

DESINFECCIÓN Y MÉTODOS DE DESINFECCIÓN DEL AGUA

5.0 ANTECEDENTES:

En el agua y en el medio ambiente siempre están presentes los microorganismos y de los miles de familias y variedades de ellos, la gran mayoría no son nocivos al hombre y a los seres vivos, inclusive convivimos con ellos y son parte de los procesos de la vida.

Por ejemplo los seres vivos como los omnívoros, o los ruminantes, requerimos de un cierto tipo y cantidad de microbios en nuestro sistema digestivo, ya que éstos se encargan de desdoblar azúcares, proteínas, celulosa y demás alimentos, para que los organismos superiores puedan digerir estas sustancias y así obtener la energía necesaria para caminar, respirar o sea para vivir.

También, la biotecnología microbiana es una ciencia que aprovecha la capacidad que tienen los microorganismos, para realizar cambios químicos que el hombre aún no sabe realizar sin la ayuda de estos agentes, por ejemplo: la fermentación de productos lácteos para producir sus derivados, en la destrucción de compuestos residuales no deseados como derivados del petróleo y gasolinas, en la elaboración de: vinos, licores, cerveza, vinagre y muchos otros derivados.

Algunos de ellos y solo unos cuantos, son nocivos al hombre y seres vivos, pudiendo causar morbilidad e incluso la muerte.

Organismos nocivos o patógenos son de tipo viral y no viral. Algunos agentes virales son transmisores de enfermedades y pueden o no pueden sobrevivir en el agua. Si no son capaces de hacerlo, el agua no es vehículo de contaminación de estos agentes: por ejemplo el virus del SIDA no sobrevive ni se reproduce en el agua, por lo que afortunadamente, este tipo de agentes infecciosos no se encuentran en las aguas residuales o altamente contaminadas.

Otro tipo de microorganismos no son de tipo viral. Estas son las bacterias, las cuales pueden ser unicelulares o multicelulares. Difieren de los virus, en que son capaces de reproducirse y efectuar todas las funciones vitales por sí mismas, a diferencia de los virus, los cuales deben de penetrar en la pared celular del microorganismo y aprovecharse de estos para vivir y reproducirse.

Algunos ejemplos de bacterias son: la vibrio colerae, causante del cólera, la escherichia coli, causante de disenteria y otras mas como las que se presentan en la Tabla II.

Los microorganismos patógenos o causantes de enfermedades son llamados agentes infecciosos para distinguirlos de los que no lo son. Los agentes infecciosos pueden ser transmitidos al hombre y seres vivos por vehículos como aire y alimentos pero el más común es el agua que se consume como agua de beber.

Durante siglos y antes de los descubrimientos en microbiología, especialmente los estudios de Kock y Pasteur, debido a que se desconocían las causas y por las pésimas condiciones de higiene, las plagas infecciosas arrasaban con poblaciones enteras en Europa.

Una vez demostrado que los microorganismos son la causa de las terribles enfermedades que causaban tantas muertes, se buscó la manera de evitar o disminuir la incidencia de contaminación de las aguas potables y sus fuentes, dando inicio a la ciencia de la higiene.

Uno de los primeros tratamientos implementados para tratar de evitar las enfermedades infecciosas transmitidas por el agua fue la sedimentación y filtración, que disminuyen la carga microbiana pero no garantizan la desinfección total.

En 1850 John Snow después de un ataque de cólera en Londres, implementó un sistema de desinfección por cloro para una fuente de abastecimiento en esta ciudad.

Sims Woodhead en 1897 con los antecedentes de Snow y tratando de dar alivio a una epidemia de tifoidea en Kent Inglaterra, también empleó cloro líquido para aliviar los estragos de la enfermedad.

Lo éxitos de estas experiencias hicieron que en Inglaterra se empleara la cloración como una medida preventiva de contaminación microbiológica del agua y posteriormente en 1908 en New Jersey en Estados Unidos se implementó la cloración como un proceso de tratamiento en la potabilización del agua, y se hizo evidente la disminución de incidencia de enfermedades infecciosas en los consumidores. En años posteriores se generalizó la desinfección del agua con cloro y sus derivados en todo el país y finalmente en todo el mundo.

DESINFECCIÓN DEL AGUA: La desinfección del agua se refiere a la inactivación de los microorganismos especialmente los patógenos que son causantes de enfermedades, que pueden causar

daños en los consumidores de agua, y cuya intensidad y gravedad varía dependiendo de muchos factores entre ellos: edad y condición física de la persona infectada, así como del tipo de microorganismo causante de la enfermedad y de la intensidad o concentración en el agua del agente infeccioso.

La desinfección es tal vez el tratamiento más importante y de mayor trascendencia en la potabilización del agua.

Aunque en países que cuentan con una buena infraestructura en sanidad y tratamiento de aguas son muy esporádicos los casos de brotes infecciosos por consumo de aguas infectadas, en los países subdesarrollados las tasas de morbilidad y mortandad por aguas contaminadas con microorganismos patógenos son aun muy altas y causan millones de victimas cada año.

5.1 MÉTODOS DE DESINFECCIÓN:

La desinfección del agua puede llevarse a efecto por diferentes procesos: (1) con agentes químicos; (2) con medios físicos.

Cada uno de ellos tiene sus ventajas y sus desventajas y se emplean uno u otro método según sean las circunstancias

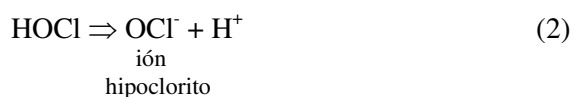
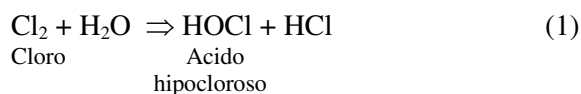
Tabla I: Sistemas y métodos de desinfección químicos y físicos

<i>Métodos químicos</i>	<i>Comentarios</i>	<i>Ejemplos</i>
Cloro y sus derivados	Los mas empleados, tiene efecto residual	Compuestos de cloro, cloro gaseoso, dióxido de cloro
Bromo y derivados	Ocasionalmente se emplea	Bromo, óxidos de bromo
Yodo y derivados	Raras veces empleado	Yodo, hipoyodatos, yodatos
Peroxido de hidrogeno	Es una opción a la desinfección con cloro	Peroxido de hidrógeno
Sales metálicas	Se emplea para desinfectar alimentos, raras veces para desinfección de agua	Cobre, plata
Ácidos y Alcalis	Se emplea en procesos tales como proceso cal/soda ash y en reciclado de aguas	Cal, hidróxido de sodio, ácido sulfúrico, ácido clorhídrico
Ozono	Después de la cloración es el método de desinfección mas frecuentemente empleado	gas ozono generado in situ
<i>Métodos Físicos</i>	<i>Comentarios</i>	
Radiación Ultravioleta	Producida por lámparas que emiten radiación con una frecuencia de 254 nm	
Calor	Sistema muy empleado en procesos de pasteurización o en desinfección casera	
Radiación gamma	Solo se emplea para esterilización de equipo, no para desinfección de aguas.	

