

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.

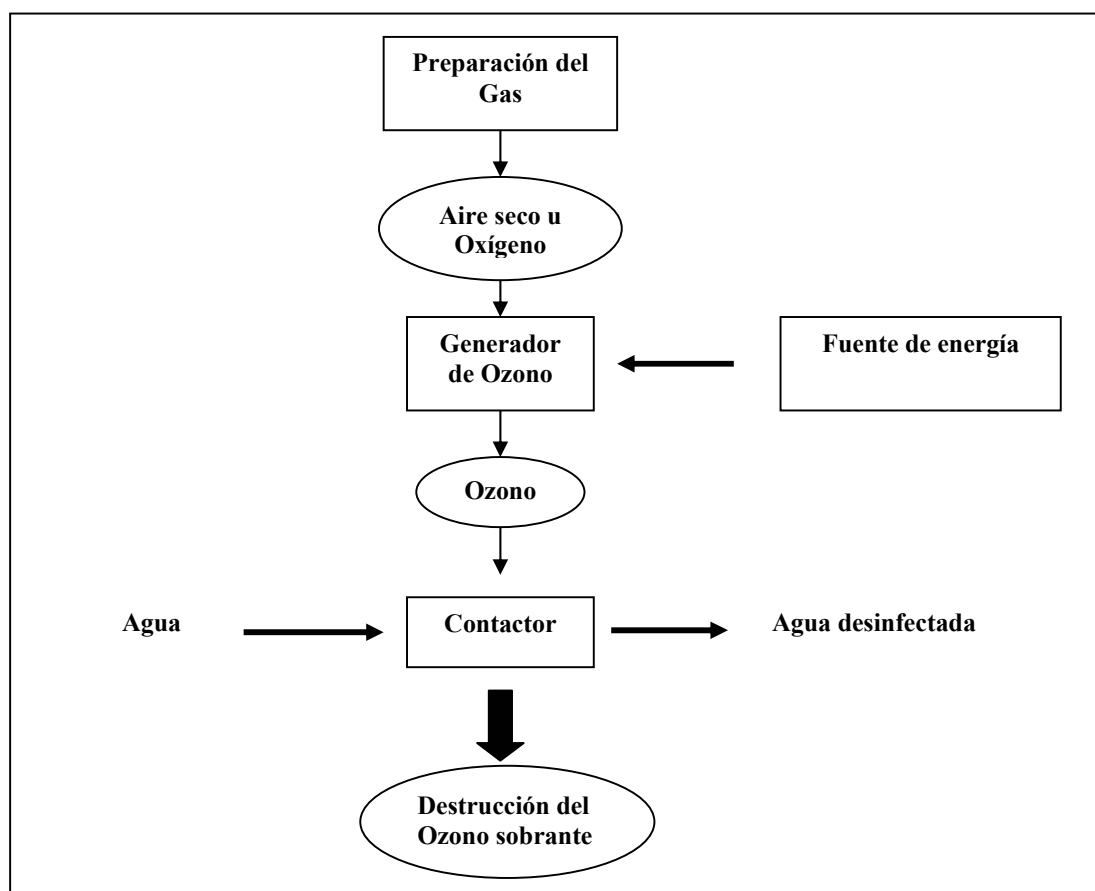
Tal como en el caso del cloro, se deben sopesar los riesgos para la salud por la ausencia de desinfección y los riesgos para la salud por la presencia de subproductos. Dado que todavía quedan muchos campos de investigación que deben explorarse con referencia a los SPD de la ozonización de aguas naturales 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.

