

FIGURA 28

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

d) Seguridad

En general, las tabletas y píldoras de hipoclorito son más fáciles y más 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 estabilizador que se considera no es apropiado para el consumo humano.*

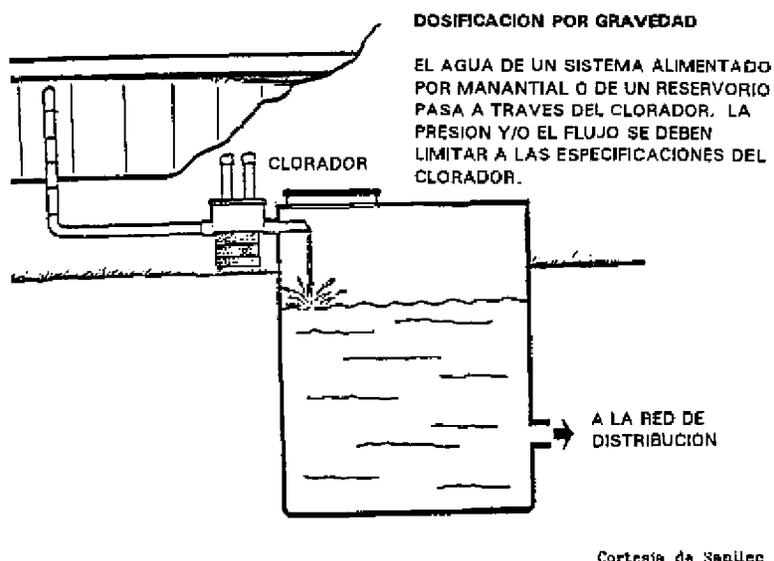


FIGURA 29
Instalación típica de un clorador por erosión de tabletas de hipoclorito de calcio

e) Costo

El costo de este tipo de dispositivo de hipocloración varía según el fabricante y de un país a otro; sin embargo, en general es relativamente económico. El costo de las tabletas en 1990 en algunos países de América Latina y el Caribe oscilaba entre EUA\$3,00 y \$6,00 la libra. El costo de los dispositivos dosificadores por erosión de tabletas varía entre \$300,00 y \$400,00. Los dosificadores de píldoras para pozos cuestan alrededor de \$800,00 y los gránulos o píldoras de \$4,50 a \$5,00 la libra. El costo por persona por año se encuentra entre \$3,00 y \$7,00.

Hipoclorador por gravedad

Hay varios hipocloradores sencillos hechos localmente de materiales fácilmente obtenibles. Los más exitosos están diseñados para suministrar una solución de hipoclorito a una tasa de flujo constante. Estos cloradores suelen tener nombres genéricos, como dosificador de orificio sumergido flotante, plataforma flotante, válvula de boya, dosificador de solución de botella, dosificador de solución de carga constante en V, y otros. Aquí sólo se trata en detalle el de orificio sumergido de carga constante, que se utiliza en varios países de la Región y generalmente en efectividad ha sido más satisfactorio que los otros.

Hay muchas variaciones del dosificador de solución por orificio sumergido de carga constante. En la Figura 30 se muestra un diseño que ha tenido éxito. La dosificación se puede regular de acuerdo a la profundidad de inmersión y/o el número de orificios sumergidos. Una vez ajustada ésta, como el nivel del agua sobre los orificios es constante, también lo es la dosificación. Este tipo de dosificador, hecho de tubería plástica, tiene una ventaja notable sobre otros porque no se corroe; 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 suficientemente exacto y fiable. Estos dispositivos pueden fabricarse de muchos materiales, pero es esencial que todos sean resistentes a los efectos corrosivos de una solución fuerte de hipoclorito. Las boyas se han hecho de tubos de PVC, "styrofoam" y madera. No deben usarse metales como aluminio, acero, cobre o aún acero inoxidable porque se destruyen rápidamente.

La manguera debe ser de un material suficientemente flexible como "Tygon", y debe inclinarse constantemente hacia abajo a partir del orificio sumergido hasta la salida. La tubería de vinilo flexible es muy común. No debe tener ninguna curva o vuelta vertical que retenga aire e impida un flujo de dosificación constante. La tubería debe tener contrapesos para evitar la tendencia a flotar y para asegurar que la boya permanezca nivelada a medida que desciende la superficie de la solución de cloro. La salida debe estar en el punto más bajo del tanque de solución. El tanque de solución se puede hacer de cualquier material resistente a la corrosión por una solución concentrada de hipoclorito, como el polietileno de alta densidad, fibra de vidrio o asbesto-cemento.

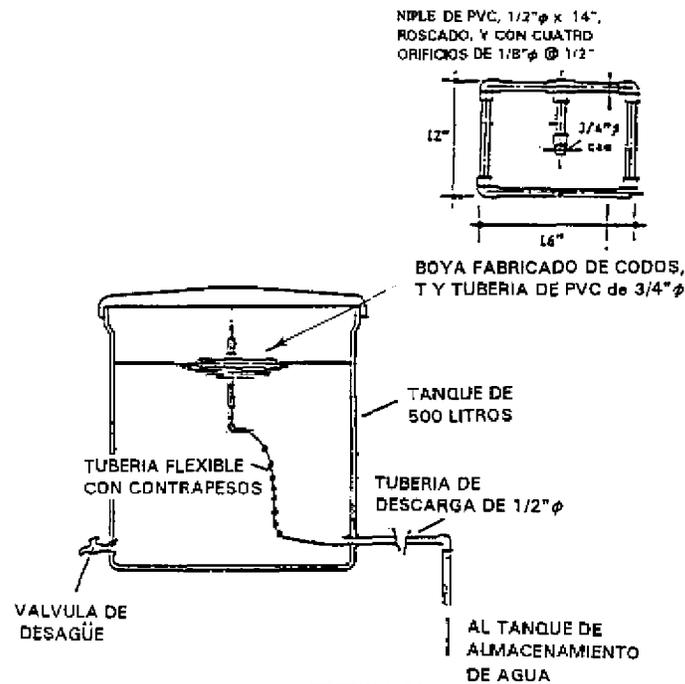


FIGURA 30
Hipoclorador de orificio sumergido

Para las soluciones madre de hipoclorito de calcio o cal clorada, algunos diseños emplean un solo tanque dividido por una rejilla de difusión que separa los compartimientos de mezclado y de la solución de dosificación a fin de evitar que pasen precipitados y sedimentos. Otros emplean dos tanques separados, uno para el proceso de mezclado y sedimentación del cual se pasa el sobrenadante a un segundo tanque de solución que contiene el orificio sumergido flotante. Para las soluciones de hipoclorito de sodio un solo tanque sin rejilla es todo lo que se necesita porque los sedimentos y precipitados son mínimos.

a) Requisitos de energía

Este tipo de clorador no requiere fuente de energía externa, excepto quizás para operar un mezclador que facilite la disolución del hipoclorito de calcio o la cal clorada.

b) Requisitos de instalación

Este equipo es sencillo de instalar. Como el nombre lo indica –dosificador por gravedad– 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 usarlo al preparar las soluciones madre y para aseo general.

c) Operación y mantenimiento

Este equipo es fácil de operar, mantener y reparar, por cuyo motivo no se requieren operadores especializados. Estos pueden ser adiestrados fácilmente en un breve periodo de tiempo. Sin embargo, se requiere vigilancia regularmente para cerciorarse de que el equipo, en particular el de orificio sumergido, se mantenga limpio, que esté fluyendo la dosificación adecuada, que la solución del tanque no se haya agotado o debilitado su concentración, que no haya cambio en el flujo, etc.

La preparación manual de la solución de hipoclorito se tiene que hacer con mucho cuidado, según se explicó con anterioridad. 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 de hasta el 10%. Las concentraciones mayores no son aconsejables porque pierden potencia rápidamente y si son muy altas se pueden cristalizar.

d) Seguridad

Este tipo de dispositivo es muy seguro. Sin embargo, es preciso observar las precauciones discutidas en relación con otros hipocloradores. La solución se debe preparar con cuidado, porque puede que haya que levantar cargas pesadas, por lo que las salpicaduras y derrames suelen ser un riesgo. La superficie del piso debe escurrir hacia afuera de los tanques, los canales de mezcla y las cámaras de contacto. Se debe ubicar un grifo y un fregadero en un lugar conveniente para lavarse la piel

o la ropa en caso de accidente. Al preparar soluciones madre deben usarse guantes de goma, delantales y una máscara facial.

e) Costo

El costo de un hipoclorador de orificio sumergido de carga constante, el tanque de solución y las tuberías, bien diseñado y construido, cuesta actualmente entre EUA\$300 y \$600, según la complejidad del diseño, la capacidad de los tanques de solución y el material usado.

Generadores de hipoclorito de sodio *in situ*

La idea de producir hipoclorito de sodio localmente para la desinfección de agua potable ha sido estudiada repetidamente a través de los años y se han registrado muchas patentes; sin embargo, salvo por unos pocos dispositivos, la mayoría han sido demasiado costosos o muy complejos desde el punto de vista técnico para permitir su aplicación generalizada, particularmente en países en desarrollo. En los últimos años se ha renovado el interés en este asunto; en primer lugar, debido a la mayor disponibilidad y uso de titanio para la producción de ánodos de dimensiones estables ("DSA ánodos"), y debido a las mejoras en los ánodos de grafito.

La razón de este nuevo interés en la producción local se debe en parte a que el hipoclorito no se produce en muchos países en desarrollo y tiene que ser importado, con los problemas relacionados de las restricciones de divisas y otros. Además, hay los altos costos de transporte (en particular hasta áreas remotas y pueblos pequeños), con riesgos de seguridad durante el almacenamiento y transporte.

Estas circunstancias han hecho renacer el interés en la producción de hipoclorito *in situ* mediante la electrólisis de la sal (cloruro de sodio), en particular para su uso en suministros de agua rurales y pueblos pequeños como una alternativa factible a la distribución desde una planta de producción de hipoclorito, o de una central de distribución.

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

- ser económicos de adquirir, operar y mantener,
- ser sencillos de operar y mantener,
- ser fiables y duraderos, con producción uniforme,

- ser capaces de usar sal refinada (cloruro de sodio) disponible localmente, y
- tener una capacidad de producción entre 0,5 y 2,0 kg de cloro disponible en un período de 24 horas.

Se han desarrollado varios dispositivos comerciales (incluyendo algunos en América Latina), sin embargo, no todos ellos reúnen los criterios citados. El principio básico es la electrólisis de una solución de cloruro de sodio para producir cloro en forma de hipoclorito de sodio. Los distintos dispositivos producen soluciones de hipoclorito de sodio de alrededor de 0,5%. La aplicación de estos sistemas se regirá por las características y los requisitos del abastecimiento de agua en consideración. Las Figuras 31 y 32 muestran dos tipos que han sido utilizados con éxito en varios países de la Región.

a) Requisitos de energía

La eficiencia de los diferentes tipos de equipo para producir hipoclorito de sodio varía un poco. La experiencia indica que se requieren de 6 a 10 kilovatios/hora de energía eléctrica para producir 1 kilogramo de cloro disponible. Esta pequeña cantidad de energía se puede obtener de varias fuentes, como células solares, generadores de energía eléctrica por molinos de viento o por energía hidráulica, y otras; sin embargo, la fuente de energía tiene que ser fiable. Una ventaja del sistema para la producción de hipoclorito de sodio *in situ* es que se lo puede operar en las horas que hay electricidad, y almacenar el hipoclorito preparado para usarlo también en las horas en que falta la energía eléctrica.

b) Requisitos de instalación

El equipo generalmente es fácil de instalar, e incluyendo los tanques de solución ocupa cerca de 3 metros cuadrados de área de piso, pero 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 hechos de materiales 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 otros y al sitio de aplicación. Los locales en todo caso deben estar bien ventilados.

