

Capítulo 7

DIÓXIDO DE CLORO



Introducción

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

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

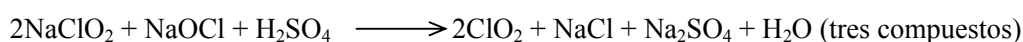
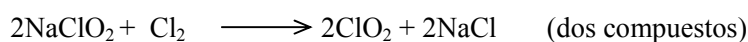
Una aclaración es, sin embargo, pertinente. Se está desarrollando mucha investigación sobre el dióxido de cloro y en los últimos años han aparecido nuevas tecnologías y formas de producción que hacen que esta técnica sea una de las más activas e innovadoras junto con los métodos sinérgicos, que se detallan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

Propiedades del dióxido de cloro como desinfectante y descripción del método

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

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

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



Estrictamente como desinfectante, el ClO₂ presenta las siguientes ventajas:

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

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

➤ **Mecanismos de desinfección del dióxido de cloro**

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

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

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

Eficacia biocida, estabilidad y efecto del pH

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

1 = Más ; 4 = Menos

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

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

Subproductos de la desinfección con dióxido de cloro

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

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

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

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

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

Equipos

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

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

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

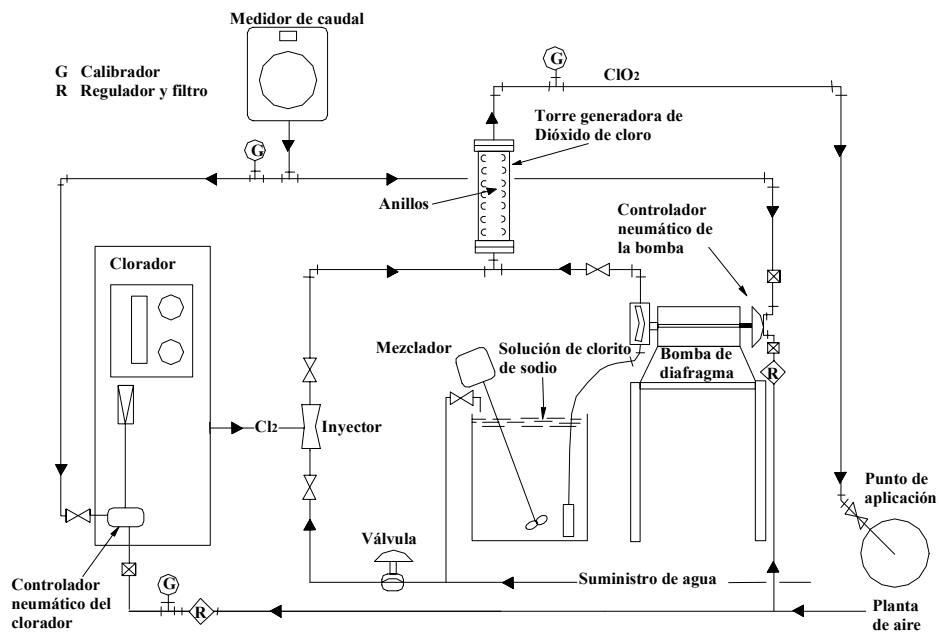
Generador de dióxido de cloro con alimentación proporcional automática

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

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

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

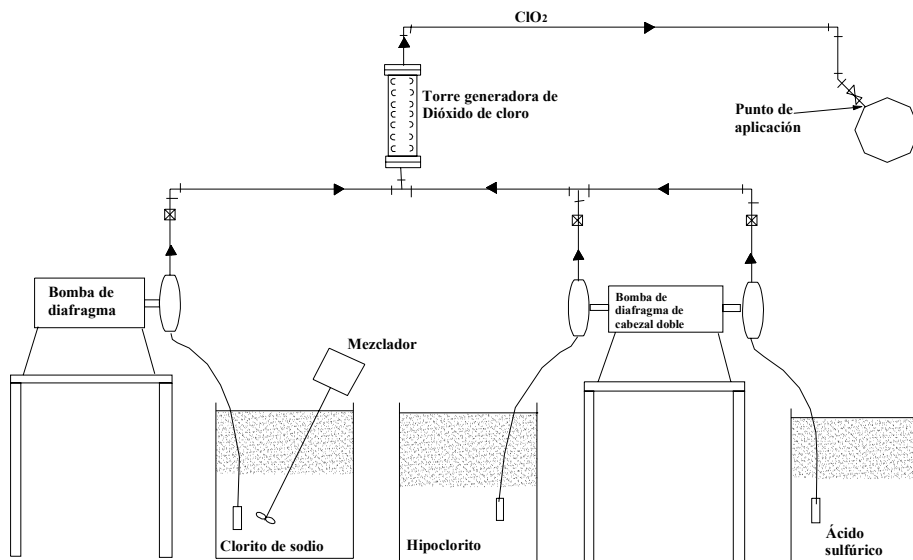
El caudal de agua tratada por la estación de dióxido de cloro se rige por el grado de concentración de la solución de cloro. La concentración máxima posible bajo condiciones hidráulicas ideales alcanza las 5.000 ppm. Mientras que el límite inferior es 500 ppm, para producir la reacción necesaria.