5.2 DESINFECCIÓN POR CLORO Y DERIVADOS:

El cloro y sus derivados son por mucho los agentes desinfectantes que más se emplean en el mundo. Es posible emplear compuestos tales como: el cloro gas, el hipoclorito de sodio, el hipoclorito de calcio o compuestos organoclorados como el ácido tricloroisocianurico (cloro 90). Eventualmente todos ellos producen el ácido hipocloroso HClO y el ión hipoclorito ClO⁻ que son los agentes activos, y su efectividad depende de la cantidad de estos componentes que el compuesto clorado forme al estar en solución acuosa. Con frecuencia y así lo será en este texto, la cloración se refiere a la adición de algún componente clorado que produzca el agente activo, independientemente de la sal o compuesto de donde provenga.

El cloro gaseoso Cl₂ en contacto con el agua reacciona de la siguiente manera:



En el caso de una sal de hipoclorito, como es el caso del hipoclorito de sodio, la reacción es la siguiente:



Con el hipoclorito de calcio ocurre la reacción (4)



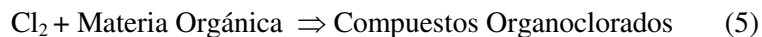
En ambos casos, el ácido hipocloroso HOCl formado por la hidrólisis del hipoclorito de sodio o por el hipoclorito de calcio, se disocia a iones hidrogeno y ión hipoclorito de acuerdo a la reacción 2

Por su alto poder oxidante, el cloro empleado en la desinfección causa daños irreversibles al entrar en contacto con las células microbianas, lo cual modifica y destruye la pared celular y el DNA de los microorganismos impidiendo su reproducción.

REACCIONES DEL CLORO CON COMPONENTES DEL AGUA: El cloro cuando genera hipoclorito y ácido hipocloroso no solo reacciona con las células microbianas. Es un agente químico sumamente activo y reacciona con el material orgánico y con otras especies químicas que se encuentran presentes en el agua a desinfectar.

Si hay iones metálicos como Hierro Fe(II) y Manganese (II), es capaz de modificarlos a estados superiores de oxidación como Fe(III) y Mn(VII).

También destruye materia orgánica formando compuestos organoclorados:



Con el ácido sulfhídrico produce azufre elemental



Algunas de estas reacciones son deseables como la 6, ya que de esta manera es posible eliminar el ácido sulfhídrico de intenso olor desagradable, que se encuentra disuelto en algunas aguas naturales.

También la oxidación y precipitación de hierro y manganeso es empleada cuando los niveles de estos elementos causan problemas en la calidad del agua.

La formación de organoclorados cuando hay presente materia orgánica en el agua, es uno de los principales argumentos para los que no están de acuerdo en que la cloración es la mejor forma de desinfectar el agua.

La presencia de trihalometanos como el cloroformo, CCl₄, el tricloro metano CHCl₃, el dicloro, bromo, metano CHCl₂Br y otros mas puede ser detectada en aguas que han sido desinfectadas por este medio. Son cantidades mínimas al nivel de partes por billón, pero aún así son motivo de preocupación y controversia ya que cuando estos compuestos se dosifican de manera frecuente en cantidades apreciables a animales de laboratorio, desarrollan tumores cancerosos y esta es la causa de tal preocupación.

La forma en que se puede minimizar la formación de organoclorados será discutida posteriormente, pero por ahora es suficiente decir que la dosis de cloro no solo debe ser suficiente para desinfectar el agua, sino también para proporcionar la cantidad necesaria para las reacciones químicas como las que se han ejemplificado anteriormente.

5.3 CLORACIÓN A PUNTO DE CORTE O PUNTO DE INFLEXIÓN:

Si se dosifican cantidades variables de cloro al agua, típicamente se obtiene una grafica como la mostrada en la figura 1.

En esta se observa que a medida que se agrega cloro la concentración aumenta, pero posteriormente la cantidad de cloro residual o cloro disponible disminuye a medida que la dosificación se incrementa.

Se alcanza después de una dosis determinada un punto de corte (break point) o punto de inflexión, después del cual si se sigue agregando cloro la cantidad de cloro residual nuevamente se incrementa y ya después de este punto de inflexión es posible tener una concentración de cloro residual, proporcional a la cantidad agregada.

La explicación a esta conducta observada en las aguas que se desinfectan con cloro, es que inicialmente el cloro reacciona con la materia orgánica, los metales que se oxidan, el amoníaco presente, o reacciones similares a las que se han ejemplificado.

Cuando todo el material y componentes han reaccionado, el cloro agregado ya no forma otros compuestos y es posible alcanzar el cloro residual deseado, determinando de esta manera la dosis de cloro que requiere esa muestra de agua en particular,

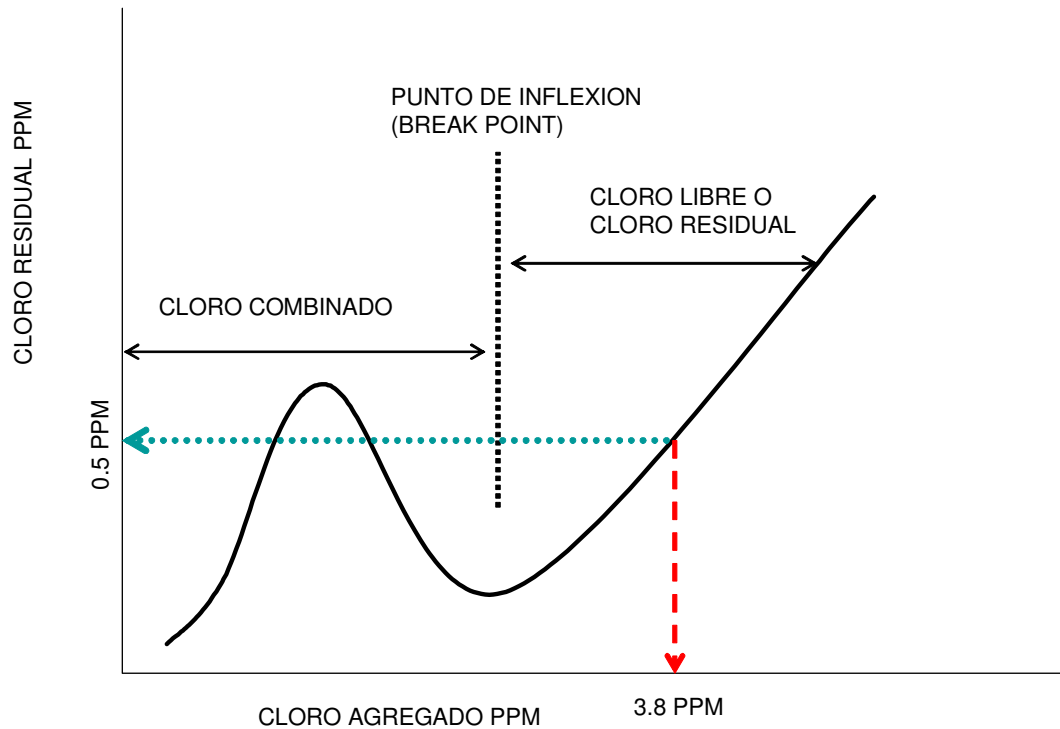


Figura 1: Gráfico de consumo de cloro por reacciones secundarias. Después del punto de inflexión la concentración de cloro detectada es el cloro libre o residual.

