

MANUAL DE AGUA POTABLE, ALCANTARILLADO Y SANEAMIENTO

DESINFECCIÓN PARA SISTEMAS DE AGUA POTABLE Y SANEAMIENTO

23



MANUAL DE AGUA POTABLE, ALCANTARILLADO Y SANEAMIENTO

DESINFECCIÓN PARA SISTEMAS DE AGUA POTABLE Y SANEAMIENTO

COMISIÓN NACIONAL DEL AGUA

Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento
Desinfección Para Sistemas de Agua Potable y Saneamiento

ISBN: 978-607-626-023-4

D.R. © Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales
Boulevard Adolfo Ruiz Cortines No. 4209 Col. Jardines en la Montaña
C.P. 14210, Tlalpan, México, D.F.

Comisión Nacional del Agua
Insurgentes Sur No. 2416 Col. Copilco El Bajo
C.P. 04340, Coyoacán, México, D.F.
Tel. (55) 5174•4000

Subdirección General de Agua Potable, Drenaje y Saneamiento

Impreso y hecho en México

Distribución Gratuita. Prohibida su venta.

Queda prohibido su uso para fines distintos al desarrollo social.

Se autoriza la reproducción sin alteraciones del material contenido en esta obra,
sin fines de lucro y citando la fuente

CONTENIDO

Presentación	VII
Objetivo general	IX
Introducción al diseño de unidades de desinfección para agua potable y tratamiento de aguas residuales	XI
1. Importancia sanitaria de la desinfección y condiciones generales	1
1.1. Contaminantes biológicos del agua	1
1.2. Efectos de los contaminantes biológicos en el agua	3
1.2.1 Virus	4
1.2.2 Bacterias	5
1.2.3 Protozoarios	6
1.2.4 Helmintos	8
1.3. Desinfección	12
1.3.1 Factores que influyen en la desinfección	13
1.3.2 Intensidad y naturaleza del agente físico	14
2. Introducción a los métodos de desinfección	17
2.1. Métodos físicos	17
2.1.1 Filtración	18
2.1.2 Temperatura	19
2.1.3 Radiación (solar y luz UV)	19
2.1.4 Radiación gamma	19
2.1.5 Procesos electrolíticos	20
2.2. Métodos químicos	20
2.2.1 Yodo	21
2.2.2 Bromo	21
2.2.3 Plata	21
2.2.4 Cloro	22
2.2.5 Ozono	23
3. Desinfección en zonas rurales	25
3.1. Métodos físicos de desinfección	25
3.1.1 Radiación solar	25
3.1.2 Concentrado solar	25
3.1.3 Temperatura	26
3.1.4 Desinfección con luz UV	28
3.1.5 Tamizado	28

3.1.6 Filtración en filtros de cantera	29
3.1.7 Filtros de cartucho	29
3.1.8 Filtración lenta en arena	30
3.2. Métodos químicos de desinfección	31
3.2.1 Aplicación de cloro	31
3.2.2 Aplicación de yodo	33
3.2.3 Uso de plata coloidal	33
3.3. Comparación de métodos de desinfección más aplicados en las zonas rurales	33
4. Cloración	35
4.1. Definiciones	35
4.2. Fundamentos	36
4.3. Desinfección con cloro	36
4.3.1 Características	36
4.3.2 Mecanismos de inactivación	37
4.3.3 Principales reacciones	37
4.3.4 Otras reacciones	40
4.3.5 Cloración al punto de quiebre	42
4.3.6 Demanda de cloro	42
4.3.7 Dosis de cloro	44
4.3.8 Factores que afectan la eficiencia de desinfección	45
4.3.9 Descloración	45
4.3.10 Comparación con otros desinfectantes	46
4.4. Presentación del producto	46
4.4.1 Hipoclorito de calcio	47
4.4.2 Hipoclorito de sodio	47
4.4.3 Cloro líquido	47
4.5. Contenedores de cloro	49
4.5.1 Cilindros	49
4.5.2 Carros tanque	51
4.5.3 Instalación de los cilindros	52
4.5.4 Transporte y almacenamiento	53
4.6. Unidades para aplicar el cloro	54
4.6.1 Hipocloradores	54
4.6.2 Cloradores	55
4.6.3 Evaporadores	57
4.6.4 Inyección	59
4.6.5 Operación de los cloradores	60
4.6.6 Selección del sistema de control	64

4.7. Diseño	64
4.8. Medición del cloro residual	65
4.8.1 Analizadores automáticos	65
4.8.2 Determinación en campo	67
4.9. Seguridad	67
4.9.1 Seguridad inherente al equipo	68
4.9.2 Equipo de protección	68
4.9.3 Previsiones y acciones de emergencia	71
4.10. Primeros auxilios	72
4.10.1 Efectos fisiológicos del cloro	72
4.10.2 Atención a heridos	73
5. Luz ultravioleta	75
5.1. Fundamentos	76
5.1.1 Características	76
5.1.2 Propiedades físicas y químicas	76
5.1.3 Principio de funcionamiento	81
5.2. Diseño de unidades ultravioletas para desinfección	82
5.2.1 Equipos de luz ultravioleta	82
5.2.2 Hidráulica del reactor	82
5.2.3 Tipos de equipos	84
5.2.4 Clasificación de acuerdo al tipo de instalación	85
5.2.5 Clasificación de acuerdo con la disposición de las lámparas	85
5.2.6 Selección de equipos de luz ultravioleta	89
5.2.7 Diseño de un equipo de luz UV	91
5.2.8 Ejemplo de diseño	94
5.3. Operación y mantenimiento	96
5.3.1 Reemplazo de lámparas	97
5.3.2 Limpieza	97
6. Ozonación	101
6.1. Fundamentos	101
6.1.1 Estado del arte	101
6.1.2 Usos del ozono	103
6.1.3 Oxidación	104
6.2. Diseño del proceso de oxidación	105
6.2.1 Pretratamiento	105
6.2.2 Reacciones durante la ozonización	106
6.2.3 Ventajas y desventajas del uso de ozono	108
6.2.4 Generadores de ozono	108

6.2.5 Generación de ozono por corona de descarga	109
6.2.6 Ejemplos de generadores comerciales de ozono	112
6.2.7 Cámaras de contacto y sistemas de difusión	113
6.2.8 Cámara de contacto con lecho empacado y sistema de difusión por inyección	115
6.2.9 Eliminación del gas residual	120
6.2.10 Criterios de diseño	121
6.2.11 Control y medidas de seguridad en las instalaciones de ozono	125
Conclusiones del libro	133
Anexos	
A. Metodología para preparación de soluciones de hipoclorito	135
B. Clasificación de las lámparas de mercurio	137
Bibliografía	143
Tabla de conversiones de unidades de medida	151
Ilustraciones	161
Tablas	165

PRESENTACIÓN

Uno de los grandes desafíos hídricos que enfrentamos a nivel global es dotar de los servicios de agua potable, alcantarillado y saneamiento a la población, debido, por un lado, al crecimiento demográfico acelerado y por otro, a las dificultades técnicas, cada vez mayores, que conlleva hacerlo.

Contar con estos servicios en el hogar es un factor determinante en la calidad de vida y desarrollo integral de las familias. En México, la población beneficiada ha venido creciendo los últimos años; sin embargo, mientras más nos acercamos a la cobertura universal, la tarea se vuelve más compleja.

Por ello, para responder a las nuevas necesidades hídricas, la administración del Presidente de la República, Enrique Peña Nieto, está impulsando una transformación integral del sector, y como parte fundamental de esta estrategia, el fortalecimiento de los organismos operadores y prestadores de los servicios de agua potable, drenaje y saneamiento.

En este sentido, publicamos este manual: una guía técnica especializada, que contiene los más recientes avances tecnológicos en obras hidráulicas y normas de calidad, con el fin de desarrollar infraestructura más eficiente, segura y sustentable, así como formar recursos humanos más capacitados y preparados.

