refugios de emergencia
Forma de acción	Oxidación de la materia orgánica
Equipos	Bombas a diafragma o pistón
Complejidad	Intermedia a baja
Ventajas	Sistema muy simple y casi automático. Económico aunque no tanto como los otros compuestos del cloro. No produce los sabores y olores que los otros compuestos de cloro. Hay residual en el agua tratada y es fácilmente medible
Desventajas	No hay evidencia suficiente que sea totalmente inocuo para la salud. Produce SPD
Costo de capital	Intermedio para los sistemas pequeños y siempre mayor que los costos de los otros compuestos de cloro
Costo de o&m	Bajo
Disponibilidad	Buena, aunque solo en ciudades intermedias a grandes
Mantenimiento	Simple
Controles	Aunque rápidos y simples deben ser frecuentes
Control analítico	Muy simple. Existe una gama de comparadores de cloro residual sencillos y baratos
Recomendaciones	Es un buen método para situaciones de emergencia y para uso en refugios provisorios. No se aconseja para uso prolongado en la desinfección sistemática

DICLORO ISOCIANURATO	
Método	Polvo o comprimido para ser disuelto en recipientes pequeños
Aplicabilidad	Población en refugios de emergencia
Forma de acción	Oxidación de la materia orgánica
Equipos	Baldes y recipientes
Complejidad	Baja o nula
Ventajas	Sistema muy simple. Económico aunque no tanto como los otros compuestos del cloro. No produce los sabores y olores que los otros compuestos de cloro. Es muy estable y manipulable en las condiciones adversas de los refugios. Hay residual en el agua tratada y es fácilmente medible
Desventajas	No hay evidencia suficiente que sea totalmente inocuo para la salud. Produce SPD
Costo de capital	Solo el costo del producto que no es excesivo, aunque siempre algo mayor que los otros compuestos tradicionales de cloro
Costo de o&m	Nulo
Disponibilidad	Buena, aunque solo en ciudades intermedias a grandes
Mantenimiento	Nulo
Controles	Aunque rápidos y simples deben ser frecuentes
Control analítico	Muy simple. Existe una gama de comparadores de cloro residual sencillos y baratos
Recomendaciones	Es un buen método para situaciones de emergencia y para uso en refugios provisorios. No se aconseja para uso prolongado en la desinfección sistemática

MEZCLA DE GASES OXIDANTES	
Método	Moggod
Aplicabilidad	Pequeñas comunidades
Forma de acción	Oxidación de la materia orgánica
Equipos	Bombas dosificadoras y venturis según el modelo
Complejidad	De los equipos intermedia a alta. Del método muy baja
Ventajas	Excelente desinfectante, al parecer más efectivo aún que la cloración. La operación de los equipos es muy simple. El insumo principal es sal de mesa, accesible en cualquier lugar por remoto que sea. Hay residual y es medible
Desventajas	Los equipos moggod (no los de electrólisis in situ) son algo complejos y pueden presentar problemas si no son bien mantenidos. Hay SPD. Se requiere corriente eléctrica
Costo de capital	Intermedio
Costo de o&m	Bajos
Disponibilidad	De los equipos baja, pero del insumo básico, la sal de mesa, muy alto
Mantenimiento	Requieren muy buen mantenimiento. Los fracasos anotados se han debido a deficiencias en el mantenimiento, sobretodo la limpieza de membranas y de electrodos
Controles	Frecuentes
Control analítico	Muy simple. Existe una gama de comparadores de cloro residual sencillos y baratos
Recomendaciones	A pesar de su relativa complejidad, es una buena opción para lugares muy remotos donde haya corriente eléctrica pero no la posibilidad de llegar con sustancias químicas como hipocloritos u otros. Se deberá contar sin embargo con operadores que por encima de su capacitación que no es compleja estén muy concientizados de la importancia de un buen mantenimiento

SINÉRGICOS	
Método	Varios
Aplicabilidad	Depende del método
Forma de acción	Depende de los métodos individuales que conforman el método sinérgico. Puede ser oxidación, radiación, etc
Equipos	No difieren de los equipos que utilizan cada una de las técnicas individualmente
Complejidad	Obviamente que habrá mayor complejidad que utilizando técnicas individuales.
Ventajas	Con la sinergia se consiguen acciones de desinfección que no se consiguen por otros métodos. Tanto en la acción de aniquilación de microorganismos como en la producción de SPS. La mayor complejidad conlleva una excelencia en la desinfección
Desventajas	Complejidad, dificultad en conocer con exactitud los mecanismos que están ocurriendo en la desinfección. Mayores costos. Necesidad de mayores controles y personal capacitado. Posiblemente dificultad en medir residuales
Costo de capital	Depende de cada caso en particular. Obviamente que serán mayores que los costos de utilizar cada una de las técnicas que hacen a la sinergia en forma individual
Costo de o&m	Variable
Disponibilidad	Baja por el momento, ya que no son métodos populares
Mantenimiento	Depende del método en particular
Controles	Depende del método en particular
Control analítico	Responde a las necesidades analíticas de cada uno de los métodos individuales. Posiblemente cierta dificultad o la necesidad de equipamiento e instrumentación delicada o compleja
Recomendaciones	Por el momento son solo técnicas que están más dentro del área de la investigación y el desarrollo que del gran uso. No se recomienda por ahora para áreas rurales de países en desarrollo