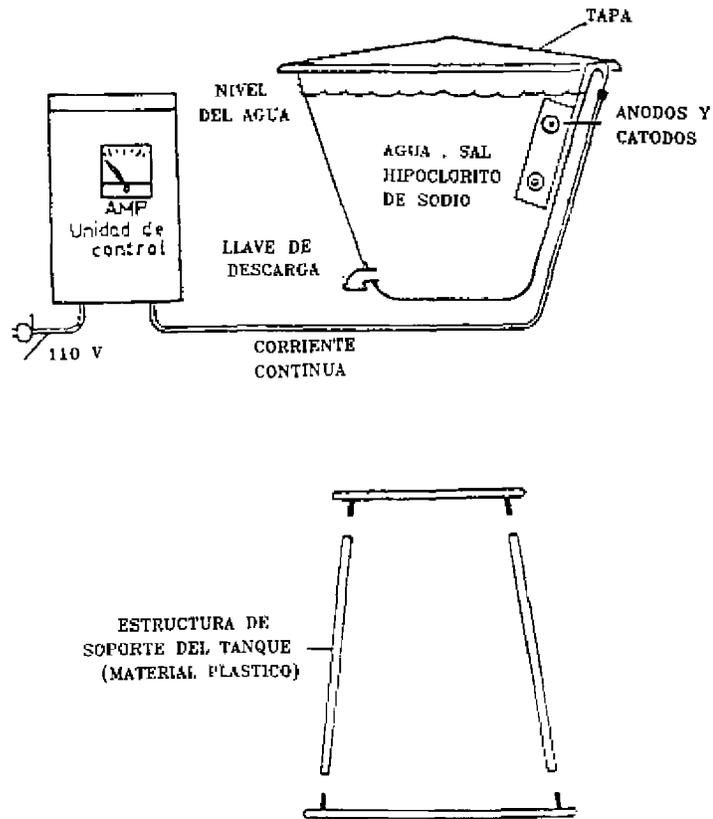


FIGURA 31
*Esquema del sistema Clorid
para producir hipoclorito de sodio in situ
(Cortesía Clorid)*

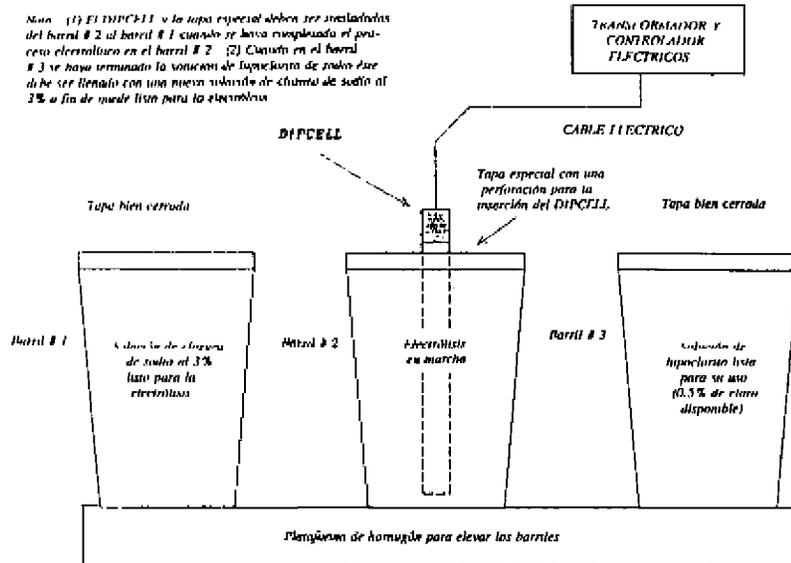


FIGURA 32
Esquema del sistema Dipcell
para producir hipoclorito de sodio in situ

c) Operación y mantenimiento

Este tipo de equipo suele ser muy fiable si se fabrica de materiales resistentes a las propiedades sumamente corrosivas de los productos químicos a ser utilizados. El mantenimiento tiene que realizarse a intervalos regulares de acuerdo

a las especificaciones. Un problema que puede ocurrir con ciertos tipos de dispositivos es la acumulación de depósitos en los electrodos (o la membrana que se utiliza en algunos casos) debido a la presencia de calcio y magnesio en la sal. La formación de depósitos puede disminuirse utilizando sal refinada y agua de solución 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 4 y 6 años) y los de grafito duran alrededor de 1 año. Los ánodos de titanio se pueden limpiar en una solución de ácido clorhídrico.

d) Seguridad

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 rápidamente, si no de inmediato; sin embargo, es preciso tomar precauciones, en especial cuando se abre la celda electrolítica, ya que puede acumularse una cantidad de cloro gaseoso en ella. En general deben seguirse las precauciones ya indicadas para el uso del hipoclorito de sodio.

e) Costo

Las estimaciones del costo total de la generación de hipoclorito de sodio *in situ* en América Latina y el Caribe están basadas en una experiencia limitada, pero actualmente oscilan alrededor de EUA\$2.50/kg de cloro disponible producido. El costo anual de desinfección por persona se estima entre EUA\$0.25 a \$1.00.

Hipocloradores del tipo de difusión

Durante muchos años se han venido diseñando y fabricando localmente hipocloradores del tipo de difusión, en un intento por descargar el hipoclorito gradualmente en pozos o tanques de almacenamiento durante un lapso de varios días. Los diseños más comunes se conocen con el nombre de hipoclorador del tipo de maceta, de jarro doble, de coco y de tubería plástica perforada. Los dispositivos han sido relativamente sencillos de operar y mantener, pero ninguno de ellos ha logrado suministrar una descarga constante del hipoclorito, conforme se esperaba. Por lo general tienden a descargar inicialmente una cantidad mayor de hipoclorito, después de lo cual se produce una disminución constante en la cantidad liberada, hasta que el compuesto de hipoclorito se agota varios días después. Debido a que esto da lugar a concentraciones muy variables del cloro durante unos pocos días (a veces de 0,1 a 25 mg por litro), estos dispositivos no han encontrado aceptación generalizada en América Latina y el Caribe. Más bien, en muchos casos se descartan y los

desinfectantes son administrados manualmente, o se abandona totalmente la desinfección. Otra alternativa ha sido usar tabletas o briquetas de cloro de descarga lenta, pero esto también ha dado lugar a dosificaciones variables, tanto excesivas como insuficientes.

5.2 SISTEMAS DE DESINFECCIÓN POR OZONO

Descripción de los componentes de un sistema de ozonación

A medida que ha ido evolucionando el desarrollo de los equipos de ozonación, han aumentado sus tipos. Aunque todavía no se ha generalizado su uso en América Latina y el Caribe, ya existe cierta experiencia con ellos, y en el mercado se encuentran ozonadores y equipo conexo para sistemas de ozonación con capacidad apropiada para la desinfección en sistemas pequeños de abastecimiento público de agua.

Los sistemas de ozonación para abastecimientos de agua constan de cinco componentes básicos: la unidad de preparación del gas (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 Figura 33 se muestra la relación entre todos estos componentes. En la mayoría de los casos, además de ozono se añade un desinfectante secundario para asegurar un residual duradero en el sistema de distribución.

Preparación del gas

El propósito del dispositivo de preparación de gas es secar y enfriar el gas que contiene oxígeno. Los generadores del tipo de descarga de corona utilizan ya sea aire seco u oxígeno puro como fuente de oxígeno que se va a convertir en ozono. Cuando se usa aire, es vital secarlo hasta un punto de condensación de -65°C , a fin de maximizar el rendimiento del ozono y reducir al mínimo la formación de óxidos de nitrógeno que acelerarían 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 de precio puede ser compensado por la sencillez de operación y mantenimiento. Con aire secado y enfriado adecuadamente, la producción de un generador de ozono generalmente contendrá de 1% a 3,5% de ozono. El oxígeno puro se puede utilizar ventajosamente como gas para aumentar la producción de ozono, de manera que el

producto contenga hasta un 7% con el mismo equipo. Se ha usado con éxito un cedazo molecular de zeolita para producir oxígeno esencialmente puro mediante la eliminación del nitrógeno en el aire. Actualmente siguen haciéndose mejoras que plantean la posibilidad de aumentar aún más el rendimiento de ozono. Sin embargo, parece que, en general, la duración del equipo disminuye si las concentraciones de ozono son mayores.

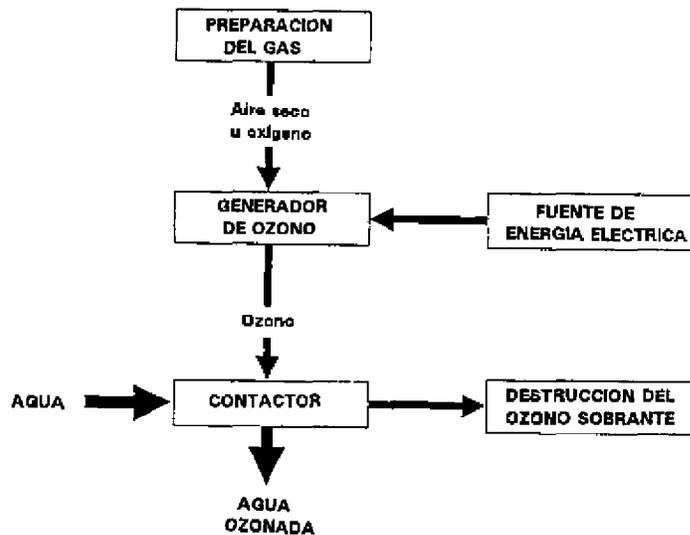


FIGURA 33
Componentes básicos del proceso de ozonación

Generadores de ozono

Todos los sistemas de ozonación 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, a través de la cual se pasa oxígeno o aire secado. El ozono también se puede generar por fotólisis, pero en este documento sólo se trata el tipo

de generador de descarga de corona. Los otros métodos todavía no se utilizan mucho en abastecimientos de agua potable. La Figura 34 ilustra la configuración conceptual de una celda típica de descarga de corona.

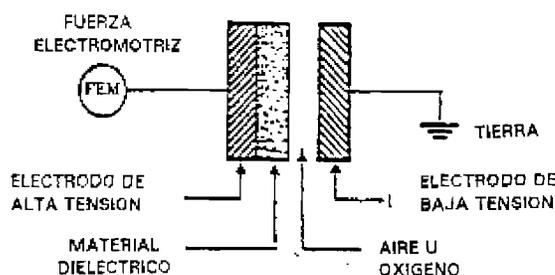
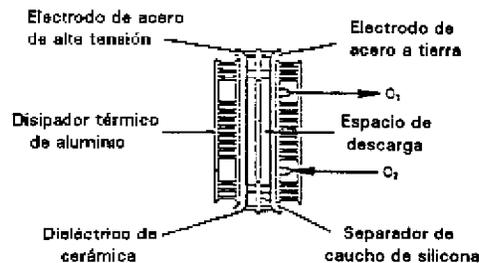
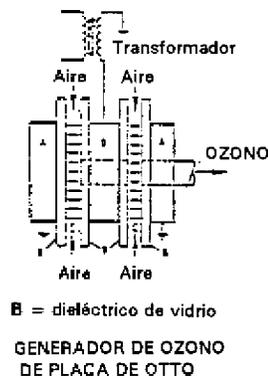


FIGURA 34
Configuración típica de una celda de descarga de corona para la generación de ozono

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. En la Figura 35 se muestran diagramas de los tipos de placa de Otto y de Lowther, mientras que en la Figura 36 aparece el tipo de tubo. El diseño de la 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°C sin sufrir daños significativos, pero es el menos eficaz de los dispositivos y se está dejando de usar. 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. Generalmente funciona a una frecuencia de 2.000 Hz a 9.000 voltios en una presión de gas de cerca de 1.0 k/cm^2 y se ha utilizado en sistemas pequeños de abastecimiento de agua, pero hay pocos datos sobre los resultados de su funcionamiento a largo plazo. El tipo de tubo horizontal, un dispositivo enfriado por agua, se emplea más comúnmente para fines industriales y grandes plantas de tratamiento de agua, pero se han desarrollado varios tipos más pequeños para plantas de tratamiento de menos capacidad. Una unidad patentada que usa tubos dieléctricos de poco diámetro es capaz de generar hasta un 14% de ozono a partir de oxígeno, siendo éste el valor más alto notificado hasta la fecha.