Estamos seguros de que será de gran apoyo para orientar el quehacer cotidiano de los técnicos, especialistas y tomadores de decisiones, proporcionándoles criterios para generar ciclos virtuosos de gestión, disminuir los costos de operación, impulsar el intercambio de volúmenes de agua de primer uso por tratada en los procesos que así lo permitan, y realizar en general, un mejor aprovechamiento de las aguas superficiales y subterráneas del país, considerando las necesidades de nueva infraestructura y el cuidado y mantenimiento de la existente.

El Gobierno de la República tiene el firme compromiso de sentar las bases de una cultura de la gestión integral del agua. Nuestros retos son grandes, pero más grande debe ser nuestra capacidad transformadora para contribuir desde el sector hídrico a **Mover a México**.

Director General de la Comisión Nacional del Agua



OBJETIVO GENERAL

El *Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento* (MAPAS) está dirigido a quienes diseñan, construyen, operan y administran los sistemas de agua potable, alcantarillado y saneamiento del país; busca ser una referencia sobre los criterios, procedimientos, normas, índices, parámetros y casos de éxito que la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), en su carácter de entidad normativa federal en materia de agua, considera recomendable utilizar, a efecto de homologarlos, para que el desarrollo, operación y administración de los sistemas se encaminen a elevar y mantener la eficiencia y la calidad de los servicios a la población.

Este trabajo favorece y orienta la toma de decisiones por parte de autoridades, profesionales, administradores y técnicos de los organismos operadores de agua de la República Mexicana y la labor de los centros de enseñanza.



INTRODUCCIÓN AL DISEÑO DE UNIDADES DE DESINFECCIÓN PARA AGUA POTABLE Y TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES

En el agua y en el medio ambiente están presentes microorganismos que la gran mayoría no presentan un riesgo al hombre y a los seres vivos, inclusive convivimos con ellos y son parte de los procesos de la vida. Sin embargo, algunos de ellos, y solo unos cuantos, presentan un riesgo a la salud, pudiendo causar incluso la muerte.

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. Los microorganismos patógenos o causantes de enfermedades son llamados agentes infecciosos y pueden ser transmitidos al hombre y seres vivos por vehículos como aire y alimentos pero el más común es el agua que se consume.

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. Los 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 desin-

fección del agua con cloro y sus derivados en todo el país y finalmente en todo el mundo.

Este libro, que consta de seis capítulos, aborda el diseño de unidades de desinfección para agua potable y tratamiento de aguas residuales, presentando tres de los mecanismos más utilizados en México y en el mundo, no sin antes enfatizar, en el capítulo 1, la importancia de la desinfección para la salud y la vida misma de la población.

En el capítulo 2, se presenta una clasificación y una breve descripción de los métodos de desinfección más comunes y efectivos.

En el capítulo 3, se presenta una breve descripción de diversos métodos de desinfección (físicos y químicos) de mayor aplicación en zonas rurales.

A partir del capítulo 4, se presenta el diseño de unidades de desinfección para sistemas de agua potable y tratamiento de aguas residuales, considerando los métodos más comunes en México y el mundo, siendo estos: la Cloración; la Luz ultravioleta y la Ozonación.

1

IMPORTANCIA SANITARIA DE LA DESINFECCIÓN Y CONDICIONES GENERALES

1.1. CONTAMINANTES BIOLÓGICOS DEL AGUA

Las actividades de desinfección son consideradas como los mecanismos principales en la desactivación o eliminación de patógenos (organismos microscópicos) para prevenir la dispersión de enfermedades transmitidas a través del agua tanto a las personas como al ganado.

Entre los principales contaminantes biológicos del agua encontramos diferentes agentes patógenos que provienen en su mayoría de residuos orgánicos; esta contaminación está relacionada con los desechos de origen doméstico e industrial vertidos a los cuerpos de agua. La carga contaminante de los residuos de origen doméstico está representada por altos porcentajes de materia orgánica y microorganismos de origen fecal. Estos microorganismos son causantes de enfermedades de origen hídrico, que generan altos porcentajes de morbi-mortalidad en la población.

Las enfermedades infecciosas se transmiten principalmente a través de las excretas de seres humanos y de animales; las infecciones asociadas al agua se producen por ingestión o por contacto (piel, mucosas, heridas), pero muchas enfermedades pueden transmitirse asimismo por otras vías, como son el contacto entre personas o la inhalación de aerosoles.

Los organismos patógenos que se pueden encontrar en aguas contaminadas son:

- Virus
- Bacterias
- Protozoarios
- Helmintos

Estos microorganismos provienen de desechos humanos que son portadores o que están infectados. Generalmente causan enfermedades del aparato intestinal como: fiebre tifoidea, paratifoidea, disentería, helmintiasis y cólera, entre muchas otras. Los riesgos vinculados al consumo de agua pueden clasificarse en tres categorías:

1. Los transmitidos por el agua (Tabla 1.1)
2. Con base en el agua; los transmisibles por parásitos o patógenos que pasan parte de su ciclo biológico en el agua (Tabla 1.2)
3. Vectoriales relacionadas con el agua; transmitidas por vectores que se desarrollan en el agua, atribuibles a la falta de agua para la higiene personal y doméstica (Tabla 1.3)

Tabla 1.1 Principales enfermedades transmitidas por el agua

Enfermedades	Causa y vía de transmisión
Disentería amebiana	Los protozoos pasan por la vía fecal-oral a través del agua y alimentos contaminados, o por contacto de una persona con otra.
Disentería bacilar	Las bacterias pasan por la vía fecal-oral a través del agua y alimentos contaminados, o por contacto de una persona con otra.
Enfermedades diarreicas (inclusive la disentería amebiana y bacilar)	Diversas bacterias, virus y protozoos pasan por la vía fecal-oral a través del agua y alimentos contaminados, o por contacto de una persona con otra.
Cólera	Las bacterias pasan por la vía fecal-oral a través del agua y alimentos contaminados, o por contacto de una persona con otra.
Hepatitis A	El virus pasa por la vía fecal-oral a través del agua y alimentos contaminados, o por contacto de una persona con otra.
Fiebre paratifoidea y tifoidea	Las bacterias pasan por la vía fecal-oral a través del agua y alimentos contaminados, o por contacto de una persona con otra.
Poliomielitis	El virus pasa por la vía fecal-oral a través del agua y alimentos contaminados, o por contacto de una persona con otra.

Tabla 1.2 Principales enfermedades con base en el agua

Enfermedades	Causa y vía de transmisión
Ascariasis	Los huevos fecundados se expulsan con las heces humanas; las larvas se desarrollan en la tierra caliente. El hombre ingiere la tierra que está sobre los alimentos. Las larvas penetran la pared intestinal, donde maduran.
Clonorquiasis	Los gusanos se reproducen en caracoles gastrópodos, luego los tragan peces de agua dulce u otros caracoles. Cuando el hombre come pescado crudo o poco cocinado, los gusanos migran a los conductos biliares y ponen huevos.
Dracunculosis (guinea worm)	El gusano de Guinea (<i>Dracunculus medinensis</i>) es ingerido por el cíclope (un crustáceo); cuando el hombre ingiere dicho cíclope las larvas del gusano se liberan dentro del estómago. Las larvas penetran la pared intestinal, luego se desarrollan, transformándose en gusanos, y migran a través de los tejidos. Después de un año, el gusano adulto llega a la superficie de la piel de las extremidades inferiores; la hembra entra en contacto con el agua y despide las larvas dentro del agua.
Paraginimiasis	Los gusanos que viven en quistes pulmonares ponen huevos en los pulmones humanos, que se expectoran y luego son tragados. Los huevos de los gusanos se expulsan con las heces y se abren en agua dulce. Las larvas encuentran caracoles huéspedes en los cuales se reduplican, luego se mudan a cangrejos o cangrejos de río. El hombre come mariscos y pescados de mar sin cocinar, y gracias a ello los gusanos migran en parejas del estómago a través de la pared y del diafragma intestinal a los pulmones, donde se aparean.
Esquistosomiasis	Los huevos del gusano esquistosoma se expulsan con las heces humanas. Los huevos hacen eclosión al entrar en contacto con el agua, liberando el parásito miracidium. El parásito ingresa en un caracol de agua dulce, donde se reduplica. Se libera otra vez dentro del agua, luego penetra en la piel del hombre en unos segundos y pasa a los vasos sanguíneos. En un periodo de 30 a 45 días, el miracidium crece y se convierte en gusano, que puede poner de 200 a 2 000 huevos por día, durante un promedio de 5 años.