En nuestro ejemplo la dosis requerida es de 3.8 ppm. El cloro libre o residual es de 0.5 ppm y el cloro combinado es de $3.8 - 0.5 = 3.2$ ppm

La primera dosis de cloro agregado (3.2 ppm) reacciona con componentes del agua y se le llama cloro combinado. La concentración de cloro después del punto de inflexión (break point) es el cloro libre o cloro residual.

5.4 FACTORES QUE AFECTAN LA EFICIENCIA DE UN DESINFECTANTE QUÍMICO:

La eficiencia de los desinfectantes químicos está en función de parámetros tales como:

1: **TIEMPO DE CONTACTO:** Una de las variables más importantes en el mecanismo de desinfección es el tiempo de contacto. Ha sido observado que mientras mayor sea el tiempo de contacto mayor es la efectividad del desinfectante.

La Tabla II muestra los efectos de el cloro en una concentración de cloro residual de 0.5 ppm como cloro libre a un pH de 7.5 y una temperatura de 25°C.

De acuerdo a los resultados presentados en la tabla II, la dosis de cloro es letal para la mayoría de los microorganismos cuando el tiempo de contacto es de minutos y aún de segundos.

Los microorganismos que forman esporas y quistes son muy resistentes al cloro y requieren de mayor tiempo de contacto y/o mayores dosis de cloro a una temperatura determinada a un pH específico.

2: **CONCENTRACIÓN Y TIPO DE BACTERICIDA:** La concentración del desinfectante junto con el tiempo de exposición, son los factores más importantes en el efecto bactericida. A mayor concentración mayor es el poder bactericida, aunque se llega a un límite en el cual el efecto bactericida permanece constante aún cuando se incremente la concentración del agente biocida.

También el efecto bactericida es dependiente de la sustancia empleada; por ejemplo, entre los oxidantes: cloro, bromo y yodo, se observa una relación directa entre efectividad bactericida y potencial de oxidación de la sustancia.

Tabla II: Efectividad del cloro como desinfectante

<i>Tiempo requerido para inactivación de los siguientes microorganismos en las condiciones descritas</i>	
Concentración de Cloro: 0.5 ppm	pH: 7.5 Temperatura 25°C
<i>BACTERIA</i>	<i>ENFERMEDAD: TIEMPO DE CONTACTO</i>
Escherichia Coli	Cistitis del tracto urinario: 50 segundos
Salmonela Tifosa P-4	Fiebre Tifoidea/Gastroenteritis: 60 segundos
Salmonela Tifosa P-5	Fiebre Tifoidea/Gastroenteritis: 60 segundos
Salmonela Tifosa P-10	Fiebre Tifoidea/Gastroenteritis: 60 segundos
Salmonela Paratifo P-2	Fiebre Paratifoidea: 1 minuto
Salmonela Schottmuelleri P-3	Fiebre Paratifoidea: 2 minutos
Shigella Flexneri P-7	Paradisentería: 2 minutos
Shigella Disentariae	Disentería/Ulceras intestinales: 2 minutos
Estreptococos Fecalis E-40	Puede ser patógena: 2 minutos
Estafilococos Aureus	Septicemia/Abscesos Cerebrales/Enteritis minuto
Polivirus Tipo 1 (*)	Polio: 9 minutos
Entamoeba Histolitica (!)	Disentería Aguda: 30 minutos

(*)Virus (!)Quiste

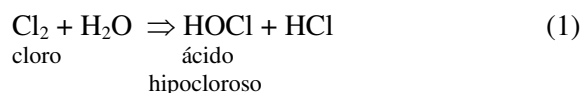
3: **TEMPERATURA:** La temperatura también es factor de importancia en la efectividad germicida; a mayor temperatura mayor efectividad de la sustancia bactericida.

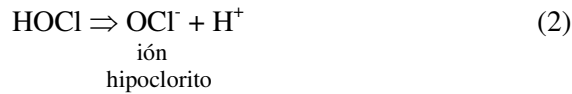
4: **NUMERO DE MICROORGANISMOS:** Otro factor a considerar en el proceso de desinfección, es la población de microorganismos. Mientras mayor sea el número de microorganismos a destruir mayor es el tiempo de contacto requerido y/o la concentración del bactericida empleado.

5: **TIPO DE MICROORGANISMOS:** Algunas bacterias mueren fácilmente en contacto con el agente bactericida; otros son altamente resistentes y requieren de una acción mas intensa. Los microorganismos que producen esporas, son especialmente resistentes a la acción bactericida y solo son destruidos por efectos caloríficos, o por una larga e intensa exposición a algún agente físico o químico.

6: **NATURALEZA DEL LÍQUIDO SUSPENDIDO:** El medio en que se encuentran los microorganismos es factor importante para la efectividad bactericida. En aguas turbias, en presencia de partículas coloidales, la efectividad bactericida disminuye. Esto se debe a que el microorganismo puede cubrirse al encapsularse entre las partículas de material suspendido, evitando así el contacto directo con el agente bactericida, sobreviviendo a su acción.

7: **pH DEL LIQUIDO SUSPENDIDO:** El pH es determinante en reacciones similares a las que ocurren con el cloro al formar los derivados activos el HOCl y ClO⁻, reacciones 1 y 2.





Como el HOCl es de 40 a 80 veces más potente como desinfectante que el ión hipoclorito ClO^- , el efecto bactericida del cloro también está en función del pH del agua.

El ácido hipocloroso es un ácido débil, por lo que la reacción de disociación es afectada por la concentración de iones hidronio en el agua (pH del agua).

Si la concentración de iones H^+ es baja, la reacción se favorece en el sentido directo, esto es la tendencia es a formar ión hipoclorito ClO^- . A concentraciones relativamente altas de iones H^+ , la reacción se ve favorecida en sentido inverso o de derecha a izquierda, inhibiendo la disociación del ácido.

Como el ácido hipocloroso tiene un potencial de oxidación mayor que el del ión hipoclorito, la eficiencia bactericida es mayor a bajos valores de pH, cuando la especie más oxidante HOCl predomina, por lo que a menor pH, mayor eficiencia en la desinfección.

Una forma de predecir la eficiencia de un agente bactericida es con la relación $\epsilon = CT$, donde ϵ es la efectividad de inactivación de un microorganismo determinado, a un pH y a una temperatura específica. C es la concentración de cloro libre (el cloro residual después de alcanzar el punto de inflexión o break point), y T es el tiempo en minutos.

La eficiencia se mide como porcentaje y se expresa como logaritmo: por ejemplo, si la eficiencia en inactivación de un microorganismo es 99.9 % entonces se expresa como 3-log. Si la eficiencia en remoción es 4-log entonces se tiene un 99.99% de eficiencia.

Una regla establecida, es que si un agua de fuentes naturales se va a desinfectar después de tener un proceso previo de remoción de sólidos suspendidos y de turbidez por sedimentación y/o filtración, el valor de ϵ , o CT para tener una eficiencia de 3-log (99.9%) deberá ser igual o mayor a 20. $CT \geq 20$

Ejemplo: Un agua que se va a potabilizar será retenida en el tanque de cloración durante 30 minutos. Cual deberá ser la concentración de cloro residual para tener una eficiencia de 3-log en remoción de agentes microbianos?