Source: Miller et al. (1972).

**GENERADOR DE OZONO DE PLACA DE
 LOWTHER ENFRIADA POR AIRE**

FIGURA 35

Generador de ozono del tipo de placa

Fuentes de energía eléctrica

Actualmente, las fuentes de energía eléctrica de baja frecuencia (50-60 hertzios) y alta tensión (>20.000 voltios) son las más comunes, pero adelantos recientes en el campo de la electrónica, han dado lugar a dispositivos que operan a alta frecuencia (1000 a 2000 Hz) y 10.000 voltios y parece que están siendo más utilizados en los grandes sistemas de agua. Las fuentes de energía de frecuencia más alta son generalmente más eficientes, pero todavía no se han introducido en gran escala en los sistemas de abastecimiento agua para comunidades pequeñas.

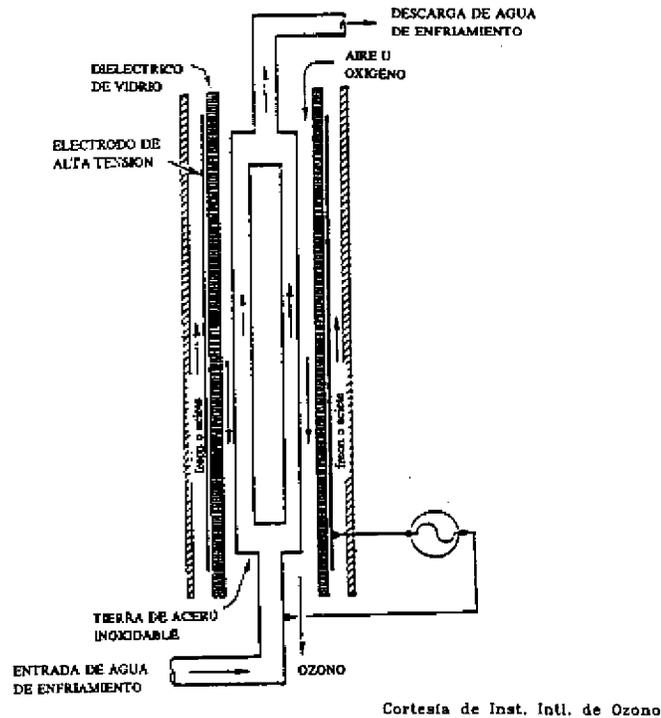


FIGURA 36
Generador de ozono del tipo de tubo

Contadores

Todos los sistemas de ozonación utilizan contactores para transferir el ozono generado al agua que se va a desinfectar. El tipo de contactor depende del objetivo específico de la ozonación. Los objetivos se pueden clasificar como de reacciones rápidas: este es el caso de la inactivación de microorganismos; la oxidación de hierro, manganeso y sulfuros; y el mejoramiento de la floculación; o de reacciones lentas: en el caso de 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

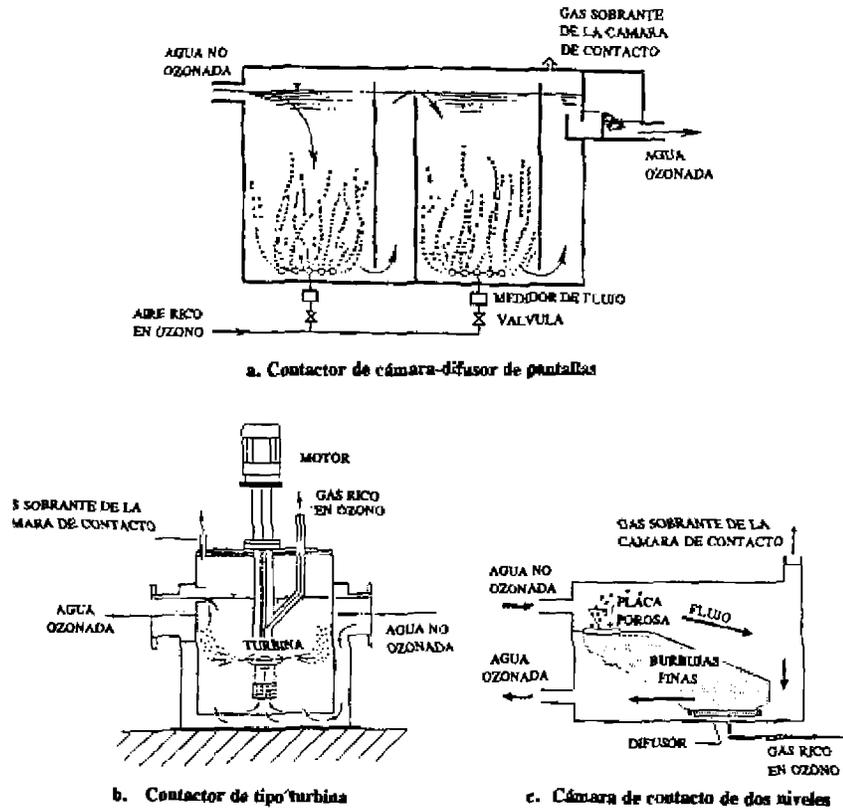
reacciones, la ozonación suele complementarse con luz ultravioleta o peróxido de hidrógeno y el efecto combinado generalmente se califica como un "proceso avanzado de oxidación".

A los fines de la desinfección, la estrategia usual consiste en agregar cantidades suficientes de ozono lo más rápidamente que sea posible, de manera que satisfaga la demanda de ozono y se mantenga un residuo de ozono durante un período de tiempo suficiente para asegurar la inactivación o destrucción de los microorganismos. La demanda de ozono para la gran mayoría de los sistemas de agua suele ser mayor que la de cloro debido al mayor potencial de oxidación. La demanda de ozono generalmente oscila entre 3 y 9 mg/litro. Los procesos de desinfección por ozono normalmente tratan de mantener un residual mínimo de 0,4 a 0,5 mg/litro después de 10 a 20 minutos de contacto con el agua.

La gran parte de las fallas de los sistemas de desinfección por ozono se han debido a diseño y construcción defectuosa del contactor. Hay tres diseños básicos de contactor: el de cámaras separadas con pantallas o tabiques y difusor (Figura 37), el reactor agitado por turbina y el difusor de burbujas de columnas múltiples. Estudios realizados han revelado que el difusor de burbujas de columnas múltiples ofrece la mejor eficiencia de transferencia. En un sistema pequeño de tratamiento de agua con frecuencia se genera ozono a una presión de 1.0 k/cm² y se dispersa en burbujas 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 contacto y dispersar las burbujas), mezcladores estáticos y difusores de hélice para acelerar la solución del gas de ozono y ayudar a asegurar la mezcla y el contacto. La mayoría de las plantas pequeñas de ozonación prefabricadas emplean el difusor de columna o cámara de contacto, con lo cual se pueden alcanzar eficiencias de transferencia del 90% o más. En la ozonación se utiliza un tiempo de contacto de entre diez y veinte minutos para la oxidación y desinfección de sistemas pequeños de abastecimiento de agua. En los tres tipos de contactores indicados 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.

Dstrucción del ozono sobrante

La solubilidad del gas se rige por la Ley de Henry, lo que quiere decir que la concentración alcanzable del 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 del 90%, el gas que escapa puede contener de 500 a 1000 ppm de ozono. Con frecuencia el gas sobrante con ozono se recircula a un proceso unitario anterior para mejorar la oxidación o floculación con objeto de utilizar tanto como sea posible del mismo.



Fuente: Informe EPA 800/2-78-147

FIGURA 37
 Diagramas de contactores típicos de ozono empleados en sistemas pequeños de abastecimiento de agua (104)

A pesar de la recirculación, generalmente habrá algún 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, elevando la temperatura a más de 300°C; 2) descomposición catalítica por metales u óxidos de metal, y 3) la adsorción en carbón activado granular húmedo.

a) Requisitos de energía

La energía requerida tan sólo para la generación del ozono es poca, pero la que se necesita para secar el aire es considerable. El consumo combinado de energía es de 25 a 30 kilovatios-hora de electricidad por kilogramo de ozono generado, respectivamente, por los sistemas alimentados por oxígeno y por aire.

Como es muy importante mantener la desinfección en todo momento en que el agua está corriendo, puede ser necesario contar con generadores de electricidad de reserva en aquellos lugares donde la electricidad sea errática o no fiable, a fin de garantizar la continuidad de la desinfección. Esta podría ser una consideración importante en las comunidades pequeñas de América Latina donde la electricidad no siempre suele ser fiable.

b) Requisitos de instalación

Para producir las cantidades de ozono requeridas por las comunidades y pueblos pequeños objeto de este documento, todos los elementos excepto el contactor se pueden armar en una unidad montada sobre un patín para transportarlas hasta el sitio. Este generalmente es el método menos costoso de instalar los sistemas de ozonación pequeños. Como los contactores para las plantas de ozonación pequeñas se pueden construir de hormigón, fibra de vidrio reforzada o de tubería de PVC, a menudo se construyen en el lugar.

Para un sistema de ozonación pequeño (excluyendo el contactor), se necesita un mínimo de unos 20 metros cuadrados de espacio. El edificio debe ventilarse bien con un ventilador, y las puertas deben abrir hacia afuera. Todas las tuberías del gas de ozono deben ser de acero inoxidable 304-L y 316-L para 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 materiales resistentes a la corrosión, como ladrillos o bloques de hormigón.

c) Operación y mantenimiento

Para su funcionamiento cotidiano, los requisitos operativos de los sistemas pequeños de ozonación pueden ser mínimos. Singley (106) estima que la tarea de mantenimiento diario tomará cerca de media hora al día. Esta cifra tan baja se debe a que gran parte de la operación está automatizada con circuitos integrados en fichas de computadora. Sin embargo, cuando hay que reparar o dar servicio al equipo de preparación del aire, al generador de ozono, al monitoreo automatizado o al sistema de control, se requiere un técnico altamente calificado.