Tabla 1.3 Principales enfermedades vectoriales relacionadas con el agua

Enfermedades	Causa y vía de transmisión
Dengue	Un mosquito recoge el virus de un ser humano o animal infectado. El virus tiene un período de incubación de 8 a 12 días y se reduplica. En la próxima ingesta de sangre del mosquito, el virus se inyecta en la corriente sanguínea.
Filariasis (incluida la elefantiasis)	Las larvas son ingeridas por un mosquito y se desarrollan; cuando el mosquito infectado pica a un ser humano, las larvas penetran por punción y llegan a los vasos linfáticos, donde se reproducen.
Paludismo	Los protozoos se desarrollan en el intestino del mosquito y se expulsan con la saliva en cada ingesta de sangre; los parásitos son transportados por la sangre al hígado del hombre, donde invaden las células y se multiplican.
Oncocercosis (ceguera de los ríos)	Los embriones del gusano son ingeridos por jejenes. Los embriones se desarrollan y se convierten en larvas dentro de los jejenes, que inyectan las larvas en el hombre al picarlo
Fiebre del Valle del Rift (FVR)	El virus generalmente existe en huéspedes animales; los mosquitos y otros insectos chupadores de sangre recogen el virus y lo inyectan en la sangre del hombre. Éste también se infecta cuando trabaja con humores corporales de animales muertos.

1.2. EFECTOS DE LOS CONTAMINANTES BIOLÓGICOS EN EL AGUA

El agua para consumo humano puede estar contaminada por diversos microorganismos parásitos patógenos de origen fecal (bacterias, protozoarios, helmintos y virus) que, incapaces de vivir de forma independiente, permanecen asociados a un huésped durante toda su existencia o parte de ella, obteniendo alimento, espacio y protección necesarios para sobrevivir. Como consecuencia ocasionan una serie de enfermedades infecciosas principalmente en el tracto gastrointestinal; en la actualidad, dichas enfermedades constituyen uno de los mayores problemas de salud pública, sobre todo en la población infantil y preescolar de los países en desarrollo. Se estima que cada año se presentan 1 300 millones de episodios de diarrea en niños menores de cinco años en países en desarrollo, y 4 millones de muertes por diarrea aguda, relacionadas en el 50-70 por ciento de los casos con deshidratación (OMS, 2013). En México, la tasa de mortalidad por causa de diarrea entre niños menores de cinco años en el 2008 fue de 21.66 defunciones por cada 1 000 (INEGI, 2010).

Estudios recientes patrocinados por la Organización Mundial de la Salud (OMS), indican que las bacterias *Escherichia coli* *Enterotoxigénica*, *Escherichia coli* *Enteropatógena*, *Campylobacter*, *Shigella* y *Salmonella*; los protozoarios *Entamoeba histolytica* y *Giardia lamblia*; los virus *rotavirus* y *adenovirus*, y los helmintos *Ascaris lumbricoides*, *uncinarias* y, poco común pero de gran trascendencia, *Taenia solium*, constituyen los agentes que con mayor frecuencia causan diarrea infecciosa (Rodríguez, 2010).

Usualmente estos problemas se encuentran asociados, además, con la desnutrición, agravándola por cuatro diferentes factores:

- Disminución del apetito: como consecuencia del vómito, fiebre, deshidratación, pesadez estomacal y sensación de ardor
- Mala absorción: la diarrea puede producir mala absorción de azúcares, grasas, proteínas, algunas vitaminas (A, B12, fosfatos) y minerales (magnesio y zinc)
- Alteraciones metabólicas: las fiebres entéricas como la fiebre tifoidea pueden originar alteraciones de las funciones corporales

- Pérdidas directas de nutrientes: durante algunos cuadros diarreicos particularmente con el del cólera

Por otra parte, la desnutrición predispone a padecer infecciones gastrointestinales al disminuir la acidez gástrica, que sirve como desinfectante, bajar la motilidad intestinal¹ e incrementar el tiempo de residencia de los patógenos.

1.2.1 VIRUS

Más de 120 tipos de virus son capaces de infectar el tracto digestivo humano y ser eliminados en las heces. Un gramo de heces humanas puede contener hasta 10⁹ partículas infecciosas virales diferentes, independientemente de que el individuo presente alguna manifestación clínica de enfermedad. Los virus no se multiplican en el medio ambiente, no obstante, pueden sobrevivir por varias semanas, especialmente si

1 Acción fisiológica del aparato digestivo encargada de desplazar el contenido de la boca hacia el ano

las temperaturas son bajas (<15° C). Los grupos patógenos de importancia como contaminantes de agua incluyen: *adenovirus*, *enterovirus* (*poliovirus* y virus de la hepatitis A), *reovirus* y virus causantes de diarrea, especialmente *rotavirus* y virus tipo *Norwalk*.

La gastroenteritis viral aguda es una enfermedad muy común que se presenta en forma endémica o epidémica y afecta a sujetos de todas las edades. Después de transmisión por vía respiratoria, la ruta oral-fecal es la segunda en importancia y precisamente es por la cual se transmiten las enteritis virales. La gastroenteritis no-bacteriana se presenta en todo el mundo, en particular, en los países en vías de desarrollo y, sobre todo, en la población infantil. Las enfermedades virales se presentan abruptamente y se manifiestan por diarrea, náusea, vómito, fiebre baja, dolores abdominales, de cabeza y musculares, anorexia, y malestar general. La Tabla 1.4 muestra la concentración de virus comúnmente encontrados en aguas residuales y su dosis infectiva. Por su parte la Tabla 1.5 presenta los

Tabla 1.4 Concentración y dosis infectivas de virus comúnmente encontrados en aguas residuales

Género y especie	Concentración (número/ 100 mL)	Dosis infectiva
<i>Rotavirus</i> (4 tipos)	100 – 50 000 **	1 - 10
<i>Poliovirus</i> (3 tipos)		
<i>Enterovirus</i> (72 tipos)		
<i>Astrovirus</i> (5 tipos)		
<i>Norwalk agente</i>		
<i>Calicivirus</i> (2 tipos)		
<i>Hymenolepis diminuta</i>		
<i>Taenia solium</i>		
<i>Taenia saginata</i>		
<i>Ascaris lumbricoides</i>		
<i>Trichuris trichiura</i>		
<i>Ancylostoma duodenale</i>		
<i>Necator americanus</i>		
<i>Toxocaris canis</i>		
<i>Strongiloides stercoralis</i>		
<i>Enterobius vermicularis</i>		

** Número de huevos de helminto por litro

virus más comúnmente encontrados en agua contaminada², la enfermedad que ocasionan y la localización en el huésped.

1.2.2 BACTERIAS

En las diferentes fuentes de agua (superficiales y subterráneas), pueden encontrarse diversos tipos de bacterias, algunas de las cuales son na-

² El agua está contaminada cuando su composición se ha alterado de modo que no reúna las condiciones necesarias para ser utilizada beneficiosamente en el consumo del hombre y de los animales (OMS)

tivas, y por lo tanto pueden ser benéficas, ya que de ellas depende en gran medida el proceso de autopurificación. Sin embargo, otras, tiene su origen en las excretas de humanos y animales de sangre caliente tales como animales domésticos, silvestres y aves. La Ilustración 1.1 muestra algunas de las formas más típicas.