FILTROS DE NIVEL FAMILIAR	
Método	Varios
Aplicabilidad	Familiar. Pequeños núcleos como villas o caseríos
Forma de acción	Eliminación de microorganismos por oligodinamia o filtración
Equipos	Filtros individuales o modulares (varios filtros con distintas funciones colocados en serie). Hay unidades que no se recambian (los que usan velas de cerámica) y otros que deben cambiarse (aquellos con arena recubierta de plata)
Complejidad	Muy baja
Ventajas	Su simplicidad, la eficacia en la desinfección y en la eliminación de sabores, olores y otra materia orgánica. La facilidad de utilizarlo en las viviendas a la salida de grifos de consumo directo minimiza la no existencia de residuales
Desventajas	Existen demasiados modelos y marcas en el mercado. Muchos de ellos no ofrecen lo que pregonan por lo que no son verdaderamente “desinfectantes”. Deben recibir un muy buen mantenimiento
Costo de capital	Bajos a intermedios
Costo de o&m	Depende del tipo de filtro que utilizan. Las velas cerámicas se limpian y reusan. Otros filtros deben cambiarse. Ello hace que los costos varíen de acuerdo al tipo de producto
Disponibilidad	Buena
Mantenimiento	Muy simple pero muy importante que se les dé la atención necesaria tanto para lavar o cambiar los módulos de acuerdo a las instrucciones del fabricante
Controles	No son necesarios
Control analítico	No existen rápidos y simples, pues no hay residuales. Solo es factible hacer análisis microbiológicos para confirmar su eficiencia
Recomendaciones	Muy recomendables sobre todo para uso familiar. Sin embargo se deberá asegurar que las unidades sean confiables (de fabricación noble certificada) y que se les efectúa un buen mantenimiento.

Cuadros comparativos de las técnicas de desinfección

En las siguientes páginas se presentan dos tablas comparativas, la primera de los distintos desinfectantes y su aplicabilidad y la segunda acerca de las características y atributos de los equipos de dosificación.

Fuentes de información

Skinner, B.; *Chlorinating small water supplies*, a WELL study available at WEDC, Loughborough University, UK (2001).

TABLA COMPARATIVA DE LOS DISTINTOS DESINFECTANTES Y SU APLICABILIDAD

	SODIS	Cl ₂	UV	F.L.A.	O ₃	ClO ₂	MINI	Br ₂	Ag	I ₂
<u>Efectividad</u>										
• Bacterias	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A
• Virus	A	A	A	I	A	A	A	A	I	A
• Protozoos	B	B	B	A	I	I	A	B	B	I
• Helmintos	B	B	B	A	A	I	A	B	B	B
<u>Influencia del agua cruda en relación a</u>										
• pH	B	A	B	B	B	B	A	I	B	B
• Turbiedad	A	I	A	B	A	I	A	I	I	A
• Materia orgánica	I	B	B	B	B	B	I	B	B	B
Produce SPD	NO	SI	NO	NO	B	B	NO	SI	NO	NO
Mantiene Residual de protección	NO	SI	NO	NO	NO	NO	NO	SI	SI	SI
Posible cambios sabores y olores	NO	SI	NO	NO	NO	NO	NO	SI	NO	NO
Rango de uso Caudales	B	B-I-A	B-I-A	B-I	B-I-A	I-A	I-A	B-I	B	B-I
Costo de Capital (equipos)	B	B	B-I	I	I-A	I-A	A	B	B-I	B
Costo de operación	B	B	B-I	B	A	A	A	I	I	I-A
Capacidad del operador	B	B-I	B-I	B	A	A	A	B-I	B-I	B-I
Requerimientos de productos químicos	NO	SI	NO	NO	NO	SI	NO	SI	SI	SI
Requerimientos de energía	NO	B	I	NO	A	A	A	B	B	B

A = Alto

I = Intermedio

B = Bajo

Atributos de distintos equipos y dosificadores

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Sirve para corrientes de agua (canales, tubos sin presión)	SI	NO	SI	SI	SI	NO	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	NO
Sirve para dosificar bajo presión (tuberías en carga)	NO	NO	SI	NO	SI	SI	SI	SI	NO	SI	SI	SI	SI	SI	SI
Sirve para flujos intermitentes	NO	SI	SI	NO	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	NO	SI
Sirve para caudales: Bajos, Intermedios o Altos (B.I.A.)	B	B	I-A	B-I	I-A	B-I	B-I	B-I-A	B-I	B-I-A	I-A	I-A	B-I	B-I	B
Puede ser construido localmente por artesanos del lugar	SI	SI	NO	SI	NO	NO	SI	NO	SI	NO	NO	NO	NO	NO	NO
Disponibilidad de repuestos en el lugar o en comunidades cercanas	SI	SI	NO	SI	SI	NO	SI	NO	SI	NO	NO	NO	NO	NO	NO
Conocimiento del operador para mantenimiento y reparaciones: Bajo, Intermedio o Alto (B.I.A.)	B	B	I	B	I	B	B	B/I	B	A	A	A	I	I	B

1. Calentadores continuos (SODIS)
2. Calentadores por tanda (SODIS)
3. Dosificadores de gas (Cloro)
4. Dosificadores de solución (caja nivel constante; vaso/botella; tubo con orificio) (Hipoclorito de sodio, soluciones de Br₂, Ag, etc)
5. Bombas dosificadoras (Hipoclorito de sodio, soluciones de Br₂, Ag, etc)
6. Venturis (Hipoclorito de sodio, soluciones de Br₂, Ag, etc)
7. Aparatos de Erosión (Hipoclorito de calcio)
8. Equipos de radiación UV
9. Filtro lento de arena

10. Equipos de Ozonización
11. Equipos de Dióxido de cloro
12. Minifiltración
13. Equipos electrolíticos (Ag)
14. MOGGOD
15. Filtros caseros

A = Alto
I = Intermedio
B = Bajo