Actualmente 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 ofrecen un servicio de apoyo excelente a los clientes. En Europa, Estados Unidos y Canadá se pueden obtener contratos de inspección y mantenimiento de rutina, así como para repuestos y reparaciones. Esto se ha podido hacer gracias a la fiabilidad y larga vida útil del equipo, así como a la rápida disponibilidad de técnicos de servicio, y es particularmente apropiado para las comunidades pequeñas que carecen de las capacidades técnicas necesarias para mantener y reparar estos equipos a nivel local; sin embargo, todavía no se sabe si estos contratos de servicio son posibles en América Latina o en el Caribe. 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 reparara un operador de una planta de tratamiento en un pueblo o una ciudad pequeña de América Latina. Además, los instrumentos del sistema tienen que ser ajustados o calibrados continuamente y el secador de aire se debe mantener en muy buenas condiciones para evitar la falla prematura del dieléctrico debido a la humedad.

d) Seguridad

Para las plantas de tratamiento pequeñas, materia de este manual, el ozono se consideraría un método muy seguro de desinfección, pues solo se generaría un poco más que la cantidad necesaria para la oxidación y desinfección. Una vez generado el ozono, se mezcla inmediatamente con el agua que se va a desinfectar, por lo que es muy raro que se combine con otras sustancias y represente un riesgo de seguridad. Aunque el gas excedente que se descarga tendría que ser eliminado en forma segura, la cantidad de gas es tan pequeña que la tarea sería relativamente sencilla. El ozono sobrante se podría eliminar (convirtiéndolo nuevamente en oxígeno) mediante cualquiera de los procesos ya mencionados, como la destrucción térmica y, en la mayoría de los casos, incluso podría diluirse suficientemente con

aire (las relaciones de dilución de ozono a aire de 100:1 a 200:1 generalmente son adecuadas) para reducirlo a una concentración inferior a la del nivel máximo admisible de 0,1 ppm.

Otra consideración especial en cuanto a seguridad para las aguas que contienen sustancias orgánicas volátiles, es vigilar el gas en las cámaras de contacto para detectar hidrocarburos y evitar condiciones que puedan provocar una explosión. Esto sería poco probable en las plantas del tamaño aquí considerado.

El ozono, en la desinfección del agua a diferencia del cloro, no ha causado una situación de crisis, por la sencilla razón de que nunca se almacena en cantidades. Se genera en el lugar y se usa inmediatamente. Por este motivo debe considerarse como un método muy seguro de desinfección para comunidades pequeñas.

e) Costos

La tasa mínima de rendimiento de los generadores de ozono varía entre el 10% y el 15% de su capacidad máxima de producción, registrándose la más eficiente en función del costo a alrededor del 60% al 70% de la producción máxima.

El costo (1990) del generador de ozono exclusivamente puede variar de EUA\$1.500/kg de capacidad por día para un sistema grande, hasta cerca de \$8.000/kg por día para un sistema pequeño. El costo de la cámara de contacto se estima que oscila entre \$8.000 y \$12.000 para una planta que maneja 1000 m³/día. El costo de un sistema de monitoreo y control completamente automatizado es de \$10.000 a \$15.000, independientemente de la capacidad de la planta.

El costo de un sistema para una comunidad de 10.000 personas, donde el uso per cápita promedio es de 100 litros al día, podría ascender a \$50.000. El costo de operación y de capital varía considerablemente, según la cantidad y el costo de la energía así como el mantenimiento requeridos para el sistema específico. Además, la variación en el costo es considerable debido a las muchas opciones disponibles para el pretratamiento del aire, los generadores de ozono, los contactores de ozono, la destrucción de los gases sobrantes, y los sistemas de monitoreo y control. El costo de operación y mantenimiento variaría entre \$4.000 y \$8.000 por año, dependiendo de los costos de mano de obra y energía, así como de la necesidad de hacer reparaciones y de reemplazar componentes.

Se ha estimado que el costo total de la ozonación en las plantas pequeñas de tratamiento de agua varía de \$0,03 a \$0,06/m³ de agua tratada. Los costos de operación y mantenimiento (excluyendo la energía) de las plantas pequeñas de ozono oscilan entre \$0,003 y \$0,006 por m³ de agua tratada (105).

5.3 SISTEMAS MOGOD

La sigla MOGOD (Mixed Oxidants Generated on site for Disinfection) se emplea para describir el proceso de "oxidantes mezclados generados *in situ* para la desinfección". Esta fue acuñada por la Organización Panamericana de la Salud para cubrir una gran variedad de dispositivos que generan una mezcla de oxidantes mediante la electrólisis, la fotólisis o reacciones químicas. En el mercado existen varios dispositivos patentados. Además, diversos organismos de los gobiernos de varios países de América Latina también los han desarrollado. La mayoría utiliza la electrólisis de una solución de sal, pero por lo menos uno emplea la fotólisis de aire u oxígeno. La tecnología del oxidante mezclado todavía se encuentra en la etapa de desarrollo, pero algunos de los dispositivos han llegado a proporcionar una desinfección eficaz, fiable y de bajo costo, y se están empleando con éxito.

En condiciones adecuadas, la electrólisis de una solución puede generar una mezcla de oxidantes, que actúan en combinación como un desinfectante potente. La generación de oxidantes por medio de la electrólisis se ha llevado a cabo en escala comercial desde finales de siglo pasado. Probablemente la primera generación de mezclas de oxidantes por electrólisis se descubrió cuando Cruickshank, en 1801, observó y describió el olor del ozono (antes de que se le diera ese nombre) en el gas formado en el ánodo en la electrólisis del agua. Desde entonces se han hecho muchos adelantos y mejoras constantes en la producción de oxidantes mediante la electrólisis, en particular en la industria del cloro-álcali. La introducción, en 1969, del ánodo dimensionalmente estable, de las membranas perfluorinadas y las constantes mejoras posteriores han aumentado la eficiencia, bajado el costo de producción y reducido considerablemente la cantidad de energía requerida por los procesos electrolíticos. En la actualidad, más del 90% del cloro de América del Norte se produce por electrólisis con esta tecnología.

Equipo MOGOD

Los adelantos anotados han hecho que la generación *in situ* de las mezclas de oxidantes sea una alternativa factible para la desinfección de abastecimientos de agua de comunidades pequeñas. Para esto la tecnología básica de la electrólisis ha sido adaptada para asegurar sencillez de instalación y operación, durabilidad y compatibilidad con las condiciones reinantes en las comunidades remotas, pequeñas y pobres. Aunque se ha sacrificado parte de la eficiencia del proceso de electrólisis, esto se ha compensado con creces por una ganancia en la eficiencia general. Diferentes fabricantes han producido varios prototipos que han sobrepasado la etapa de modelo de laboratorio, existiendo ya varias unidades que se producen y venden en el mercado. La OPS no tiene una cifra exacta del número de instalaciones de este

tipo que existen en América Latina y el Caribe pero se estima que a fines de 1993 estarían en uso más de 200 instalaciones de oxidantes mezclados. Algunas de estas unidades se destinan a la obtención de datos e información sobre los aspectos prácticos de esta tecnología, y otras simplemente a la producción de agua bacteriológicamente segura. La primera instalación funcionó de 1984 hasta 1993 excediendo la eficiencia y eficacia de la cloración con gas que se había utilizado previamente.

El sistema MOGOD está constituido por dos componentes: la celda electro-lítica y el control que reduce y convierte 120 ó 220 Voltios CA a 6 Voltios CC.

La Figura 38 es un esquema de una unidad típica de electrólisis para la producción de gas de oxidantes mezclados, que muestra la relación entre los componentes de la celda electrolítica, los insumos y productos químicos que se obtienen. La celda electrolítica está dividida en dos compartimientos, (uno para el ánodo y otro para el cátodo), por una membrana semipermeable de un copolímero perfluorinado para el intercambio de cationes (Nafion). Las unidades cuentan ya sea con ánodos de titanio con un recubrimiento de óxidos de iridio y/o platino como el TIR-2000 de ELTECH, ánodos fabricados de una aleación de metales del grupo VIII, o los hechos de grafito especial.

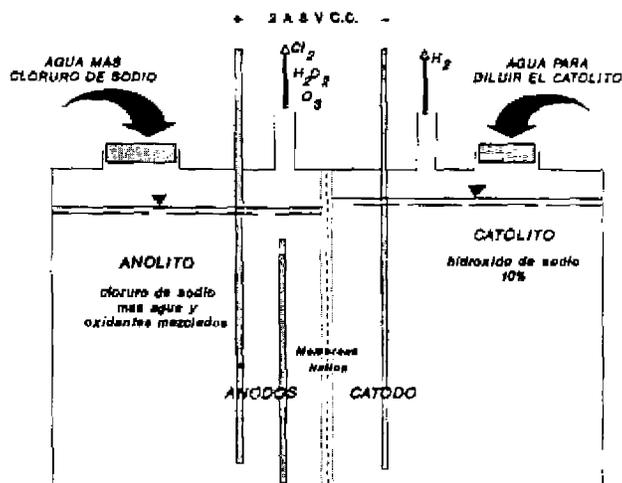


FIGURA 38

Esquema de una celda electrolítica típica de MOGOD

Los oxidantes generados por la electrólisis saturan el anólito y se desprenden en forma de gas. A veces se incluyen los electrodos auxiliares que operan a una fuerza electromotriz (FEM) más baja que el ánodo primario, (que es un proceso patentado) para producir un porcentaje mayor de las especies de oxígeno y se colocan entre el ánodo primario y la membrana. El cátodo es de acero inoxidable 440. En el compartimiento del ánodo se mantiene una solución saturada de cloruro de sodio añadiendo agua y un exceso de cloruro de sodio. En el compartimiento del cátodo se genera hidróxido de sodio. Una concentración de hidróxido de sodio superior al 10% requiere mucha más energía y hace subir la temperatura, por lo que generalmente se mantiene a una concentración entre el 8% y el 10% añadiéndole agua para diluirla y extrayendo el líquido excedente. En los ánodos se generan las especies de cloro y oxígeno activado (los componentes de los gases de oxidantes mezclados), mientras que en el cátodo se forma el gas de hidrógeno y el hidróxido de sodio. En este proceso específico, los gases oxidantes mezclados son inyectados en el agua que se va a desinfectar; el gas de hidrógeno excedente se dispersa en la atmósfera; y el hidróxido de sodio se recoge para destinarlo a otros fines o para disponer de él en forma adecuada.

El gráfico de la Figura 39 muestra la vida útil del ánodo TIR-2000 en función de la densidad de la corriente (en amperios por pulgada cuadrada de la superficie del ánodo) en una solución del 15% de ácido sulfúrico.

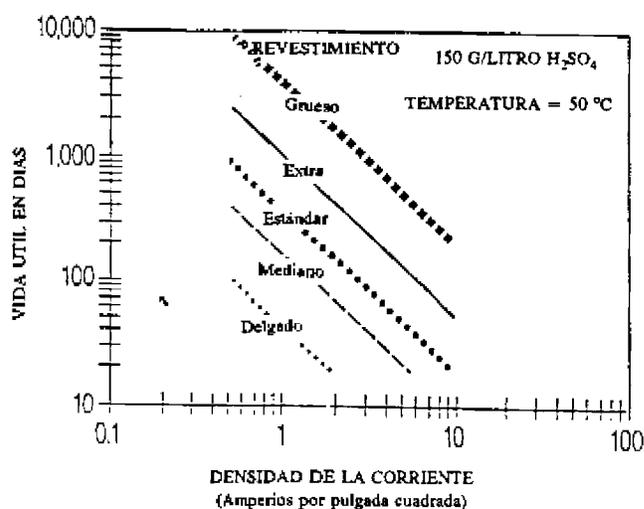


FIGURA 39
Vida útil del TIR-2000 vs. densidad de la corriente

Si se aumenta el espesor del revestimiento de óxidos de iridio y/o platino, se prolonga la vida útil del ánodo. Como la densidad de la corriente operacional del ánodo oscila entre 0,6 y 1,0 amperio por pulgada cuadrada, la vida útil del ánodo oscilará entre unos 3 a 8 años con el revestimiento de larga duración, y entre 7 y 12 años con el revestimiento más grueso, si los electrodos están en funcionamiento las 24 horas del día.