$CT = 20$ y $T = 20$ minutos, entonces C la concentración de cloro residual libre deberá ser igual o mayor de $20/25 = 0.8$ mg/L

5.5 LA PRÁCTICA DE LA CLORACIÓN:

La desinfección con cloro y agentes clorados es la forma más frecuente de desinfección de aguas por medios químicos. Los halógenos como el yodo, el bromo y sus derivados también ocasionalmente se emplean, pero la mayor efectividad del cloro respecto a estos como bactericida y el menor costo del cloro y derivados, así como su disponibilidad lo hacen más atractivo en su uso.

Otros agentes químicos como las sales de plata solo se emplean para desinfección de frutas y verduras o para desinfección en casos de emergencia.

Los ácidos y álcalis cambian drásticamente las características del agua y por razones obvias no se usan en la práctica común, solo en casos especiales como por ejemplo, en el tratamiento de aguas residuales se sube el pH con un álcali para favorecer ciertas reacciones de precipitación de metales indeseables y al mismo tiempo se destruyen microorganismos y se disminuye la carga microbiana para los siguientes etapas de tratamiento del agua residual tratada, este proceso es el llamado proceso cal/soda ash. Cuando se alcanzan altos valores de pH es necesario regresar el agua a su condición original, neutralizando con un ácido o con bióxido de carbono.

En la desinfección por cloro se emplean los siguientes agentes:

1: CLORO GASEOSO Cl_2 ; El cloro gas cuando entra en contacto con el agua se disocia y produce ácido hipocloroso y posteriormente ión hipoclorito tal y como se tiene en las reacciones 1 y 2.

La forma más económica de clorar el agua es empleando gas cloro como germicida. Las plantas de tratamiento municipales y particulares que manejan grandes volúmenes de agua, emplean este compuesto por su menor costo en desinfección.

La forma de dosificar el cloro gaseoso es por medio de un diafragma de control que inyecta en forma regulada el gas que se evapora del tanque. Una bomba de alta presión bombea agua por una tubería que

tiene un venturi y se crea un vacío que succiona el gas cloro que se evapora del tanque, mezclándolo con el agua que se va a desinfectar.

La desventaja del uso del cloro es que se requiere de grandes tanques para su almacenamiento y traslado. La alta toxicidad del gas causa daños a niveles de concentraciones en el aire tan bajos como 0.1 ppm, por lo que es necesario el manejo de este producto solo con equipos especiales, con programas de salvamento y contingencias debidamente establecidos por personal capacitado.

De todos los derivados del cloro, el cloro gas es el método de desinfección mas empleado por su bajo costo y su alta eficiencia, lo cual lo hace la mejor opción, principalmente donde se desinfectan grandes volúmenes de agua como es en plantas potabilizadoras urbanas y plantas de tratamiento de aguas residuales.

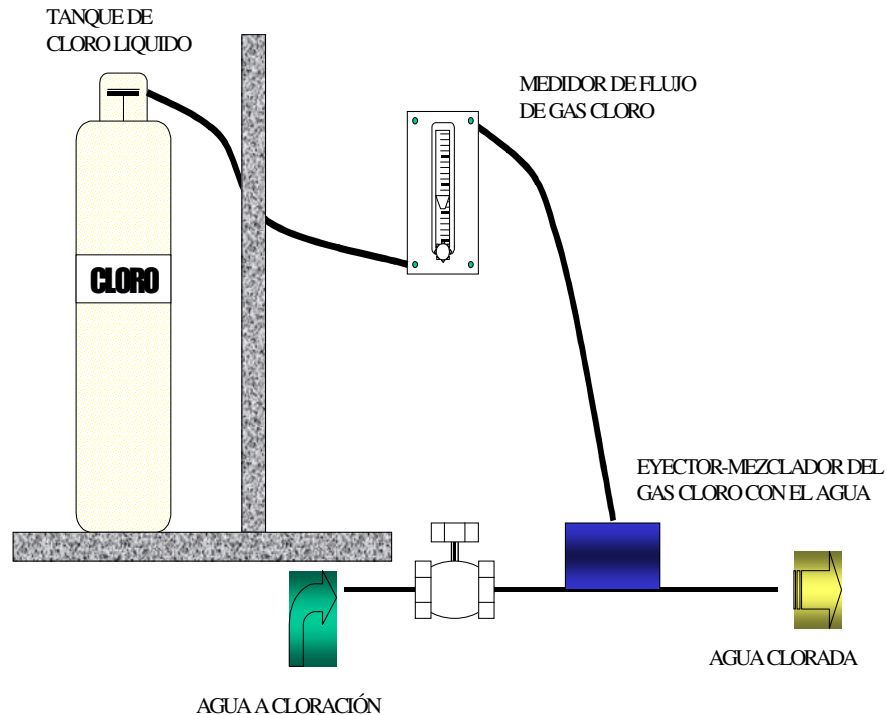


Figura 2: Desinfección por adición de cloro en forma de gas. El tanque de cloro está físicamente separado por el peligro en el manejo de este gas.

2: HIPOCLORITO DE SODIO NaOCl : Este se presenta en forma de un líquido que es altamente corrosivo. Se obtiene al burbujear gas cloro en una solución altamente concentrada en hidróxido de sodio, donde el cloro es muy soluble. La cantidad de cloro en una solución comercial de este tipo es de un 12 a un 15% en porcentaje en peso de cloro activo.

La dosificación del cloro líquido se hace por medio de una bomba construida con materiales especiales resistentes a la corrosión en las partes en que se tiene contacto directo con el hipoclorito de sodio concentrado. El tipo de bomba mas empleada es la bomba peristáltica, la cual por medio de pulsos inyecta la solución de cloro y ésta bomba está coordinada con algún controlador que mide la cantidad de cloro residual y de acuerdo a la dosis de cloro residual deseada, esta bomba enciende o apaga según sea requerido.

El uso del hipoclorito de sodio es una forma muy conveniente y muy frecuentemente empleada para dosificación de cloro en fuentes pequeñas de suministro de agua potable. Si el volumen de agua a consumir no es muy grande, se prefiere emplear esta forma de cloración.

El costo de desinfección del mismo volumen de agua es mucho mayor si se emplea hipoclorito de sodio que gas cloro, pero la facilidad de manejo del reactivo líquido, la disponibilidad del producto así como de

partes y accesorios del equipo de dosificación, es lo que hacen muy conveniente el uso de este agente de desinfección.

3: HIPOCLORITO DE CALCIO $\text{Ca}(\text{OCl})_2$: El hipoclorito de calcio es una de las formas en las cuales el cloro se encuentra como producto sólido. Para su empleo debe disolverse en agua, dónde es muy soluble, y así es posible agregar la solución resultante empleando una bomba peristáltica, de manera similar a como se hace con el hipoclorito de sodio.

También es posible agregar este reactivo por medio de un clorador o dosificador de pastillas. En este tipo de dosificadores una fracción del volumen de agua a desinfectar pasa por el clorador y entra en contacto con las pastillas. Se forma una solución de hipoclorito de calcio que se inyecta a la corriente de agua que fluye y el control de dosificación de cloro se efectúa por medio de válvulas del clorador de pastillas.