Entre las parásitas existen las que se denominan patógenas debido a que al infestar al huésped, producen sustancias nocivas que lo afectan. El agua se convierte en el medio ideal para su transporte, dando con ello origen a las llamadas

Ilustración 1.1 Formas típicas de las bacterias



Tabla 1.5 Virus más comúnmente encontrados en aguas contaminadas (OMS, 1979)

Parásito y Enfermedad	Localización en el Huésped
<i>Enterovirus</i> (72 tipos) <i>polio, echo, coxsackie, nuevo enterovirus</i>	La multiplicación ocurre en la faringe o en el intestino. Ocasiona gastroenteritis, anomalías del corazón y meningitis (inflamación de las membranas del encéfalo y médula espinal)
<i>Hepatitis A Virus</i> <i>Infecciones hepáticas</i>	La hepatitis viral infecciosa es una enfermedad generalizada que primero afecta al hígado
<i>Adenovirus</i> (47 tipos) <i>Gastroenteritis</i>	Segundo agente viral más importante de enfermedades diarreicas en lactantes y niños pequeños en todo el mundo, además, ocasiona infección de los ojos y vías respiratorias
<i>Rotavirus</i> (3 grupos) <i>Gastroenteritis</i>	Grupo A: es la causa simple más importante de enfermedad diarreica intensa en lactantes y niños pequeños en todo el mundo Grupo B: causa brotes de enfermedad diarreica en adultos y niños en China Grupo C: causa casos esporádicos y brotes ocasionales de enfermedad diarreica en niños
<i>Norwalk agente</i> <i>Gastroenteritis</i>	Importante causa de brotes de enfermedad diarreica y con vómito en niños, adolescentes y adultos
<i>Astrovirus</i> (5 tipos) <i>Gastroenteritis</i>	Casos y brotes ocasionales de diarreas en lactantes, niños pequeños y personas de edad avanzada
<i>Calicivirus</i> (2 tipos) <i>Gastroenteritis</i>	Casos y brotes esporádicos de diarreas en lactantes, niños pequeños y personas de edad avanzada

enfermedades hídricas. Para evaluar la calidad del agua se realizan pruebas sistemáticas de laboratorio que permiten determinar el grado de contaminación y que consisten en determinar indicadores bacteriológicos.

Por lo anterior, en México se reglamenta la calidad microbiológica del agua. En el caso del consumo humano, mediante la modificación del año 2000 a la norma oficial mexicana NOM-127-SSA1-1994 (o en su caso la norma oficial vigente) “Salud Ambiental, Agua para Uso y Consumo Humano-Límites Permisibles de Calidad y Tratamientos a que debe Someterse el Agua para su Potabilización” publicada por el diario oficial de la federación el 18 de enero de 1996, y que establece todas las características físicas, químicas y bacteriológicas, que debe cumplir el agua potable para que sea apta para el consumo humano.

Para el caso de las descargas de aguas residuales vertidas en aguas y bienes nacionales, así como descargas en suelo (uso en riego agrícola), la Norma Oficial Mexicana NOM-001-SEMAR-NAT-1996 (o en su caso la norma oficial vigente) establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales.

De lo anterior se desprende que la vigilancia del cumplimiento de estas normas corresponde a la Secretaría de Salud, en coordinación con los gobiernos estatales, municipales, el Gobierno del Distrito Federal, las Comisiones Estatales de Agua y Saneamiento y la Comisión Nacional del Agua en sus respectivos ámbitos de competencia.

La Tabla 1.6 muestra la concentración de bacterias comúnmente encontrados en aguas residuales y su dosis infectiva. Por su parte la Tabla 1.7 presenta las bacterias más comúnmente encon-

tradas en agua contaminada, la enfermedad que ocasionan y la localización en el huésped.

1.2.3 PROTOZOARIOS

Los protozoarios incluyen actualmente varios grupos de importancia médica, pueden infectar y causan principalmente enfermedades de tipo gastroentérico. Por ejemplo, en 2010 se reportaron en México 374,055 casos de amibiasis intestinal (DGE, 2012). Por otro lado, estos organismos también pueden provocar abscesos hepáticos³ y meningoencefalitis (*Naegleria fawleri*). Existen tres grupos de protozoarios: flagelados, sarcodinos y ciliados (Ilustración 1.2).

- a) **Los flagelados:** Poseen uno o más flagelos en forma de látigo y en ocasiones membrana ondulante. Se incluyen en este grupo a los flagelados intestinales y del aparato genito-urinario (*Giardia lamblia*)
- b) **Sarcodinos:** Parásitos del hombre típicos son las amebas *Entamoeba coli*, *E. histolytica* (se reporta una frecuencia del 37.7 por ciento y 15.9 por ciento respectivamente), *Endolimax*, *Iodamoeba*, *Acanthamoeba* y *Naegleria*. Esta última causa la meningoencefalitis amibiana primaria, enfermedad mortal por invasión del cerebro. Al parecer, a causa de una infección por agua contaminada, las amebas entran por la nariz y llegan de forma directa al cerebro, donde rápidamente forman nidos que causan hemo-

3 Causados por la *Entamoeba histolytica*, el mismo parásito que causa la *amebiasis*, una infección intestinal también llamada disentería *amebiana*. Después de que ha ocurrido una infección, el parásito puede ser transportado a través de la sangre desde los intestinos hasta el hígado. La enfermedad se disemina por consumir agua o alimentos contaminados con materia fecal (algunas veces debido al uso de excrementos humanos como fertilizantes) y a través del contacto directo entre personas.)

Tabla 1.6 Concentración y dosis infectivas de bacterias comúnmente encontradas en aguas residuales

Género y especie	Concentración (número/ 100 mL)	Dosis infectiva
<i>Salmonella typhi</i>	104 - 107	103 - 104
<i>Vibrio cholerae</i>		
<i>Shigella flexneri</i>		
<i>Salmonella paratyphi</i>		
<i>Campylobacter jejune</i>		
<i>Clostridium perfringens</i>		
<i>Clostridium difficile</i>		
<i>Yersinia enterocolitica</i>		
<i>Escherichia coli (enteropatógena)</i>		
<i>Naegleria fowleri</i>		
<i>Hymenolepis diminuta</i>		
<i>Taenia solium</i>		
<i>Taenia saginata</i>		
<i>Ascaris lumbricoides</i>		
<i>Trichuris trichiura</i>		
<i>Ancylostoma duodenale</i>		
<i>Necator americanus</i>		
<i>Toxocaris canis</i>		
<i>Strongiloides stercoralis</i>		
<i>Enterobius vermicularis</i>		