Los ánodos de grafito se estima que duran entre nueve meses y dos años, según la densidad de la corriente y la calidad del grafito.

Otro método de producir oxidantes mezclados, genera una solución de oxidantes mezclados en lugar de gases oxidantes mezclados. Esto se logra con una celda de titanio recubierta de óxido de iridio que aprovecha el flujo laminar que atraviesa la celda para separar por electrólisis las especies oxidantes y dividir el flujo de la solución salina en oxidantes en la pared de la celda donde se halla el ánodo y el hidróxido de sodio en la pared donde está el cátodo. Este dispositivo, que ha funcionado bien en el laboratorio y en ensayos de campo en los Estados Unidos, está siendo probado en el terreno (1993-1994) en Bolivia. La solución desinfectante producida fue probada bajo condiciones controladas en el laboratorio, comparando su eficiencia con las soluciones de hipoclorito en la inactivación de microorganismos que son difíciles de inactivar como las esporas de *Clostridium perfringens*; quistes de *Giardia lamblia* y *Cryptosporidium parvum*; MS-2 virus y *Vibrio cholera* (rugoso). Esta tecnología es muy prometedora para condiciones en las que una solución de oxidantes mezclados sería más conveniente que el gas de oxidantes mezclados.

a) Requisitos de energía

La energía eléctrica consumida por la celda electrolítica de los distintos dispositivos generadores de oxidantes mezclados variará según el diseño específico de la celda, incluyendo el material de los electrodos, la superficie y configuración de estos, la geometría de la celda, el material de la membrana y la normalidad (N) o concentración de las soluciones anódicas y catódicas. En la práctica, la operación de unidades comerciales indica que el consumo de energía en la celda oscila entre 3,6 y 7,5 kilovatios-hora por kilogramo de oxidantes mezclados producidos en la forma de gas, y aproximadamente 7 kilovatios-hora en las celdas que producen una solución. En condiciones de funcionamiento, si se permite la acumulación de calcio, magnesio, hierro o manganeso en la membrana o el cátodo, el consumo de energía aumentará en consecuencia.

La energía eléctrica consumida por los reguladores eléctricos para los diversos dispositivos de MODOG varía de 2 a 3 kilovatios/hora por kilogramo de

oxidantes producidos; la energía total consumida por la celda electrolítica y el regulador generalmente oscila entre 5,6 y 10 kilovatios-hora por kilogramo de oxidantes producidos.

La fiabilidad de la electricidad también es importante en una situación en que la fuente de agua fluye constantemente.

Como es muy importante mantener la desinfección en todo momento en que el agua está corriendo, tal vez haya que contar con generadores de reserva en aquellos lugares donde la electricidad sea errática o no fiable, a fin de garantizar la continuidad de la desinfección. Esta podría ser una consideración seria en las comunidades pequeñas de América Latina donde la electricidad no siempre suele ser fiable.

b) Requisitos de instalación

El espacio mínimo necesario para la instalación combinada de la celda electrolítica y el regulador eléctrico es de poco menos de dos metros cúbicos con $1m^2$ de área; sin embargo, debido a la alta corrosividad de los oxidantes mezclados que puedan escapar durante el mantenimiento, la celda debe estar ubicada en un lugar bien ventilado y aislado de los controles eléctricos (incluyendo la fuente de energía y el regulador), el equipo eléctrico como bombas y paneles de control y otros materiales que se puedan dañar por la corrosión.

La Figura 40 ilustra una estructura independiente típica desarrollada en América Latina, para usarla donde no exista un lugar protegido, en la cual se coloca la celda electrolítica en el compartimiento inferior y la unidad de control eléctrico en el superior. Es importante que ambos compartimientos estén completamente aislados entre sí, sin ninguna posibilidad de que circule aire entre los dos; se recomienda usar puertas de entrada separadas, y todas las conexiones de alambres y tuberías entre los dos compartimientos debe calafatearse y sellarse. La estructura se debe construir de material resistente a la corrosión, como ladrillos, bloques de cemento o de arcilla cocida. Ambos compartimientos deben estar bien ventilados, pero no se necesita ventilación forzada como la usada en la cloración por gas porque la cantidad de gas que puede haber en cualquier momento es muy pequeña, siendo tan solo la necesaria para atender las necesidades de desinfección del momento.

Un espacio existente, bien ventilado, como en las salas de cloración, se puede utilizar para instalar la celda electrolítica, pero el regulador eléctrico y el resto del equipo eléctrico, como controles y bombas, debe estar en otra sala para evitar problemas de corrosión.

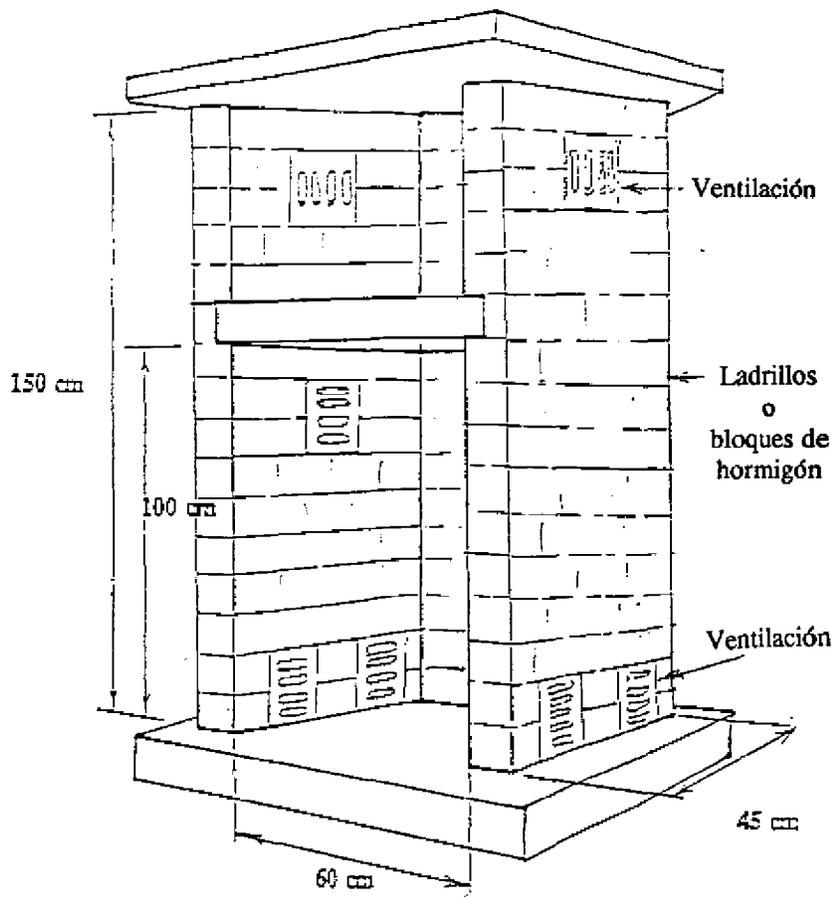


FIGURA 40
Caseta para la protección del equipo de desinfección MOGOD

La selección e instalación del Venturi suele ser la parte más engorrosa de la instalación. El Venturi debe seleccionarse cuidadosamente tomando en cuenta las condiciones hidrodinámicas del sistema de tuberías en el que se va a instalar. En la mayoría de los casos se prefiere el Venturi que tenga la pérdida de carga más baja. La Figura 41 muestra una curva típica de las características y límites de operación de un Venturi.

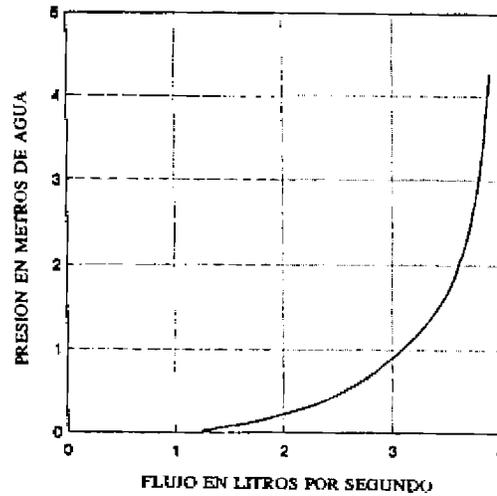


FIGURA 41
Curva típica de las características de un Venturi

Las tuberías y los accesorios empleados en la instalación del Venturi deben ser de material resistente a la corrosión, como PVC o CPVC, incluyendo las válvulas de cierre y uniones universales a fin de poder sacar fácilmente el Venturi para limpiarlo o cambiarlo, así como los grifos para sacar muestras, ubicados antes y después del Venturi. Además, debe haber un grifo para conectar una manguera y un tramo corto de manguera para facilitar la limpieza de la celda electrolítica y agregarle agua a los compartimientos del cátodo y del ánodo. Las Figuras 42, 43, 44 y 45 ilustran la plomería típica del Venturi para diversas instalaciones.

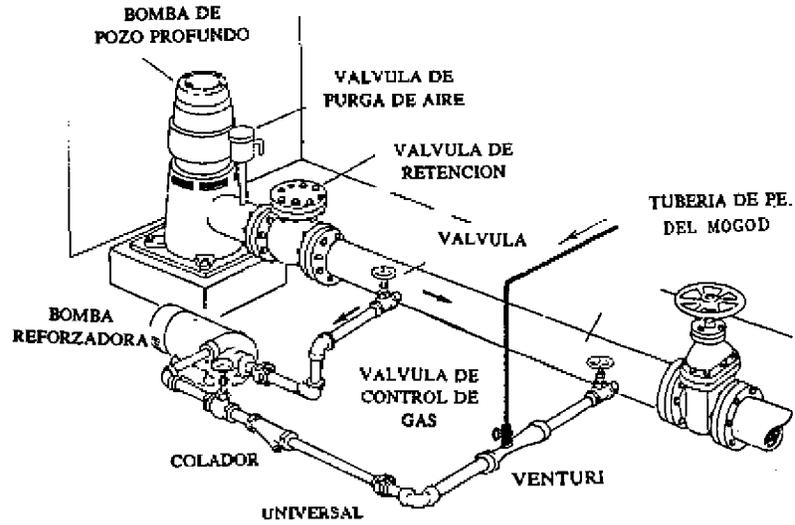


FIGURA 42
Instalación típica de un Venturi con bomba reforzadora

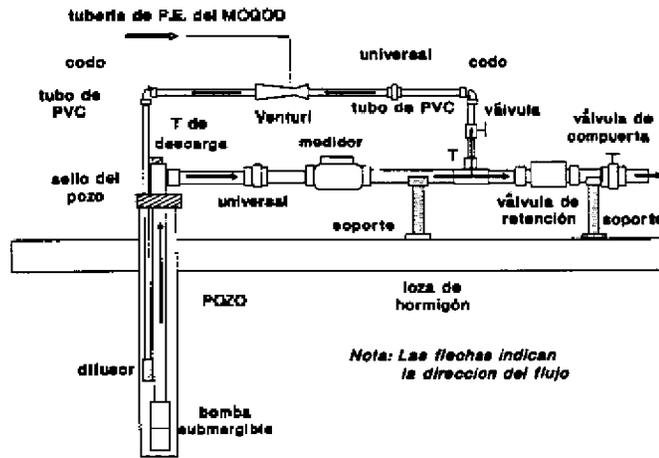


FIGURA 43
Instalación típica de un Venturi de MOGOD que descarga directamente a un pozo (tubo de succión del MOGOD)