Generador de dióxido de cloro (sistema de dos componentes)



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



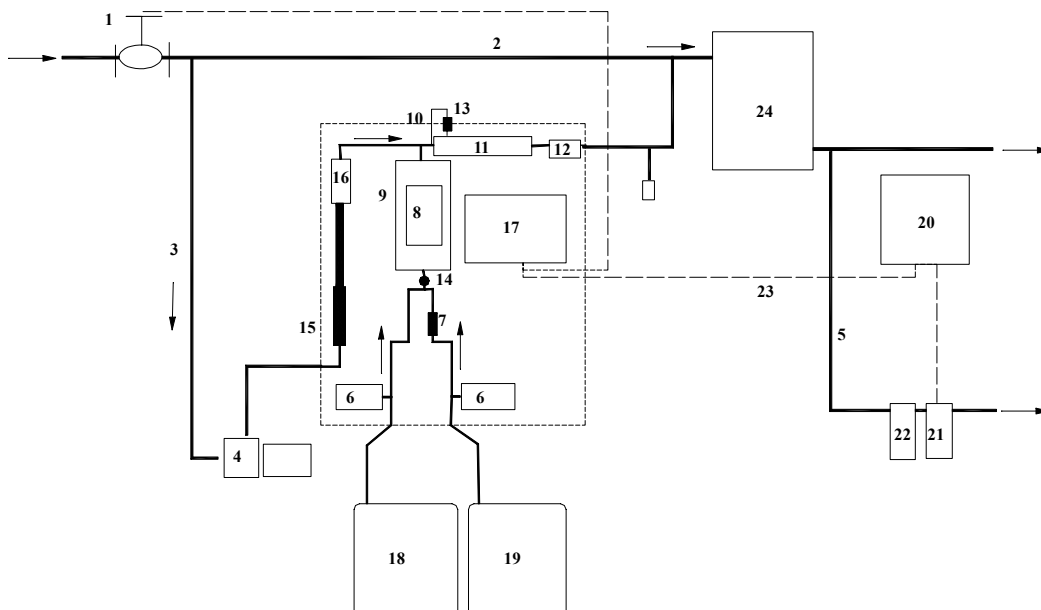
Generador de ClO_2 (sistema de tres componentes)

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

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

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

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



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

<p>Donde:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Ingreso de agua 2. Tubería principal 3. Derivación para el sistema de desinfección 4. Bomba de refuerzo 5. Tubería de derivación para monitoreo. 6. Bombas dosificadoras 7. Sensor de flujo 8. Reactor 9. Soporte del reactor 10. Válvula dosificadora (sensible a la presión) 11. Mezclador 12. Válvula de retención 	<ol style="list-style-type: none"> 13. Válvula de ventilación 14. Dispositivo de succión 15. Esqueleto de sostén del equipo 16. Válvula anti-retorno 17. Dispositivo de control del nivel de producción 18. Envase de seguridad de ácido 19. Envase de seguridad de clorito 20. Medidor de dióxido de cloro suministrado 21. Probeta de dióxido de cloro 22. Controlador de nivel de agua 23. Conector 24. Cámara de contacto (10 – 15 minutos)
---	---



Equipo pequeño para bajo caudal

➤ **Instalación y requerimientos**

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

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

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

Operación y mantenimiento

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

Monitoreo

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

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

Ventajas y desventajas del método

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

Costos

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

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

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

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

Fuentes de información

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

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

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

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