Tabla 1.7 Bacterias más comúnmente encontrados en aguas contaminadas

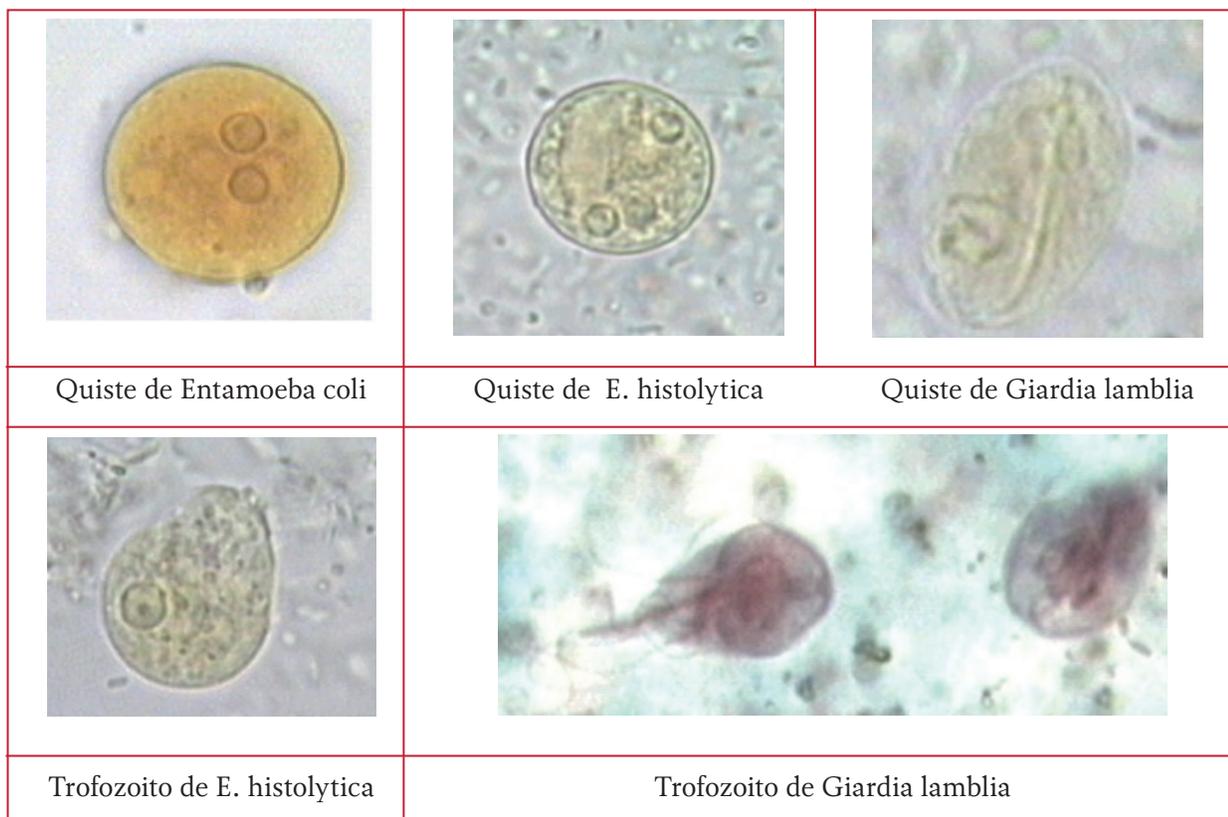
Parásito y Enfermedad	Localización en el Huésped
<i>Shigella dysenteriae</i> Disentería	Invade el tejido intestinal superficial. Inicia con una diarrea abrupta, sanguinolenta y con pus; continua con cólicos y esfuerzos dolorosos, sin lograr evacuación alguna. Muy grave en niños, con alto índice de mortalidad.
<i>Salmonella paratyphi A y B</i> Fiebre tifoidea	Invade la mucosa intestinal para pasar al torrente sanguíneo. Inicia con malestar general, falta de apetito, altas fiebres recurrentes, dolor muscular y de cabeza. Puede haber estreñimiento o diarrea.
<i>Vibro cholerae</i> Cólera	Prolifera en el intestino produciendo una sustancia tóxica, la cual causa diarrea líquida constante. De no atenderse rápidamente el desenlace es fatal.
<i>Escherichia coli (enteropatógena)</i> Gastroenterítis	Común en recién nacidos, su riesgo se incrementa por falta de atención y alimentación deficiente. Se caracteriza por presentar diarrea, deshidratación y otras complicaciones que pueden ocasionar la muerte.
<i>Clostridium difficile</i> Disentería	Causa diarrea y daños de las células epiteliales. Inflama el colon. Inicia con diarrea abrupta y sanguinolenta, y fiebre.
<i>Yersinia enterocolitica</i> Fiebre entérica	Inflamación en la región intestinal y articulaciones. Ocasionalmente las bacterias proliferan en la sangre, ocasionando dolor abdominal intenso, diarrea, fiebre, sangre en heces, y erupciones dolorosas y de color rosado o azulado en piernas, o por debajo de las rodillas.

rragia y daños extensos. La muerte sobreviene en menos de una semana

c) **Ciliados:** Son protozoarios complejos que portan cilios característicamente distribuidos en hileras o en placas, con

dos tipos de núcleo en cada individuo. *Balantidium coli*, un ciliado gigante que ocurre en el intestino del hombre y los cerdos, es el único parásito relevante de este grupo

Ilustración 1.2 Ejemplo de protozoarios



La Tabla 1.8 muestra la concentración de protozoarios comúnmente encontrados en aguas residuales y su dosis infectiva. Por su parte la Tabla 1.9 presenta los protozoarios más comúnmente encontrados en agua contaminada, la enfermedad que ocasionan y la localización en el huésped.

1.2.4 HELMINTOS

La palabra helminto significa gusano, y en parasitología se refiere a especies animales de cuerpo largo o blando, que infestan el organismo de

otras especies (parásitos); entre ellos destacan *Ascaris lumbricoides*, *Trichuris trichiura*, *Hymenolepis diminuta*, *H. nana*, *Toxocara spp* y *Taenia solium* (Ilustración 1.3). La mayoría de los helmintos no se multiplican dentro de su huésped, por lo que la severidad de su infección está asociada con una continua reinfección por ingestión de dichos parásitos. Debido a esto, la intensidad de la manifestación clínica generalmente es el resultado de cargas acumulativas de gusanos llevados por varios años como producto de infecciones repetidas. Esto contrasta con las infeccio-

Tabla 1.8 Concentración y dosis infectivas de protozoarios comúnmente encontrados en aguas residuales

Género y especie	Concentración (número/ 100 mL)	Dosis infectiva
Entamoeba histolytica	10 - 104	< 10
Entamoeba coli		
Giardia lamblia		
Balantidium coli		
Cryptosporidium parvum		
Toxoplasma gondii		

nes causadas por virus, bacterias y protozoarios; los cuales causan una infección severa por unos cuantos días, después de haber ingerido una sola dosis infectante.

La Tabla 1.10 muestra la concentración de helmintos comúnmente encontrados en aguas residuales y su dosis infectiva. La Tabla 1.11 muestra los helmintos más comúnmente encontrados

Tabla 1.9 Protozoarios más comúnmente encontrados en aguas contaminadas

Parásito y Enfermedad	Localización en el Huésped
<i>Entamoeba histolytica</i> Amebiasis	Enfermedad de mayor incidencia a nivel mundial. Se manifiesta a través de diarrea, dolor abdominal, pérdida de peso y fiebre. Puede dar origen a colitis fulminante, perforación, y abscesos hepáticos.
<i>Giardia lamblia</i> Diarrea acuosa	Se adhiere al intestino, ocasionando irritación e inflamación de la mucosa del duodeno o yeyuno. Producen diarrea intermitente de resolución espontánea en 1 a 3 semanas, mala absorción, y pérdida de peso.
<i>Balantidium coli</i> Balantidiasis	Invade colon, y en algunos casos la mucosa de intestino grueso. Ocasiona diarrea crónica recurrente, que se alterna con estreñimiento, esfuerzos dolorosos sin evacuación y cólicos. En ocasiones se observa la presencia de moco sanguinolento.
<i>Naegleia fowleri</i> Meningoencefalitis amebiana primaria	Se caracteriza por un cuadro clínico agudo y hemorrágico capaz de provocar una muerte fulminante tanto en el hombre como en animales a los tres días de haber adquirido la infección.
<i>Cryptosporidium</i> Cryptosporidiosis	Se localiza en el aparato digestivo. Ocasiona diarrea leve, llegando a ser en ocasiones grave y prolongada.

Ilustración 1.3 Huevos Típicos de Helmintos



en agua contaminada, la enfermedad que ocasionan y la localización en el huésped.

Por lo anterior, en México se reglamenta la calidad microbiológica del agua; en el caso del consumo humano, mediante la modificación del año 2000 a la norma oficial mexicana NOM-127-SSA1-1994 (o en su caso la norma oficial vigente) “Salud Am-

biental, Agua para Uso y Consumo Humano-Límites Permisibles de Calidad y Tratamientos a que debe Someterse el Agua para su Potabilización” publicada por el diario oficial de la federación el 18 de enero de 1996, y que establece todas las características físicas, químicas y bacteriológicas, que debe cumplir el agua potable para que sea apta para el consumo humano.