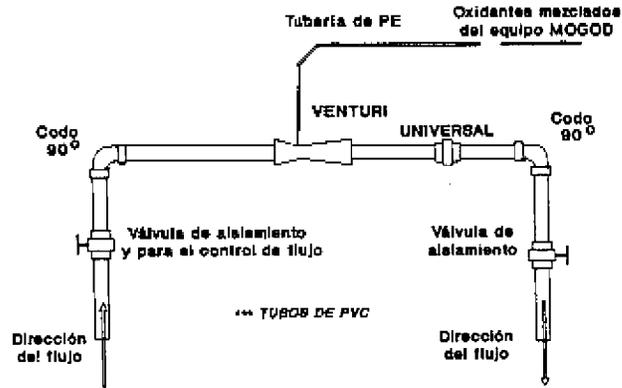


FIGURA 44
Requisitos de una instalación típica de un Venturi de MOGOD que descarga en una derivación

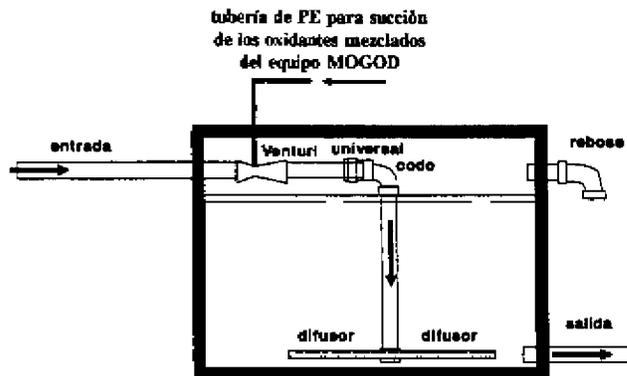


FIGURA 45
Instalación típica de un Venturi de MOGOD que descarga por gravedad en un tanque de almacenamiento

La tubería de succión que conecta la celda electrolítica al Venturi debe ser de Teflón o polietileno de alta densidad; los dos materiales que resisten mejor la oxidación producida por los oxidantes mezclados.

Aunque la cantidad de hidrógeno generado por el sistema MOGOD es pequeña, se debe ventilar en la atmósfera por medio de un tubo vertical o casi vertical de PVC a fin de eliminar toda posibilidad de ignición.

Es recomendable instalar el regulador eléctrico algo más bajo que el nivel de la vista del operador a fin de que sea fácil tomar la lectura de los indicadores y hacer ajustes manuales.

Deben proveerse los medios para recoger el desbordamiento del exceso de hidróxido de sodio del compartimiento del cátodo cuando se está diluyendo el catolito. Este producto, sumamente cáustico, debe recolectarse en un recipiente de plástico y puede emplearse para otros fines.

La materia prima usada en la celda electrolítica es cloruro de sodio de alta pureza industrial, que suele venderse en bolsas plásticas o tambores fáciles de manejar y almacenar (no se debe usar sal refinada o sal común). La sal no es peligrosa y no requiere almacenamiento especial, excepto que debe mantenerse seca, debido a sus propiedades higroscópicas, y hay que evitar vandalismo y hurtos. Para más comodidad, se debe mantener una existencia mínima para un mes, almacenada relativamente cerca de la celda electrolítica.

c) Operación y mantenimiento

Hay dos clases básicas de equipo para la producción de oxidantes mezclados que se pueden obtener comercialmente. Uno es automatizado y es principalmente para uso industrial. El otro es de control manual y se utiliza en sistemas de agua que sirven a comunidades pequeñas. No se recomiendan las unidades automatizadas para comunidades pequeñas debido a la dificultad de reparar y reemplazar los componentes automatizados cuando se descomponen. Estas pueden convenir cuando se cuenta con un contrato de servicio de mantenimiento idóneo.

En las unidades de control manual debe cumplirse con los siguientes requisitos de operación y mantenimiento:

1. Añadir sal (NaCl) al compartimiento del ánodo cuando está bajando el nivel.

2. Añadir agua al compartimiento del ánodo cuando el nivel disminuye por debajo del mínimo indicado (una vez al día a dos veces por semana, según sea necesario).
3. Verificar, con un hidrómetro, la concentración de la solución de hidróxido de sodio en el compartimiento del cátodo (todos los días).
4. Añadir agua al compartimiento del cátodo cuando la concentración de la solución de hidróxido de sodio excede del 10% (una o dos veces a la semana, o según sea necesario).
5. Drenar la celda electrolítica y enjuagarla bien con agua; rellenar la celda y añadir un agente secuestrador al anolito (una vez al mes o según sea necesario cuando el agua que se usa en el anolito sea dura).
6. Observar el indicador del amperímetro periódicamente y hacer el ajuste que sea necesario para obtener la producción deseada de oxidantes (a diario).
7. Comprobar el nivel residual de oxidante en el sistema de distribución (cuando lo prescriba la autoridad sanitaria o por lo menos una vez a la semana, o según sea necesario).

d) Seguridad

La desinfección con oxidantes mezclados generados en el sitio es uno de los métodos más seguros porque solo se produce oxidantes suficientes para su uso inmediato y los materiales básicos, sal y agua, no son reactivos. Sin embargo, hay dos aspectos de seguridad que merecen consideración. El operador debe evitar la inhalación directa de los gases al añadir agua o sal al compartimiento del ánodo o al limpiar la celda electrolítica. Esto se puede hacer interrumpiendo la corriente eléctrica y permitiendo la succión continua de los gases por el Venturi mientras se rellena de sal y agua el dispositivo. Antes de empezar la limpieza y enjuague mensual de la membrana, el operador debe neutralizar los gases oxidantes en el compartimiento del ánodo añadiendo cerca de 50 cc de líquido del compartimiento del cátodo; esto eliminará el problema de inhalación de los gases oxidantes mezclados. Se deben usar guantes de goma y anteojos protectores como precaución contra derrames accidentales u otro contacto con el hidróxido de sodio. El recinto también debe estar bien ventilado a fin de diluir cualquier gas que se escape de la celda.

El operador debe tener cuidado de no derramar el líquido sobrante generado por el cátodo. Este se debe poner en botellas o cubetas fuertes de polietileno. Este líquido es hidróxido de sodio al 10%, que puede causar quemaduras graves en la piel y los ojos. Debe tratarse con el mismo cuidado que un limpiador fuerte de desagües, para lo que también se puede usar.

Los dispositivos para producir oxidantes mezclados, al igual que cualquier otra unidad de desinfección, deben estar protegidos contra manipulación indebida o vandalismo, por lo que se deben colocar en un recinto cerrado con llave, preferiblemente dentro de un área cercada, tal como la que se proveería normalmente para otros componentes del sistema de abastecimiento de agua. Esta forma de desinfección no representa prácticamente ningún peligro para el público circundante debido a la cantidad tan limitada de oxidantes mezclados que se generan. El gas se usa de inmediato y no se almacena en el sitio.

e) Costos

Los siguientes datos sobre costos se refieren a los equipos de gas de oxidantes mezclados, y fueron tomados de varios países latinoamericanos. Hay muy poca información disponible sobre los dispositivos que generan una solución de oxidantes mezclados, pero su costo parece similar.

El costo de los diversos equipos para generar oxidantes mezclados *in situ*, completos con celda electrolítica, regulador eléctrico y Venturi, oscilan entre EUA\$800 y \$2.500 por una unidad que produce el equivalente de 1/2 kilogramo de cloro en oxidantes mezclados durante un período de 24 horas, y entre \$1400 y \$2800 por unidades que producen el equivalente de 1 kilogramo de cloro durante un período de 24 horas. Las unidades que producen 2 kilogramos cada 24 horas cuestan de \$2500 a \$4000. Actualmente las unidades no se producen en serie, y los precios fluctúan considerablemente según la cantidad adquirida.

La conversión de sal y agua a gases oxidantes mezclados varía de 0,7 a 0,9 kilogramos de sal consumida por cada kilogramo (equivalente de cloro) de oxidante mezclado producido. La variación depende de la eficiencia de conversión, así como de la proporción de cloro y las especies de oxígeno generadas. Los dispositivos que producen soluciones de oxidantes mezclados requieren cerca de 3 kilogramos de sal por cada kilogramo de oxidante mezclado producido. El precio de un kilogramo de sal de alta pureza industrial varía de cerca de \$0,16 a aproximadamente \$0,50, dependiendo de las circunstancias locales del país en cuestión. En casi todos los casos cuesta menos utilizar sal de alta pureza que una de pureza baja que requiera cambios más frecuentes de la membrana o de los ánodos.

Los costos generales estimados de estos sistemas, basados en la experiencia operacional en diversos países, incluyendo instalación y abrigo, amortizados en un período de 10 años, más el costo de operación y mantenimiento, oscilan entre EUA\$0,75 y \$1,85 por kilogramo de oxidante producido, dependiendo del costo de la electricidad, sal, mano de obra, materiales de construcción y complejidad de la instalación. Sin embargo, se necesita más experiencia e información para compilar datos fiables sobre costos, ya que la instalación del MOCOD que ha funcionado más largo tiempo tiene sólo 10 años de operación.

5.4 SISTEMAS DE DESINFECCION POR LUZ ULTRAVIOLETA

Descripción del equipo

El equipo ultravioleta que hay en el mercado actual utiliza lámparas de arco de mercurio de baja presión que emiten su energía máxima de salida a una longitud de onda de 253,7 nm y a una temperatura de funcionamiento de cerca de 40°C. La eficiencia baja con la disminución o aumento de la temperatura llegando a cerca del 50% tanto a 24°C como a 60°C. También desciende con el uso, debido principalmente a que el vidrio cambia gradualmente por la exposición a la luz ultravioleta, atenuando la longitud de onda útil. Las lámparas raras veces se queman, pero generalmente se cambian después de que han perdido del 35% al 40% de la luz ultravioleta que emitían cuando eran nuevas. Estas lámparas tienen una vida útil de 9 meses a 1 año, según el fabricante.

Hay dos tipos básicos de cámaras de exposición del agua a la radiación ultravioleta. Aquellas en que las lámparas están sumergidas en agua y las que están fuera del agua. En las unidades de luz ultravioleta de lámparas sumergidas, se debe proveer un espacio aislante para mantener las temperaturas cerca del punto óptimo, lo que se logra rodeando la lámpara con una camisa de cuarzo o vidrio de alto contenido de sílice, proporcionando así un espacio de aire suficiente para aislarla del agua fría para que pueda funcionar cerca de las temperaturas óptimas. En las otras unidades las lámparas pueden estar suspendidas sobre el agua que se está tratando, o el agua se puede confinar en una tubería de teflón o de cuarzo para conducirla a través de lámparas ultravioletas (Figura 46). Aunque el Teflón no deja pasar la luz ultravioleta con la misma eficiencia que el cuarzo, es considerablemente menos costoso y no es tan frágil. El uso de tubería de Teflón es más común en los sistemas pequeños de abastecimiento de agua.