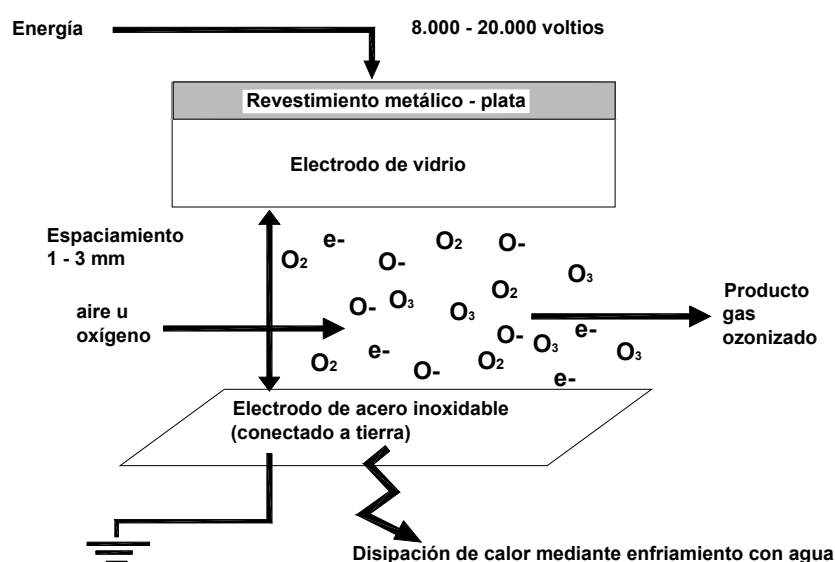
Cuando se utiliza aire, es vital secarlo hasta un punto de condensación de $-65\text{ }^{\circ}\text{C}$, a fin de maximizar el rendimiento del ozono y reducir al mínimo la formación de óxidos de nitrógeno, que aceleran la corrosión de

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

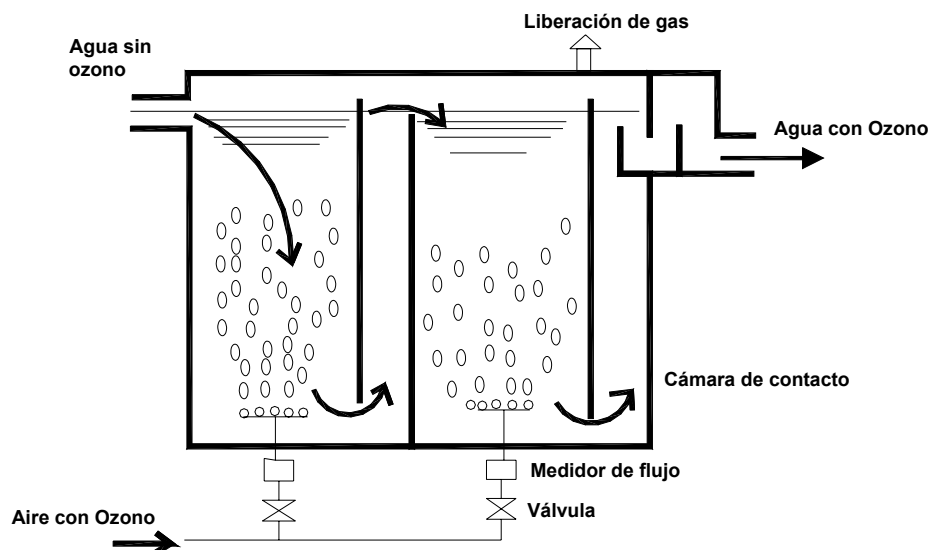
La concentración que alcance el ozono disuelto será directamente proporcional a la presión parcial del gas de ozono sobre el agua. Por lo tanto, aun con una eficiencia de transferencia de 90% (una de las mejores alcanzadas), el gas que escapa puede contener 500 a 1.000 ppm de ozono. Con frecuencia, el 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.

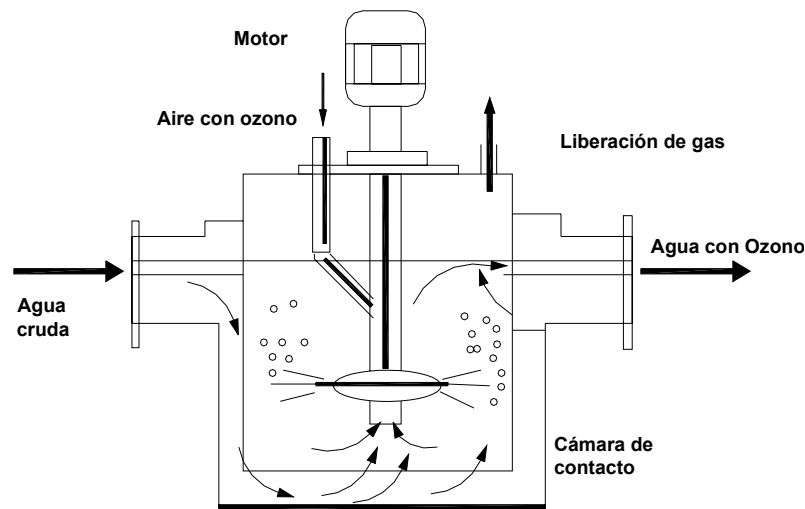
Instalación y requerimientos

- 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