Tabla 1.10 Concentración y dosis infectivas de helmintos comúnmente encontrados en aguas residuales

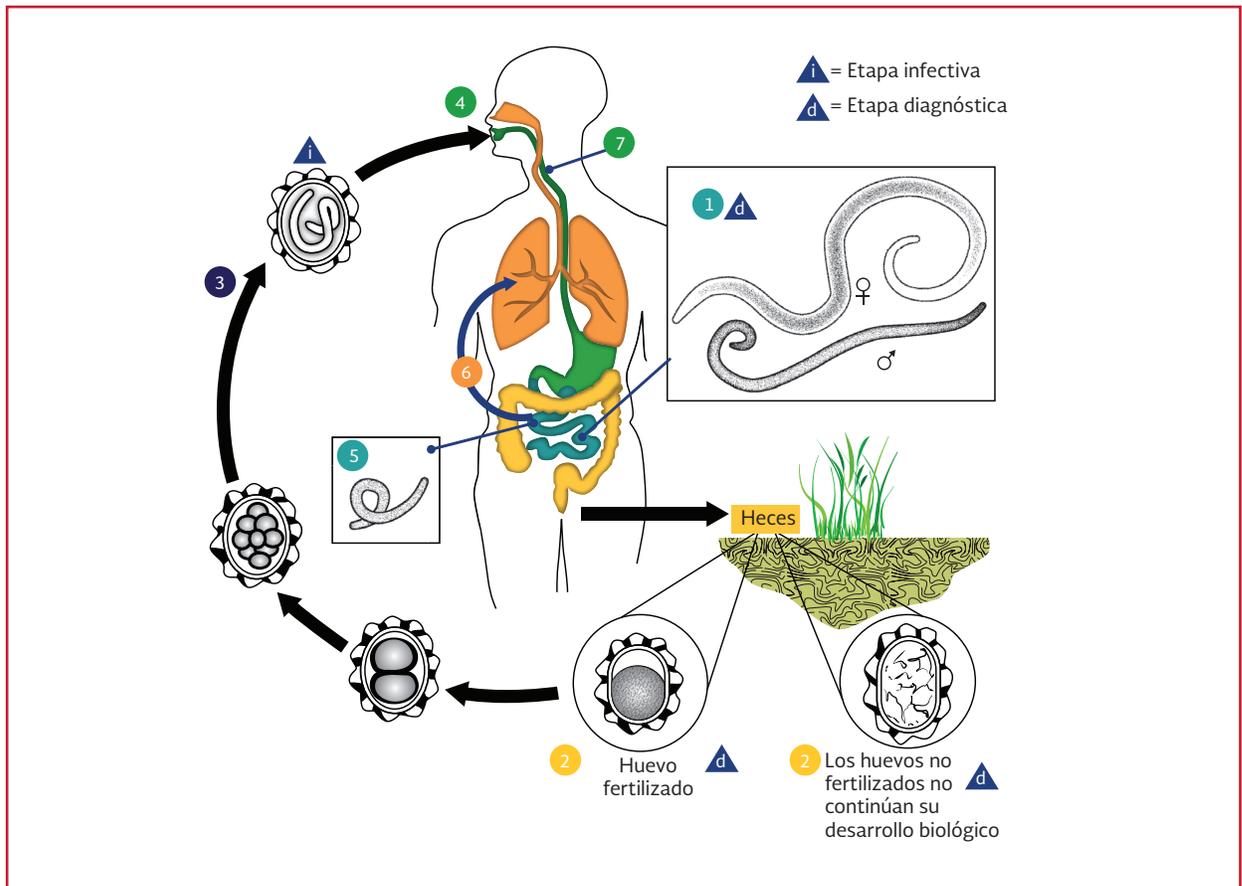
Género y especie	Concentración (número/ 100 mL)	Dosis infectiva
<i>Hymenolepis nana</i>	2 – 800 **	1 - 10
<i>Hymenolepis diminuta</i>		
<i>Taenia solium</i>		
<i>Taenia saginata</i>		
<i>Ascaris lumbricoides</i>		
<i>Trichuris trichiura</i>		
<i>Ancylostoma duodenale</i>		
<i>Necator americanus</i>		
<i>Toxocaris canis</i>		
<i>Strongiloides stercoralis</i>		
<i>Enterobius vermicularis</i>		

** Número de huevos de helminto por litro

Tabla 1.11 Helmintos más comúnmente encontrados en aguas contaminadas

Parásito y Enfermedad	Localización en el Huésped
<i>Enterobius vermicularis</i> Enterobiasis	En general, habitan en porciones de los intestinos grueso y delgado. Su principal síntoma es el prurito o comezón anal que frecuentemente se intensifica durante la noche
<i>Ascaris lumbricoides</i> Ascariasis	Cuando los huevos embrionados (2, 3) son ingeridos (4) se adhieren a la pared del duodeno, donde, una vez que las larvas eclosionen (5) entran a la corriente sanguínea, pasando por egl corazón y llegando a la circulación pulmonar (6) para penetrar los bronquios. Crecen instalándose por 10 días en los alvéolos, para después emigrar subiendo por la tráquea y ser tragados nuevamente (7) al intestino donde finalmente moran (Ilustración 1.4)
<i>Trichuris trichiura</i>	Se localiza en el intestino grueso. Se caracteriza por dolor abdominal, incremento en la sensibilidad, dolor de cabeza, náusea, vómito, estreñimiento y fiebre. Además de las infecciones crónicas intensas donde se presenta anemia, sangre en heces, dolor abdominal, pérdida de peso, caída o hundimiento hacia abajo de una parte del recto y ocasionalmente un grave estado de debilidad a consecuencia de la desnutrición
<i>Taenia solium</i> Teniasis <i>Cisticercosis</i>	Al ingerir el huevo, éste desciende hasta el intestino delgado donde la capa exterior se desintegra como resultado de un proceso enzimático, permitiendo la salida del embrión el cual pasa a la circulación y se instalan en el tejido subcutáneo, músculo-esquelético, del ojo, del corazón, del hígado, del pulmón y encéfalo ocasionando cuadros clínicos muy variables
<i>Hymenolepis nana</i> <i>Hymenolepiasis</i>	Ocasiona la eliminación de vellosidades, irritación de la mucosa intestinal, cuadros de dolor abdominal y de cabeza, falta de apetito y diarrea intensa, particularmente en niños.

Ilustración 1.4 Ciclo de vida de *Ascaris lumbricoides*



Los indicadores bacteriológicos para el caso del agua potable, para uso y consumo humano son los coliformes totales con un límite máximo permitido de “ausencia o no detectables” y *Escherichia Coli* o coliformes fecales con un límite máximo permitido de “Ausencia o no detectables”.

En el caso de las descargas de aguas residuales vertidas en aguas y bienes nacionales, así como descargas en suelo (uso en riego agrícola), la Norma Oficial Mexicana NOM-001-SEMAR-NAT-1996 (o en su caso la norma oficial vigente) establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales, siendo el lí-

mite máximo permisible de 1 000 y 2 000 como número más probable (NMP) de coliformes fecales por cada 100 mL para el promedio mensual y diario, respectivamente. Para determinar la contaminación por parásitos se toma como indicador los huevos de helminto (HH); en este caso se acepta 1 HH/L para riego de todo tipo de cultivo y 5 HH/L para cierto tipo de ellos.

De lo anterior se desprende que la vigilancia del cumplimiento de estas Normas corresponde a la Secretaría de Salud, en coordinación con los gobiernos estatales, municipales, el Gobierno del Distrito Federal, las Comisiones Estatales de Agua y Saneamiento y la Comisión Nacional del Agua en sus respectivos ámbitos de competencia.

1.3. DESINFECCIÓN

La desinfección es un proceso de oxidación que conlleva a la eliminación, la desactivación o eliminación de microorganismos presentes en el agua, sean o no patógenos. La acción de los desinfectantes se puede explicar mediante cuatro mecanismos:

- Daño a la pared celular
- Alteración de la permeabilidad de las células
- Alteración de la naturaleza coloidal del protoplasma
- Inhibición de la actividad enzimática

En la desinfección del agua, la meta es destruir o al menos inactivar a los organismos patógenos, con el objeto de prevenir epidemias de infecciones gastrointestinales como cólera, tifoidea, disentería, entre otras.

La desinfección constituye la etapa final de todo tratamiento del agua. Su práctica es aceptada en todo el mundo, y aunque la cloración es el método dominante, algunos países como Francia (desde 1910), Alemania y Canadá prefieren la desinfección con ozono. Además, también son empleadas otras opciones como la luz ultravioleta (UV), el yodo y la radiación gamma.