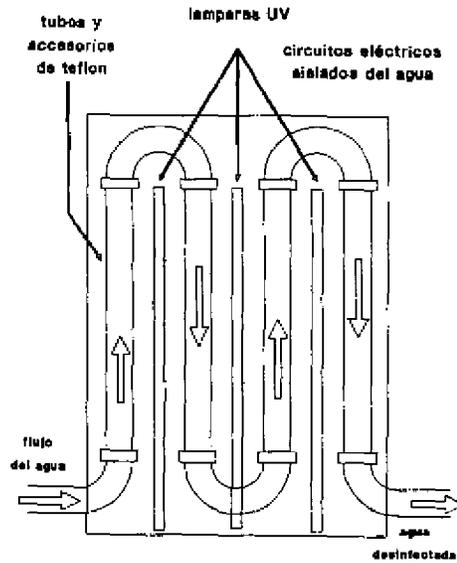
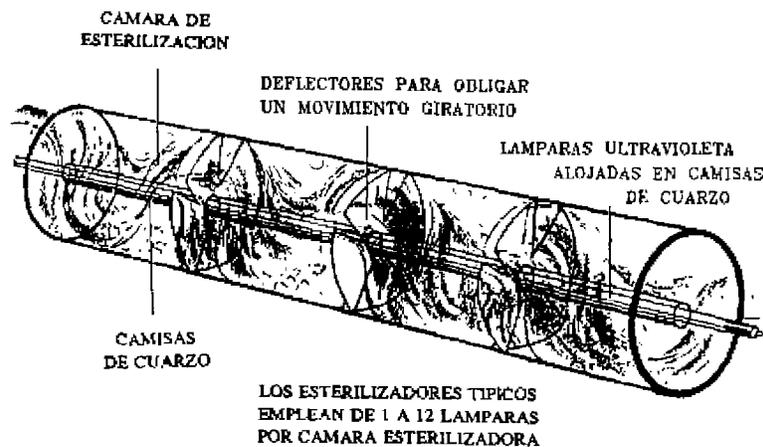


FIGURA 46
Cámara de contacto que utiliza tubos de teflón transparente para el flujo del agua

Una consideración importante en el diseño del equipo de desinfección con luz ultravioleta es asegurarse de que cada microbio reciba la dosis biocida de radiación ultravioleta en la cámara de contacto. Esto se logra determinando el espacio correcto entre las lámparas y las superficies reflectivas 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 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 es paralelo a la longitud de las lámparas, es necesario utilizar mezcladores estáticos (pantallas) para proporcionar la turbulencia necesaria. Esta configuración se ilustra en la Figura 47.

Las especificaciones del equipo de acuerdo a las normas industriales deben requerir que después de 1 año de operación con las mismas lámparas, la exposición

proporcionada sea superior a 30.000 microvatios/segundo por centímetro cuadrado. Al seleccionar el equipo ultravioleta, deben considerarse dispositivos que permitan cambiar las lámparas y limpiar las camisas de cuarzo o la cubierta de Teflón con facilidad. Se recomienda que el equipo incorpore una ventanilla de observación (de vidrio) para poder comprobar visualmente si todas las lámparas ultravioletas están funcionando.



Cortesía de Aquafloc

FIGURA 47

Cámara de contacto de flujo paralelo a las lámparas de luz ultravioleta utilizando pantallas para crear turbulencia

a) Requisitos de energía

La energía eléctrica requerida para la desinfección ultravioleta variará algo con la calidad del agua a tratar, pero debe oscilar entre 22 vatios/hora por cada metro cúbico de agua tratada. Igualmente importante es el hecho de que la luz ultravioleta no deja residuales de desinfectante y por lo tanto se requiere que la fuente de energía eléctrica sea sumamente fiable durante todo el tiempo que el agua

este fluyendo por la unidad de desinfección. Esto significa por ejemplo que cuando se utiliza una bomba eléctrica para agua, se debe instalar un interruptor que apague automáticamente la bomba cuando la unidad ultravioleta no esté funcionando o cuando la dosis ultravioleta sea inferior al nivel prescrito.

En comunidades donde la electricidad no sea fiable, se debe instalar una fuente de energía de emergencia independiente para asegurar la continuidad de la desinfección en todo momento.

b) Requisitos de instalación

El equipo ultravioleta debe estar instalado en un cuarto o recinto que lo proteja de los elementos y del vandalismo. El recinto debe proteger el equipo de temperaturas extremas u otras condiciones que pudieran hacerlo funcionar mal.

El espacio requerido para el equipo de desinfección ultravioleta es bastante pequeño porque el tiempo necesario de contacto/exposición es muy breve. Una unidad capaz de tratar 100 metros cúbicos por hora suele ocupar un espacio de 0,6m x 0,6m x 1,0 m (o sea una superficie de piso de 0,6m x 1,0m). De todas las tecnologías de desinfección, la de luz ultravioleta es la que requiere menos espacio, pero se debe dejar campo adecuado para cambiar las lámparas, y es una buena idea tener también lugar de almacenamiento seguro para guardar un número de lámparas suficiente para 2 años de operación.

Desde el punto de vista práctico, se precisa de cierto nivel de automatización y complejidad en el sistema de control, que debe incluir monitores de los sensores ultravioleta que indiquen visualmente si existen los niveles de luz ultravioleta necesarios para lograr la desinfección. Esto simplemente no se puede hacer manualmente. El sistema de control debe dejar que las lámparas UV se calienten por lo menos 5 minutos antes de comenzar el tratamiento del agua. Para los sistemas que tratan flujos variables de agua, el sistema de control debe poder encender y apagar lámparas para alcanzar la dosis necesaria en proporción al flujo. También es recomendable tener un sensor para cortar automáticamente el flujo del agua en cualquier momento que el sistema ultravioleta no pueda producir la dosificación adecuada para la desinfección.

En lugares donde la electricidad no sea fiable, como ya se ha indicado podría ser preciso contar con una fuente de energía de reserva para asegurar la continuidad de la desinfección.

En instalaciones mayores puede que convenga tener módulos redundantes a fin de poder cambiar las lámparas deficientes sin tener que interrumpir las operaciones.

c) Operación y mantenimiento

Los requisitos 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 cubierta de Teflón estén libres de sedimento u otros depósitos que atenúan la luz ultravioleta, pues podría ocurrir deposición de partículas ya sea del lado de las camisas expuestas al aire o del lado del agua. En los sistemas pequeños la limpieza generalmente se hace a mano, limpiando la camisa de cuarzo de la lámpara una vez al mes como mínimo, y en circunstancias excepcionales, 2 ó 3 veces por semana. Se recomienda que el fabricante incorpore en el diseño dispositivos de limpieza especiales operados a mano.

El operador debe leer con regularidad el monitor de dosificación, para asegurar que la dosis del sistema en que está instalado sea la apropiada. La vinculación del sensor del monitor a una alarma (luz o audio) debe tomarse en cuenta. Las lámparas se deben cambiar a intervalos necesarios para garantizar por lo menos 30.000 microvatios-segundo por centímetro cuadrado de área de exposición en todo momento. Esta variará de una lámpara a otra, pero generalmente están programadas para el intervalo promedio cuando su intensidad disminuye a menos del 70% de su potencia nominal. En agua muy fría puede que haya que cambiar las lámparas con más frecuencia.

Como la luz ultravioleta no deja ningún residual de desinfectante, 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.

Si existe la probabilidad de recontaminación del agua o de que vuelvan a crecer las bacterias, tiene que usarse un desinfectante químico secundario, como las cloraminas preformadas, además de la desinfección ultravioleta. Tanto los sistemas de distribución de agua presurizados intermitentemente, como los sistemas con fugas y los sistemas con tiempos de residencia considerables se deben complementar con un desinfectante químico apropiado.

d) Seguridad

A los operadores se les debe enseñar los peligros de la luz ultravioleta para los ojos y la piel, y proporcionarles gafas apropiadas para proteger los ojos y ropa adecuada.

Se debe proveer un lugar seguro para almacenar y desechar las lámparas de vapor de mercurio usadas. Las lámparas usadas se deben desechar de modo que el mercurio no contamine el ambiente.

e) Costos

Un sistema completo de desinfección ultravioleta, incluyendo el reactor ultravioleta, el sistema de limpieza, la fuente de energía eléctrica y el interruptor, los controles e instrumentos necesarios, en 1992 costaba cerca de EUA\$7.500 por kilovatio de tasación. El costo anual de operación y mantenimiento incluyendo electricidad, mano de obra y reemplazo de lámparas es de unos \$900 por kilovatio de tasación del sistema ultravioleta.

En 1990, el costo total de la desinfección de agua clara con el sistema ultravioleta (sin el costo de un desinfectante secundario que proporcione un residual) variaba entre \$10 y \$20 por metro cúbico de agua desinfectada, dependiendo del factor de recuperación del capital, y de los costos de electricidad, mano de obra y reemplazo de lámparas en el sitio. En las plantas de tratamiento pequeñas como las examinadas en este documento, el costo de reemplazar las lámparas oscila entre el 10% y el 20% del total de los costos de operación y mantenimiento, mientras que en las plantas mayores puede llegar hasta el 50%.

5.5 SISTEMAS DE YODACION

El yodo no se han llegado a usar continuamente durante largos períodos en los sistemas de agua de comunidades debido al alto costo y la preocupación por los posibles efectos sobre la salud en algunas personas susceptibles, por ello, los dispositivos de dosificación en realidad nunca se han probado en condiciones operacionales a largo plazo; sin embargo, los sistemas del tipo de saturador que se han utilizado para la aplicación de yodo han sido probados en la aplicación de flúor y en hipocloradores, por lo que hay muy pocas dudas sobre su eficacia, eficiencia, fiabilidad o durabilidad para dosificar también el yodo. El saturador sería probablemente el equipo más apropiado para dosificar yodo en los sistemas de agua de comunidades pequeñas

Se han propuesto sistemas que usan resinas yodadas, pero aún no se han empleado para desinfectar sistemas de agua para comunidades pequeñas. El uso en América Latina ha sido limitado a clínicas, escuelas y otras instituciones.

Equipo de yodación

En un saturador el agua pasa a través de un lecho, sobre el que descansa una capa de cristales de yodo, a una cierta velocidad de flujo determinada, para que produzca una solución saturada cuando salga del saturador. El yodo, que es el halógeno menos soluble, tiene un nivel de saturación de aproximadamente 200 a 400 mg/litro a lo largo del intervalo de temperaturas del agua que se suelen encontrar en América Latina y el Caribe (Figura 12). Esta solución saturada luego se dosificaría en el sistema de agua por medio de una bomba reguladora de desplazamiento positivo, un sistema de válvulas o un Venturi ajustable, para mantener en el sistema de distribución un residual determinado previamente que deberá oscilar entre 0,3 y 0,8 mg/litro. Debido a que el yodo es un oxidante relativamente débil, no se combina fácilmente con el amoníaco, sustancias orgánicas o de otro tipo de material que puede estar presente en el agua a tratar; por lo tanto, la demanda de yodo generalmente debería ser pequeña. Una vez ajustada la dosificación para obtener el residual deseado en un sistema de distribución específico, se podría usar esta misma dosis por largos períodos. White recomienda usar bombas reguladoras en lugar de un Venturi u otro dispositivo de inyección para producir un vacío mediante la presión del agua, porque considera que su habilidad para suministrar tasas de alimentación exactas no es igualmente fiable (82). La Figura 48 ilustra un saturador que utiliza un sistema de válvulas para dosificar la solución de yodo; la Figura 49 muestra un saturador que emplea una bomba reguladora de diafragma; y en la Figura 50 se observa un sistema típico de desinfección con resina yodada.

a) Energía

La energía requerida para dosificar el yodo en un sistema de agua sería la necesaria para accionar una bomba o para desviar el flujo en torno a una válvula de control u operar un Venturi. Esto es similar a la energía necesaria para inyectar hipoclorito en un sistema de agua y depende principalmente de la presión interna de la tubería en la que se va a inyectar.