Este tipo de cloradores son útiles y muy empleados para comunidades rurales y zonas marginadas donde no se cuenta con energía eléctrica, ya que no requieren de bomba para control de la dosis de cloro para desinfección del agua.

No solo se puede emplear hipoclorito de calcio como agente sólido de cloro activo. Otro producto muy empleado es el ácido tricloroisocianurico o cloro 90 que tiene como ventajas el ser mas fácil el control de su dosificación por ser menos soluble que el hipoclorito de calcio y la mayor aportación de cloro activo ya que éste contiene en porcentaje en peso un 90% de cloro activo, mientras que el hipoclorito de calcio contiene un 65% aproximadamente.

4. DESINFECCIÓN CON DIÓXIDO DE CLORO ClO_2 : El dióxido de cloro es otro compuesto empleado en desinfección y que tiene ciertas ventajas. Este compuesto es un gas muy inestable y para emplearse tiene que generarse in situ, lo cual se hace haciendo reaccionar clorito de sodio NaClO_2 con gas cloro o con hipoclorito de sodio en medio ácido

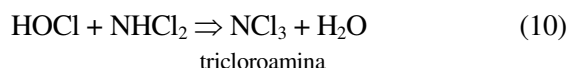
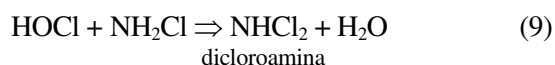
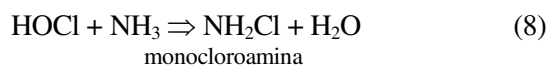


En esta reacción se produce dióxido de cloro acuoso con una concentración de cloro libre de un 5% aproximadamente, la cual se inyecta de manera convencional y similar a como se dosifica el hipoclorito de sodio.

La ventaja de este desinfectante es que su efectividad es independiente del valor del pH de la solución o agua a desinfectar y además no produce trihalometanos en concentraciones apreciables como sí ocurre con el cloro y sus derivados.

Por lo complicado en su producción y su manejo, no es muy empleado aunque en algunas circunstancias es una buena opción.

5.0 DESINFECCIÓN CON CLOROAMINAS: La formación de cloroaminas ocurre cuando se hace reaccionar gas cloro con gas amoníaco en agua y ocurren las reacciones siguientes:



Dependiendo de factores tales como concentración de cloro y amoníaco, así como pH del agua, se forman preferentemente una u otra especie, siendo las más abundantes las monocloroaminas. La práctica de formar cloroaminas en el agua tiene sus ventajas y sus desventajas.

Las ventajas de la cloroaminación es que las cloroaminas son mas persistentes químicamente, por lo que su efecto residual es mas prolongado y la protección microbiológica del agua es mas efectiva, por lo que si

el agua se almacena en tanques antes de su consumo, está más expuesta al desarrollo microbiano y las cloroaminas protegen la calidad del agua más efectivamente que cuando se hace la desinfección con cloro. Las monocloroaminas no producen trihalometanos ya que el cloro preferentemente reacciona con el amoníaco y no con la materia orgánica. También algunos consumidores consideran que el sabor del agua se mejora al emplear las cloroaminas.

Una de las principales desventajas de la práctica de la cloroaminación es que estos compuestos al ser más persistentes son más tóxicos a los seres vivos, especialmente a las especies acuáticas.

La presencia de cloroaminas en el agua empleada en pacientes de diálisis por ejemplo, causan complicaciones y deterioro en la salud de estos, por lo que existen regulaciones para garantizar la ausencia de cloroaminas en el agua de usos médicos.

El gasto en consumo de reactivos es mayor en la cloroaminación ya que se emplean dos gases y obviamente el costo de inversión de operación y de personal capacitado es mayor.

Fuera de Estados Unidos, Canadá y parte de Europa que sí tienen recursos para uso de la cloroaminación, en otros países, por ejemplo, en Latinoamérica, esta práctica de hecho no existe.

5.6 TRIHALOMETANOS Y PRODUCTOS DE DESINFECCIÓN:

La acción de los desinfectantes además de oxidar y destruir la pared celular de los microorganismos, implica una reacción química secundaria con los demás componentes del agua, que como ya hemos mencionado, conducen a la oxidación de metales y otros compuestos que el agua pueda contener.

Las aguas residuales contienen una cantidad de materia orgánica relativamente grande, comparada con las aguas potables y el cloro, sus derivados y el ozono reaccionan con esta materia formando otro tipo de compuestos que se les llama subproductos de desinfección (en inglés: DBP Disinfection By Products).

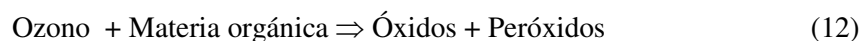
Se han identificado a través de finas técnicas de cromatografía de gases y de líquidos la presencia de compuestos como: diclorometano CHCl_2 , cloroformo CCl_4 , dicloro dibromo metano CBr_2Cl_2 y otros compuestos más que por su composición de uno o más halógenos y un átomo de carbono, se les llama en forma conjunta Trihalometanos (THM).

Además de los THM, se han detectado otros haloácidos que se forman al reaccionar la materia orgánica presente en el agua con el cloro y derivados (Bromocloroacetitrilo, Dibromoacetitrilo, Dicloroacetitrilo, Tricloroacetitrilo, entre otros)

La reacción de formación de estos subproductos podría representarse de una manera general por la ecuación 11



Esta reacción de formación de otros productos, no es exclusiva de la cloración. Si se desinfecta con ozono también aparecen productos de desinfección como los óxidos y peróxidos (formaldehído, acetaldehído, paraldehído, etc.) que resultan de la reacción química entre el ozono y la materia orgánica y que también son tóxicos.



Por razones históricas o por la mayor evidencia de la toxicidad de los trihalometanos que son cancerígenos en experimentos con animales de laboratorio cuando se les suministran altas dosis de estos biproductos de desinfección, ha hecho de la cloración y la consecuente formación de THM la principal causa de objeciones para la desinfección por cloro y sus derivados.

Las grandes ventajas de la cloración que son: facilidad de la práctica, versatilidad de la misma, bajo costo, disponibilidad de equipos para desinfección y de compuestos clorados, además de otras muchas ventajas, hacen que esta práctica sea la más empleada no solo en países de medio y bajo desarrollo sino también en los que disponen de alta tecnología y mayores recursos.

CONTROL DE TRIHALOMETANOS: Si es inevitable la formación de THM en la cloración, es posible disminuir la cantidad formada de estos con dos acciones preventivas: agregando solo la dosis de cloro

requerida, pero esencialmente disminuyendo la cantidad de materia orgánica presente en el agua a desinfectar, ya que si el cloro o derivados no tiene este material orgánico la reacción 11 no procede.

Para evitar la presencia de materia orgánica el agua debe estar muy bien filtrada, preferentemente con filtros capaces de retener partículas de tamaño coloidal.

Otra forma de controlar muy efectivamente la presencia de THM en el agua potable es con el uso del carbón activado. Los filtros de este tipo han probado ser muy eficientes en remover no solo cloro residual en el agua sino también los THM.