Un sistema ideal de desinfección debe eliminar consistentemente el mayor número y variedad de microorganismos, sin provocar afectaciones en el entorno ni alterar químicamente la calidad del agua, ni presentar toxicidad (capacidad o potencialidad inherente de un material para causar

efectos adversos en los organismos superiores), y con el menor costo posible. Un desinfectante ideal para el agua debe cumplir con los siguientes parámetros:

- Eliminación de todas las clases de agentes patógenos y en cantidad suficiente
- No ser tóxico para el hombre ni animales domésticos
- No tener un sabor desagradable
- Tener un costo razonable
- Ser de manejo, transporte y almacenamiento accesible y seguro
- Contrarrestar la posible contaminación en líneas de conducción y tanques de almacenamiento en el caso de agua potable
- No reaccionar con los compuestos presentes en el agua para producir sustancias tóxicas
- Los compuestos químicos más utilizados para la desinfección del agua son:
 - Hipoclorito de sodio, NaClO
 - Hipoclorito de calcio, $\text{Ca}(\text{ClO})_2$
 - Ácido hipocloroso, HClO
 - Clorito de sodio, NaClO_2
 - Dióxido de cloro, ClO_2
 - Ozono, O_3
- Halógenos: Yodo
- Metales
 - cobre, Cu^{2+}
 - plata, Ag^+
- Permanganato HMnO_4

En la Tabla 1.12 se presenta una comparación de las características de los desinfectantes más comúnmente usados en la desinfección del agua.

Tabla 1.12 Comparación de los diferentes métodos de desinfección (Metcalf y Eddy, 1991)

Característica	Cloro	Hipoclorito de sodio	Hipoclorito de calcio	Ozono	UV
Toxicidad a microorganismos	Alta	Alta	Alta	Alta	Alta
Solubilidad	Ligera	Alta	Alta	Alta	N.A.
Estabilidad	Estable	Ligeramente estable	Relativamente estable	Inestable	Debe generarse al usarse
Toxicidad a formas de vida superiores	Alta	Tóxico	Tóxico	Tóxico	Tóxico
Homogeneidad	Homogéneo	Homogéneo	Homogéneo	Homogéneo	N.A.
Interacción con materia extraña	Oxida materia orgánica	Oxidante activo	Oxidante activo	Oxida materia orgánica	Moderada
Toxicidad a temperatura ambiente	Alta	Alta	Alta	Alta	Alta
Penetración	Alta	Alta	Alta	Alta	Moderada
Corrosión	Altamente corrosivo	Corrosivo	Corrosivo	Altamente corrosivo	N.A.
Capacidad desodorizante	Alta	Moderada	Moderada	Alta	Ninguna
Disponibilidad	Bajo costo	Costo bajo a moderado	Costo bajo a moderado	Costo de moderado a alto	Costo de moderado a alto

N.A. No aplica

1.3.1 FACTORES QUE INFLUYEN EN LA DESINFECCIÓN

La eficiencia del proceso de desinfección depende de factores que se deben considerar como son:

- Tiempo de contacto entre el desinfectante y el agua
- Tipo y concentración del agente químico
- Intensidad y naturaleza del agente físico
- Temperatura
- Número de microorganismos a ser destruidos
- Tipo de microorganismos
- Naturaleza del agua (calidad del agua a desinfectar)
- Condiciones de la mezcla

1.3.1.1 Tiempo de contacto entre el desinfectante y el agua

El tiempo de contacto es una de las variables más significativas en el proceso de desinfección. Se ha observado que para una concentración dada de desinfectante mientras mayor es el tiempo de contacto mayor será la eficiencia de desinfección. Esta observación fue formalizada por Chick, quien estableció la siguiente ley.

$$\frac{dN}{dt} = -kN_t \quad \text{Ecuación 1.1}$$

dónde:

N_t = número de microorganismos al tiempo t

t = tiempo

K = constante de inactivación, tiempo⁻¹

Si N_0 representa el número de microorganismos cuando $t = 0$, la Ecuación 1.1 queda:

$$\frac{N_t}{N_0} = e^{-kt} \quad \text{Ecuación 1.2}$$

$$\ln\left(\frac{N_t}{N_0}\right) = -kt \quad \text{Ecuación 1.3}$$

En algunos casos las velocidades de inactivación aumentan con el tiempo de contacto mientras que en otros es lo contrario. A este respecto Coleman *et al.*, (2013) revisaron la influencia del NaHCO_3 en la inactivación de *E. coli* utilizando TiO_2 y encontraron que la presencia de esta sal provoca un decrecimiento en la eficiencia bactericida debido a la competición del ion HCO_3^{-1} con las especies oxidantes causantes de la muerte del microorganismo. Por su parte Gourmelot *et al.*, (1994) encontraron que la Desinfección fotocatalítica del Agua (DFA) en presencia de Cl^{-1} en concentraciones superiores a 10 mmol/L es acelerada debido a que este ion produce cambios en la permeabilidad de la membrana celular, ocasionando un aumento en el flujo de sustancias nocivas al interior de la bacteria. Complementariamente Rincón y Pulgarin (2004) estudiaron el efecto de diversos iones como HCO_3^{-1} , HPO_4^{-2} , Cl^{-1} , NO_3^{-1} y SO_4^{-2} y determinaron que estas especies (especialmente HCO_3^{-1} y HPO_4^{-2}) retardan la velocidad de inactivación del microorganismo debido a la competencia por las especies oxidantes o al bloqueo de los sitios activos del TiO_2 .

1.3.1.2 Tipo y concentración del agente químico

Dependiendo del agente químico, se ha observado que la eficiencia de la desinfección está relacionada con la concentración del agente. El

efecto de la concentración se maneja empíricamente mediante la siguiente expresión.

$$C^n t_p = Cte \quad \text{Ecuación 1.4}$$

dónde:

- C = Concentración del desinfectante
- n = Constante
- t_p = tiempo requerido para inactivar un porcentaje de los microorganismos

El significado físico de esta ecuación puede ser evaluado al graficar en forma logarítmica la concentración del agente y el tiempo requerido para inactivar un porcentaje dado de los microorganismos (Ilustración 1.5).

La pendiente de la gráfica corresponde al valor de $-1/n$. Si n es mayor que 1, el tiempo de contacto es más importante que la dosis; si n es igual a 1 el efecto del tiempo y la dosis son iguales.

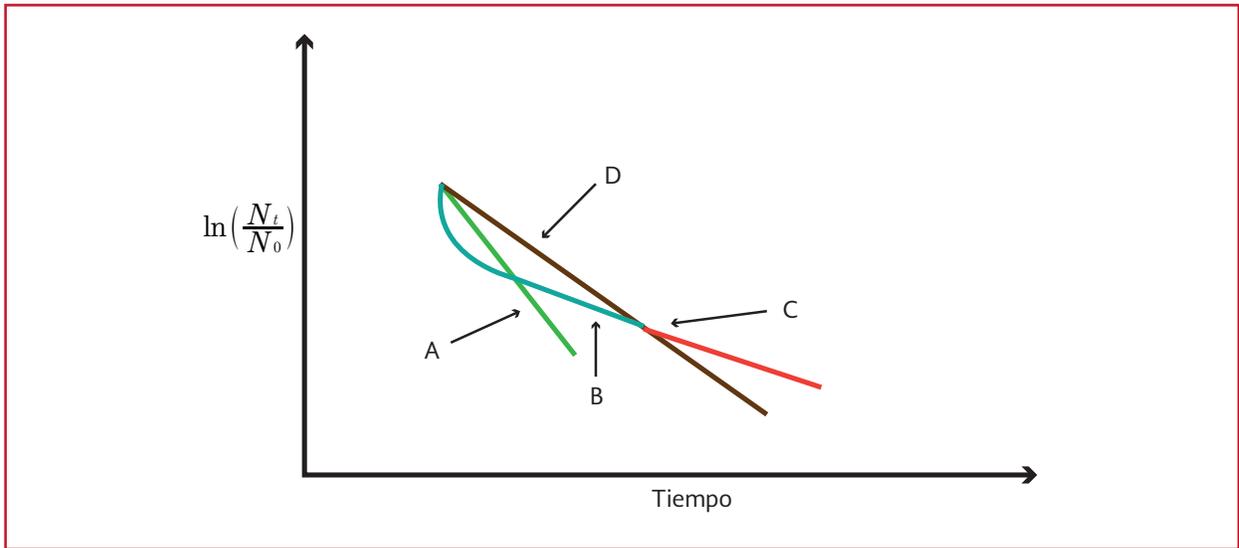
1.3.2 INTENSIDAD Y NATURALEZA DEL AGENTE FÍSICO

La efectividad de los agentes físicos como el calor o la luz UV dependen directamente de su intensidad. Si la inactivación de los microorganismos se puede describir con una ecuación de primer orden (como la Ecuación 1.1), entonces el efecto de la intensidad se refleja directamente en el valor de la constante de inactivación (k). O sea a mayor intensidad, mayor es la constante de inactivación.