La energía requerida para un sistema de desinfección por resina yodada es proporcional a la pérdida total de la carga debida al prefiltro de cartucho, el cartucho de resina yodada y el cartucho de carbón activado. En los sistemas de distribución de baja presión puede requerirse una bomba reforzadora.

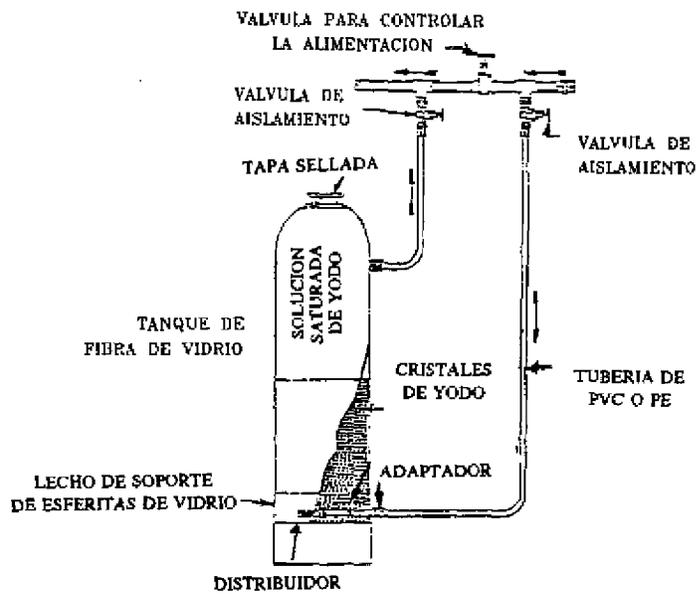


FIGURA 48

Saturador de yodo de alimentación por diferencia de presión

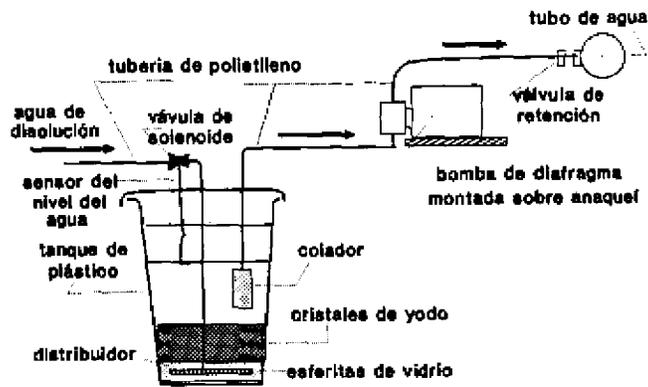


FIGURA 49

Saturador de yodo y dosificador con bomba de diafragma

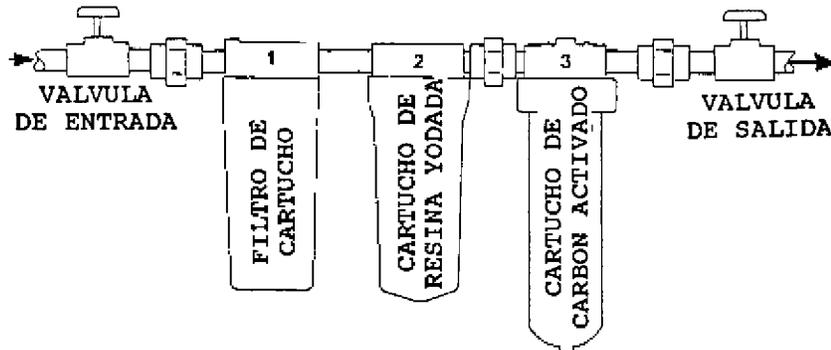


FIGURA 50
Sistema de desinfección por resina yodada

b) Requisitos de instalación

Los dispositivos de desinfección por yodo tienen requisitos sencillos para su instalación.

Como el yodo es un sólido, no pierde la potencia mientras está almacenado (pero se sublima); por tanto, se debe almacenar en envases herméticos. Se recomienda tener un cuarto separado para almacenar los tambores de yodo, y se requiere ventilación normal en el área de almacenamiento y de dosificación.

En vista de que puede ser preciso manejar soluciones saturadas de yodo y siempre existe el riesgo de derramar algo de estas soluciones, es importante que el área de dosificación esté diseñada con un desagüe de piso y que el piso tenga una pendiente hacia el desagüe. También es buena práctica instalar un fregadero hondo en el cuarto de dosificación para limpiar el equipo y sus diversas partes y extraerles los depósitos de yodo. El grifo o grifos de agua del fregadero hondo deben tener rosca (con un interruptor de acción de sifón) a fin de poder conectar una manguera para limpieza y llenar de agua los saturadores de tipo estático.

El yodo es el oxidante más débil de los halógenos y no es particularmente corrosivo; sin embargo, se recomienda usar tubo de PVC o CPVC, ambos de clase 80, para todas las tuberías que llevarán o estarán en contacto con soluciones yodadas

fuertes. Las conexiones deben ser de rosca con cinta de teflón en lugar de soldarlas con solvente. La tubería de descarga de la bomba de dosificación y la tubería de succión del Venturi debe ser de Teflón o polietileno de alto peso molecular. No se recomienda usar tubería de vinilo.

Los sistemas de desinfección por resina yodada generalmente vienen como un conjunto completo de componentes listo para conectarlo a la tubería. Los adaptadores para conectarlos al sistema de tuberías existente son los únicos requisitos especiales, aparte de los eléctricos en el caso de requerirse una bomba reforzadora.

Es importante señalar que todo el caudal de agua que se va a desinfectar debe pasar por el sistema de resina yodada. En los sistemas de desinfección por resina yodada no se puede usar un desvío, como se suele hacer en la mayoría de los demás sistemas de desinfección, para aplicar desinfectante en una corriente de derivación que se va a combinar posteriormente con la corriente principal de agua. Esta restricción generalmente limita los sistemas de resina yodada a tratamientos en el lugar donde se va a usar.

c) Operación y mantenimiento

Los requisitos de operación y mantenimiento de un saturador de yodo son mínimos. Básicamente consisten en cerciorarse de que el saturador tenga un exceso de carga de yodo en todo momento y un suministro de agua adecuado, que la bomba de dosificación o Venturi esté funcionando bien, y que cuando sea necesario se limpien las válvulas de retención en la bomba o a la entrada del Venturi. Aunque un saturador puede funcionar sin atención durante una semana o más, se recomienda inspeccionarlo todos los días. En general, un dispositivo de dosificación con Venturi requiere atención más frecuente que una bomba de dosificación de desplazamiento positivo.

El operador también debe tomar muestras y analizar el agua desinfectada, tanto en el área de tratamiento como en el sistema, para cerciorarse de que se está manteniendo el residuo determinado previamente. Esto se debe vigilar estrechamente, a fin de mantener un residuo mínimo de 0.5 mg/litro (para asegurar la inactivación de microbios) y que éste no exceda de 0.8 mg/litro en cualquier parte del sistema para evitar problemas de salud en personas que tienen sensibilidad al yodo.

Para un sistema de resina yodada, es importante cambiar el prefiltro, el cartucho de resina yodada y el cartucho de carbón activado, a los intervalos recomendados por el fabricante. Esto será cada varias semanas o meses, de acuerdo con la cantidad de agua tratada y la calidad de ésta. Sin embargo, se recomienda que el operador inspeccione el sistema todos los días para asegurarse de que está

funcionando adecuadamente y para tomar las lecturas del medidor de agua, que se utilizarán para determinar la frecuencia de reemplazo de los cartuchos.

En todos los sistemas de desinfección por yodo es importante que se mantenga un buen control del yodo residual.

d) Seguridad

Los cristales de yodo son fáciles de manejar. Como medida de precaución, se recomienda usar guantes de goma y una máscara con filtros especiales para manipular los cristales de yodo, porque éste es una sustancia tóxica y no se debe ingerir. Se debe tener cuidado de no almacenar jamás amoníaco cerca de los cristales de yodo porque su mezcla accidental puede dar lugar a la formación de un producto explosivo.

Los sistemas de desinfección por resina yodada son muy seguros para el operador debido a la naturaleza química de las resinas y a la forma en que vienen empacadas.

Dada la falta de experiencia con la yodación, y en vista de los posibles efectos del yodo sobre la salud, se recomienda que cualquier instalación de este método de desinfección en América Latina se realice con carácter experimental y que se establezca un programa especial para vigilar estrechamente y registrar todos los aspectos de este método alternativo de desinfección en cooperación con las autoridades de salud.

e) Costo

En la actualidad el yodo cuesta cerca de diez veces más que el cloro gas. Suele venir en tambores de 100 libras. En 1990, su costo F.O.B. Nueva York era de unos EUA\$12/kilogramo por el yodo granular USP y aproximadamente \$8/kilogramo por los cristales de yodo sin refinar. El costo de la yodación depende principalmente del costo de los productos químicos.

El costo de la mano de obra relacionada con la desinfección con yodo es muy bajo. El saturador, una vez ajustado, requiere poca atención y se puede cargar con una cantidad suficiente de yodo para que dure una semana o más entre rellenos. A diferencia de las soluciones de hipoclorito, la solución de yodo no pierde mucha potencia con el tiempo; sin embargo, es buena práctica revisar el aparato una vez al día para asegurarse de que las válvulas Venturi, las de retención o la tubería no se obstruyan con precipitados.

En vista de la carencia de información y datos específicos sobre el costo del equipo, incluyendo la recuperación del capital invertido, la mano de obra, energía eléctrica y otros, no es posible actualmente dar un costo aproximado del proceso de yodación. El costo por kilogramo del yodo varía entre EU\$8 y \$12 dependiendo de varios factores.

El costo total de los sistemas de resina yodada por metro cúbico de agua tratada es muy elevado en comparación con todos los otros sistemas de desinfección. A la frecuencia de reemplazo del cartucho de resina yodada que recomiendan los diversos fabricantes de estos sistemas, el costo de la resina yodada sola es de cerca de \$0,30 a \$0,50 por metro cúbico de agua tratada. Cuando se incluye el costo de reemplazar los cartuchos del prefiltro y de carbón activado a la frecuencia recomendada por los fabricantes, el costo del agua tratada oscila entre \$1,20 y \$4,00 por metro cúbico. Este costo alto excluiría el uso de la resina yodada para los sistemas comunitarios de distribución de agua por tuberías. Estos dispositivos se han utilizado en unas pocas situaciones especiales donde la fiabilidad y la sencillez de la operación y el mantenimiento son de gran importancia, como en consultorios, escuelas y hospitales y en algún tratamiento en el lugar de uso.

REFERENCIAS

- (104) G.W. Miller, R.G. Rice, C.M. Robson, R.L. Scullin, W. Kuhn y H. Wolf, An Assessment of Ozone and Chlorine Dioxide technologies for Treatment of Municipal Water Supplies, U.S. EPA Report No. 600/2-78-147; 1978. U.S. EPA, Municipal Environmental Research Laboratory, Drinking Water Research Division.
- (105) Singley, Edward A.J. Métodos Químicos y Físicos de Desinfección del Agua. Memorias Taller Internacional sobre Actualización en Desinfección de Aguas. Abril 25-29, 1988. ACODAL. Cali, Colombia.