5.7 EQUIPOS DOSIFICADORES

DOSIFICACIÓN Y CONTROL DE DESINFECTANTES; La forma de dosificación el agente activo y el control en la dosificación de éste, es determinante en la operación de desinfección del agua. Si la dosis es demasiado alta, el consumidor rechaza el agua de consumo y también es mayor la tendencia a formar trihalometanos (THM). La alta dosificación puede causar problemas por reacciones secundarias con el producto por ejemplo cuando el agua se emplea en la elaboración de bebidas refrescantes, lácteas, jugos naturales, etc. además de un consumo de desinfectante mayor al requerido.

Una baja concentración del agente puede ser insuficiente para la desinfección, por lo que el control en la dosis y en la concentración del agente es indispensable en la desinfección de aguas.

DOSIFICACIÓN DE CLORO GASEOSO: El cloro en forma de gas es la forma mas común de desinfección en plantas con un muy alto volumen de producción. El desinfectante se compra de un proveedor o fabricante de cloro y en la planta se encuentra almacenado en tanques o depósitos que contienen cloro líquido. Como ya se ha mencionado, el uso de gas cloro implica riesgos y los accidentes de trabajo deben evitarse siguiendo estrictas normas de seguridad.

El gas cloro se evapora cuando se despresuriza, lo que ocurre cuando se abre la válvula del tanque y una vez que pasa de la fase líquida a la de vapor se inyecta a la tubería de agua que conduce el agua a tratar.

Se requiere de un eyector que consiste de un tubo venturi, el cual por efecto del flujo de agua a alta presión, produce vacío y el gas que se evapora desde la válvula de control del clorador es conducido al eyector y se difunde y mezcla con el agua.

El control y la dosis de cloro a agregar se hacen con un rotámetro con válvula que abre o cierra para que sea aspirado el cloro que se gasifica desde el tanque presurizado.

La cantidad de cloro que se inyecta es proporcional al flujo de agua y de esta manera se autorregula la dosificación, o también se puede integrar un sistema de monitoreo continuo de potencial de oxidorreducción (ORP) para control de la dosis de cloro gaseoso.

DOSIFICACIÓN DE DESINFECTANTE LÍQUIDO (HIPOCLORITO DE SODIO, DE CALCIO, DIÓXIDO DE CLORO, PEROXIDO DE HIDROGENO): La forma de controlar la dosificación de cloro, o de cualquier desinfectante líquido es por medio de una bomba de dosificación.

La bomba de dosificación que comúnmente se emplea es la de tipo peristáltico. En esta bomba la solución de cloro o peróxido se encuentra en un depósito y la bomba la extrae y la inyecta a la línea que conduce agua. Es posible ajustar el volumen de solución que se inyecta por lo que la dosificación se ajusta incrementando o disminuyendo la velocidad con que se inyecta la solución al agua que se desinfecta.

Esta bomba debe estar acoplada eléctricamente con la bomba que distribuye el flujo de agua de consumo. Si la bomba de distribución de agua enciende también enciende la bomba dosificadora. Si la bomba de distribución apaga, también lo hará la bomba de dosificación de reactivo.

En caso de no tener o no ser posible coordinar la bomba de distribución y la de dosificación, se deberá emplear un sistema de control como los que se describen mas adelante en la sección correspondiente.

CONTROLES DE DOSIFICACIÓN: Una forma de conocer la concentración de cloro o agente activo desinfectante es por medio de un análisis químico. Por ejemplo el cloro libre se puede medir con la reacción del cloro al DPD o a la ortotolidina, tal y como se describe en el apéndice.

La dosis se controla ajustando la velocidad de dosificación del desinfectante así como también con la concentración de la solución que se inyecta al agua a desinfectar.

Existen en el mercado equipos que toman la muestra de agua, la analizan y continuamente reportan un resultado de concentración de cloro.

La forma mas conveniente y practica de controlar y autoajustar la dosis de desinfectantes es midiendo el potencial de oxidorreducción (Oxidation Reduction Potential, ORP).

En el potencial de 760 mV correspondiente a 0.5 ppm de cloro
enciende la bomba y apaga en 823 mV equivalente a 1.5 ppm de cloro
Si el potencial esta entre 760 y 823 mV la bomba no opera

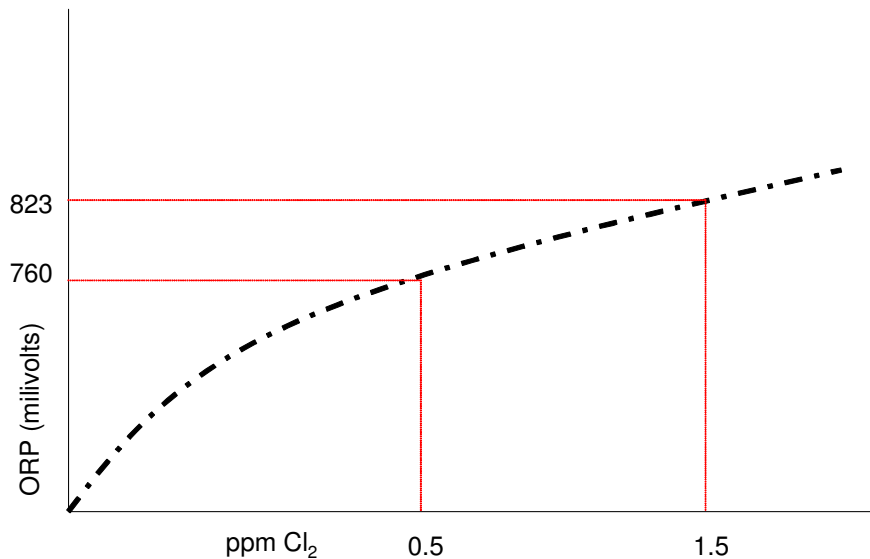


Figura 3: Potencial de Oxidoreduccion y concentración de cloro

Este concepto tiene como soporte el hecho de que un agente oxidante en agua altera una propiedad de esta que es el potencial de oxidorreducción. Este potencial se expresa en milivolts y puede medirse con un electrodo de oxidorreducción. La concentración de cloro o de otro oxidante como el peroxido de hidrogeno o el ozono, depende de la lectura en milivolts.

El electrodo de ORP se encuentra en contacto con el agua a desinfectar y continuamente lee el valor en milivolts del potencial del agua.

Si el voltaje disminuye de cierto valor limite la bomba de dosificación enciende y apaga una vez que se ha alcanzado el valor máximo superior que corresponde a una concentración determinada de desinfectante. Este tipo de controlador es el mas empleado por su costo relativamente bajo y por lo efectivo de sus resultados.

5.8 DECLORACIÓN DEL AGUA:

La desinfección de agua por cloro no solo inactiva microorganismos patógenos causantes de terribles enfermedades como: cólera, hepatitis A, hepatitis B y otras variantes, salmonelosis, fiebre tifoidea, etc., sino que además por su actividad química y su alto poder oxidante al reaccionar con otros componentes indeseables del agua mejora la calidad de ésta.

Mientras se tenga cloro activo el agua está desinfectada ya que los microorganismos no pueden sobrevivir en ese medio. Si el agua se desinfecta con cloro en una potabilizadora municipal, en su trayecto a los puntos de consumo tiene contacto con tuberías y equipos que no son estériles. Esto no es ningún problema si se tiene cloro residual, por lo que el usuario o consumidor puede tener confianza de la potabilidad del agua en lo que se refiere a calidad microbiológica.

Una vez que el cloro cumple su objetivo y el agua se va a consumir, el cloro residual ya no es deseable y se debe remover. Si el agua se consume como agua de beber, el sabor del cloro la hace objetable para la mayoría de los consumidores. En su empleo en la industria de bebidas y alimentos, por la posibilidad de

tener reacciones secundarias con el cloro residual y por el sabor mismo es indeseable y debe removerse del agua potable.

INDUSTRIA Y USO DOMESTICO: La forma mas común de declorar el agua es por contacto con carbón activado. Este es un método muy efectivo y fácil de operar.

Para usos industriales cuando el agua se va a emplear en el proceso de elaboración de algún producto o cuando se va a consumir de inmediato, se hace pasar por un tanque o depósito similar en su forma y en sus componentes a un filtro de medios granulares, el cual contiene carbón activado granular

La reacción es muy rápida y si se tiene un tiempo de mas de tres minutos de contacto del agua con el medio granular, la remoción de cloro es completa.

Para uso domestico y en restaurantes, cafeterías y sitios de bajo consumo, pueden emplearse pequeños filtros de carbón activado que realizan la misma función.

El carbón tiene un tiempo de vida finita y puede reactivarse térmicamente a altas temperaturas para emplearse de nuevo, pero lo mas común es reemplazar el carbón activado agotado.

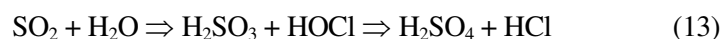
AGUAS RESIDUALES: El cloro es muy toxico para algunas especies vivientes en las concentraciones empleadas para desinfección del agua y existen regulaciones ambientales que no permiten desechar aguas cloradas al medio ambiente (ríos, lagos y lagunas), ya que dañan algunas especies acuáticas principalmente los peces.

Si hay la posibilidad de daños a especies acuáticas el agua deberá declorarse pero no es práctico hacerlo con carbón activado por su alto costo de inversión y mantenimiento y porque el agua vertida no tiene el mismo valor útil y económico que el agua potable.

Una forma de remover el cloro es por estancamiento del agua antes de verterla al receptor. El sol, el viento y los componentes presentes en el agua causan la pérdida del cloro por evaporación y por otras reacciones secundarias.

También es posible emplear medios químicos. La decloración se puede efectuar con dióxido de azufre SO_2 , o con otros compuestos sulfurados como sulfito de sodio Na_2SO_3 , bisulfito de sodio NaHSO_3 , metabisulfito de sodio $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$ y tiosulfato de sodio $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$.

De todos estos métodos, la decloración con dióxido de azufre es el mas extensamente empleado. El SO_2 reacciona con el cloro residual de la siguiente manera:



Con las cloroaminas:



Reacciones similares se llevan a cabo con las dicloro y tricloroaminas.

5.9 DESINFECCIÓN CON PEROXIDO DE HIDROGENO:

El peroxido de hidrogeno H_2O_2 es un compuesto muy similar al agua (oxido de hidrogeno) y que tiene propiedades altamente oxidantes, ya que su poder de oxidación es mayor al del cloro (Tabla III).

El uso del peróxido o agua oxigenada como también se le conoce, es muy extendido con fines curativos, ya que es muy eficiente en su desinfección y tiene la ventaja de no dejar residuos ya que se descompone en agua y oxígeno:



Una ventaja en la desinfección de agua es que no forma residuos halogenados precursores de los THM, pero su mucho mayor costo es una de las principales razones por las cuales no se emplea extensivamente en la desinfección de aguas potables.

También como el agente activo en la desinfección es el oxígeno generado en la reacción de descomposición del peróxido, este se pierde rápidamente y no tiene efecto residual, por lo que no es

conveniente emplearlo si el agua no se consume inmediatamente y se almacena para su posterior consumo.

Otra desventaja es el control de la dosis agregada, ya que la cuantificación de cloro libre residual es fácil de realizar pero no la de peróxido. En la industria de alimentos, en la fabricación de papel y otros procesos, se emplea con frecuencia este desinfectante por las ventajas que ofrece sobre el cloro.

Tabla III: Poder oxidante de algunos elementos y compuestos químicos.

<i>Oxidante</i>	<i>Potencial de Oxidación (volts)</i>
Flúor	3.0
Radical hidroxilo	2.8
Ozono	2.1
Peroxido de hidrogeno	1.8
Permanganato de potasio	1.7
Dióxido de cloro	1.5
Cloro	1.4

5.10 DESINFECCIÓN CON OZONO: OZONIZACIÓN

La desinfección por ozono merece atención especial, ya que es un método que se está difundiendo por sus grandes ventajas sobre otras opciones posibles.

Cuando se presenta una tormenta eléctrica y hay gran producción de rayos o relámpagos, por la alta concentración de cargas eléctricas en la atmósfera, también se produce ozono en el medio ambiente.

Esta molécula de ozono es sumamente reactiva, y tiene un potencial de oxidación mayor que el cloro (Tabla III) y sus derivados (ácido hipocloroso y ión hipoclorito), lo cual le confiere una gran actividad química.

El ozono, en forma similar a como ocurre con el cloro, destruye o inactiva las enzimas de los microorganismos y esa es la razón de su capacidad bactericida. También reacciona con sustancias de carácter orgánico e inorgánico presentes en el agua, con lo cual mejora la calidad del agua tratada, ya que los productos oxidados obtenidos generalmente no son objetables o al menos son menos indeseables que las sustancias originales contenidas en el agua.

Las desventajas del uso del ozono son principalmente que éste no tiene efecto residual, y su gran inestabilidad, que hacen necesario el producirlo en el mismo sitio de uso. Para esto se cuenta con equipos que producen ozono en cantidades desde grs/hora hasta Kilogramos/hora.

El sistema de producción de ozono mas elemental, consiste de una lámpara ultravioleta de alta intensidad que provoca la disociación de algunas de las moléculas de oxígeno que contiene el aire y los átomos de oxígeno producidos se combinan con las moléculas de oxígeno no disociado produciendo moléculas de ozono, como lo indican las reacciones (16) y (17)



Otra forma mas eficiente de producir ozono es a través de un generador de efecto corona, que consiste en someter un flujo de aire a el paso de una corriente de alto voltaje, lo cual genera ozono en grandes cantidades, de forma análoga a como ocurre en la atmósfera cargada de electricidad,

Estas moléculas de ozono son sumamente reactivas y se combinan fácilmente con material orgánico y celular, destruyendo de ésta manera las enzimas y coenzimas necesarias para la vida y supervivencia de los microorganismos presentes en el medio.

En este tipo de generadores se produce ozono y son los empleados para procesos donde se requiere de grandes volúmenes de ozono para la desinfección. También si en lugar de aire se alimenta oxígeno puro, la eficiencia en producción de ozono es mayor, y es lo convencional cuando la demanda de ozono es muy alta.

Como desinfectante el ozono es más eficiente que el cloro (Tabla III) y solo es necesario tener una concentración residual de ozono de 0.4 ppm para que se asegure la total desinfección del agua. Otra ventaja del ozono es que oxida más eficientemente que el cloro, elementos y componentes indeseables como: fierro, manganeso, color, ácido sulfhídrico, humus, etc.



GENERACION DE OZONO



Figura 4: Equipo industrial para producción de ozono y difusores de burbuja fina para inyección del aire rico en ozono.

La principal desventaja del ozono es su alto costo de inversión y servicio, así como lo complejo del equipo y de su operación. Continuamente se implementan sistemas de ozonización más baratos, sencillos y efectivos, y en la medida en que se tengan más bajos costos de inversión y mantenimiento y mejores resultados operativos, el uso del ozono como bactericida se verá cada vez más extendido.

LA OZONIZACIÓN EN LA PRÁCTICA: En la práctica el ozono que se genera, ya sea con lámpara UV o con efecto corona, se debe hacer llegar al agua a desinfectar o tratar. La forma más conveniente de ponerlo en contacto es a través de inyección del gas por medio de difusores o por inyección a través de un efecto venturi. En ambos casos, lo que se pretende es lograr la máxima transferencia del gas al líquido.

La Figura 4 muestra un equipo de ozono para producción de grandes cantidades de este gas, así como los difusores empleados para mezclar el aire rico en ozono con el agua a desinfectar.

5.11 DESINFECCIÓN POR RADIACIÓN ULTRAVIOLETA:

Desde 1901, fecha en que se inventó la lámpara de mercurio, la radiación ultravioleta ó UV, ha sido empleada como medio de desinfección.

La línea de emisión de 254 nm que emite intensamente esta lámpara es letal para las bacterias y virus, ya que este tipo de radiación daña irreversiblemente la estructura celular, al descomponer fotoquímicamente el ácido ribonucleico RNA y deoxiribonucleico DNA.

Su efectividad en cierto tipo de microorganismos no es tan efectiva como lo son el cloro y el ozono, ya que algunos microorganismos tipo quiste tienen una capa protectora que impide que la radiación UV tenga contacto con el tejido, pero estos microorganismos se pueden remover por microfiltración, por lo que siempre es conveniente una previa filtración si el agua se desinfecta por este método.

La forma en que se evalúa la eficiencia de un equipo de desinfección UV, es midiendo la cantidad de radiación por unidad de área que emite una lámpara. La cantidad mínima de intensidad de radiación para in

activación de virus y bacterias es de $10,000 \mu\text{watts}\cdot\text{seg}/\text{cm}^2$. Las lámparas nuevas emiten $32,000 \mu\text{watts}\cdot\text{seg}/\text{cm}^2$, pero cuando alcanzan un valor de $16,000 \mu\text{watts}\cdot\text{seg}/\text{cm}^2$ es recomendable cambiar la lámpara y reponerla por una nueva.

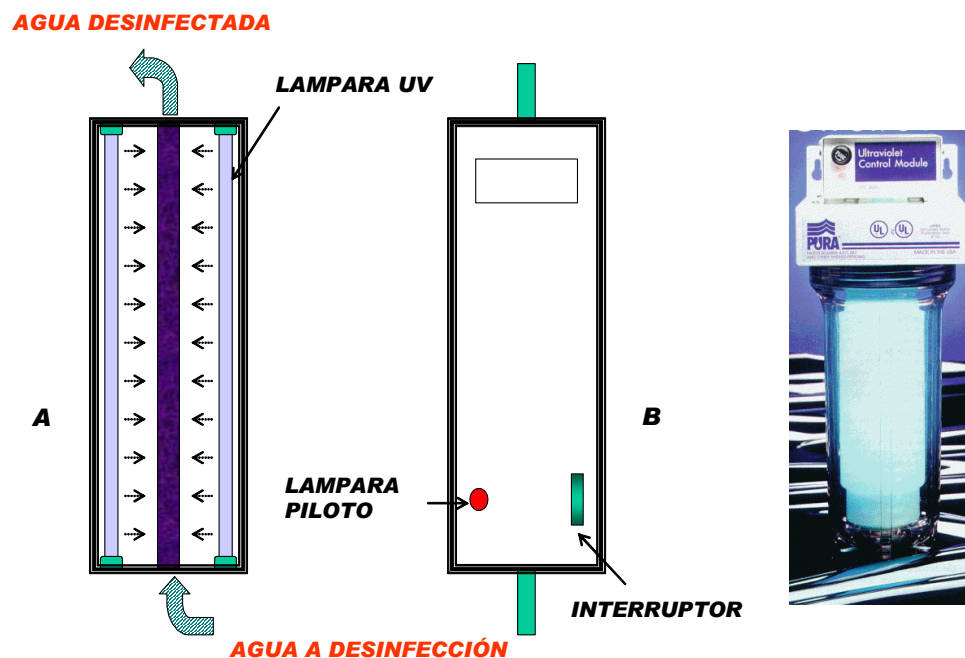


Figura 5: Lámpara UV mostrando detalles en A y con la cubierta protectora del sistema en B.

La vida normal de una lámpara de UV es de 6 meses a un año y aunque el filamento no se haya fundido es necesario efectuar el cambio de la misma.

La desinfección por radiación UV, a diferencia de lo que ocurre con el cloro y el ozono, no forma subproductos de reacción del oxidante con el material oxidado como son los trihalometanos formados en la cloración ó los peróxidos y superóxidos producidos en la ozonización.

El proceso de desinfección es simple y no requiere de atención una vez instalado, y el único mantenimiento que se debe dar al mismo es el cambio de la lámpara con la frecuencia que se requiere.

La desventaja de la desinfección por radiación UV, es que es muy adecuada para flujos y gastos pequeños, como los requeridos en una casa habitación, en un hospital o en un restaurante, pero cuando se trata de desinfección de grandes volúmenes de agua como los producidos en una gran industria o una potabilizadora municipal, el equipo requerido es muy caro en inversión y en costo de operación por lo que en esta circunstancia es mas práctico la desinfección por cloro o por ozono.

LA DESINFECCIÓN UV EN LA PRÁCTICA: Un equipo de desinfección UV es sencillo en su diseño, operación y mantenimiento. Consiste de un bulbo o tubo de cuarzo que emite radiación UV. El agua infectada que se pone en contacto con este tipo de radiación, recibe una dosis de la misma y de esta manera los microorganismos son inactivados.

En su paso a desinfección, el agua circula a través de un compartimiento donde se encuentran una o mas lámparas UV. El tubo por donde circula el agua es de nylon, PVC transparente, cuarzo o algún otro material transparente a la radiación y si se forma sarro en el mismo o se ensucia, debe limpiarse o reemplazarse ya que puede disminuir la efectividad. La figura 3 describe este proceso de desinfección.

5.12 DESINFECCIÓN POR CALOR:

Este tipo de desinfección es el mas antiguamente empleado en el tratamiento del agua para inactivar los microorganismos en el agua.

La acción del calor por un tiempo prolongado y a la temperatura de ebullición causa la muerte de todo tipo de agentes microbianos, pero el alto costo requerido para hacer hervir el agua es prohibitivo en la industria y en los servicios, por lo que solo a nivel casero o doméstico es aceptable esta práctica y de hecho se emplea en comunidades donde no se cuenta con infraestructura para una desinfección convencional y es posible conseguir combustibles baratos o sin costo (leña).

La pasteurización o desinfección por métodos térmicos de alimentos de infantes, leche, cervezas, y otras bebidas se efectúa a nivel industrial pero solo cuando el proceso o el alto valor en precio del producto lo justifican.