1.3.2.1 Temperatura

Al incrementar la temperatura aumenta la velocidad de destrucción. Esta relación, es función del tiempo requerido para afectar determinado porcentaje de los microorganismos y está dada por la relación de Arrhenius.

Ilustración 1.5 Ley de Chick y las desviaciones comúnmente encontradas (Bitton, 1994)



$$\frac{\ln(t_1)}{t_2} = \frac{E(T_2 - T_1)}{RT_1T_2} \quad \text{Ecuación 1.5}$$

dónde:

t_1, t_2 = Tiempo para inactivar un porcentaje dado de la población a las temperaturas T_1 y T_2 (°K)

E = Energía de activación (J/mol)

R = Constante de los gases 8.314 (J/mol °K)

dónde:

N_0 = Número de microorganismos al tiempo 0

N_t = Número de microorganismos al tiempo t

t = Tiempo

k = Constante de eliminación (t^{-1})

En la mayoría de los casos, los datos muestran una desviación del modelo ideal de Chick como se muestra en la Ilustración 1.5, dónde:

1.3.2.2 Número de microorganismos

De acuerdo con la ley Chick, el grado de desinfección del agua, es proporcional al número de microorganismos y a la concentración del desinfectante, siempre y cuando la temperatura y pH del agua permanezcan constantes, esto es:

$$N_t = N_0 e^{-kt} \quad \text{Ecuación 1.6}$$

- La línea A representa la desactivación de un grupo homogéneo
- La línea B representa la desinfección de un grupo homogéneo pero más resistente
- La línea C representa la inactivación de un grupo heterogéneo de organismos parcialmente protegidos
- La línea D representa el modelo de Chick

De acuerdo con las relaciones anteriores se puede decir que a mayor concentración de mi-

croorganismos, mayor tiempo se requerirá para inactivarlos. Una relación empírica se da a continuación para referir esto:

$$C^q N_p = Cte \quad \text{Ecuación 1.7}$$

dónde:

- C = Concentración del desinfectante
- N_p = Disminución de la concentración de los microorganismos en un intervalo de tiempo fijo
- q = Constante relacionada con la fuerza del desinfectante

1.3.2.3 Tipo de microorganismos

La eficiencia de los diferentes agentes de desinfección es afectada por la naturaleza y condición

de los microorganismos. Por ejemplo, las bacterias en crecimiento viable son inactivadas fácilmente, mientras que las esporuladas son muy resistentes. En estos casos es recomendable utilizar otros agentes desinfectantes.

1.3.2.4 Naturaleza del agua

El agua debe ser caracterizada apropiadamente antes de aplicar cualquier agente desinfectante. Esto debido a que la presencia de diversos compuestos o materia orgánica pueden afectar en la eficiencia de desinfección.

Cuando la mezcla del agua y el desinfectante es homogénea, se obtiene buenos resultados.

2

INTRODUCCIÓN A LOS MÉTODOS DE DESINFECCIÓN

La desinfección dentro de los sistemas de potabilización y tratamiento de aguas residuales, es una medida esencial de salud pública, y su importancia se ha demostrado tanto en la teoría como en la práctica. El tratamiento adecuado y la desinfección fiable de agua permitieron reducir considerablemente la incidencia de la tifoidea y el cólera en muchos países antes de que se descubrieran los antibióticos y las vacunas. En todos los lugares donde se ha realizado adecuadamente la desinfección del agua, se han obtenido beneficios en la salud de los usuarios (OPS-COSUDE, 2007).

Los desinfectantes y el equipo de desinfección se deben seleccionar de modo que satisfagan

en lo posible las condiciones específicas de la aplicación a que se destinen teniendo en cuenta todos los factores que influyen en la fiabilidad, continuidad y eficacia de la desinfección, se debe considerar los costos, la eficiencia y posible automatización. En la Tabla 2.1 se muestran los principales métodos de desinfección.

2.1. MÉTODOS FÍSICOS

Algunos métodos físicos se caracterizan porque reducen la concentración de organismos por daño en la pared o membrana celular, o alteración de su fisiología, ocasionándoles la muerte. Los métodos físicos más comúnmente aplicados se describen a continuación.

Tabla 2.1 Principales métodos de desinfección del agua

Métodos Físicos	Filtración ¹
	Temperatura
	Radiación (solar, luz UV, Gamma)
	Procesos electrolíticos ²
Métodos Químicos	Yodo
	Bromo
	Plata
	Ozono
	Cloro

¹ La filtración no es un desinfectante como tal, está definida como una separación física que retiene los sólidos y permite el paso de los líquidos removiendo las partículas y materia coloidal no sedimentable, sin embargo se considera en este apartado porque, especialmente el filtro lento de arena, si se diseña y opera convenientemente puede ser considerado como un sistema de desinfección del agua. Por otro lado, la filtración por membranas y los filtros de ósmosis inversa, pueden eliminar virus, bacterias y protozoos, como se describe dentro de este mismo apartado

² Los procesos electroquímicos se consideran físicos, ya que la oxidación electroquímica no implica la adición directa de los productos químicos en el agua a tratar, a pesar de que los electrodos introducidos en el sistema generan especies químicas que son generalmente las responsables de la desinfección (Bhalchandra, 2013)

2.1.1 FILTRACIÓN

La filtración es solo una separación física, la cual consiste en hacer pasar una mezcla sólida-líquida a través de un medio poroso (filtro), que retiene los sólidos y permite el paso de los líquidos, remueve las partículas y materia coloidal no sedimentables; la eficiencia depende sólo del tamaño de los poros del medio filtrante. La fuerza motriz puede ser una diferencia de presión, la electricidad o el potencial de concentración. Se aplica solo o combinado después de la floculación biológica o química (Jiménez, *et. al.*, 1995). Dependiendo de la forma en que los sólidos son retenidos se conocen dos tipos principales de filtración:

- **Filtración superficial.** Se basa en un efecto de tamizado. Los sólidos no penetran en el medio filtrante, sino que son retenidos en su superficie. La condición para que esto suceda es que el tamaño de los poros del medio filtrante sea menor que el tamaño de las partículas sólidas. Como medios filtrantes se pueden utilizar tamices, telas, papel de filtro o membranas. Si el flujo incide perpendicularmente en la superficie, se habla de filtración de torta
- **Filtración de lecho profundo.** En la filtración de lecho profundo, el agua bruta atraviesa un medio filtrante depositado en forma de lecho. Como medios filtrantes se usan frecuentemente arena y grava. El agua bruta fluye por los intersticios del lecho filtrante, donde se retienen los sólidos

En función de la velocidad de paso del agua se conocen los filtros lentos (<1 m/h) y los rápidos (>2 m/h). De entre las diversas variantes, los que se emplean específicamente para remover patóge-

nos son los filtros lentos de arena para agua potable y los procesos de membranas en agua residual y potable, donde destaca la nanofiltración.

2.1.1.1 Filtros de arena

Los filtros de arena no eliminan normalmente las bacterias o los virus, pero puede eliminar la turbiedad, los *quistes* y *protozoarios*. Cuando se utilizan debidamente, los filtros de arena domésticos pueden funcionar eficazmente aún con agua ligeramente turbia como tratamiento preliminar antes de hervirla o desinfectarla (OPS/OMS, 1993).

2.1.1.2 Filtros de cerámica

Su componente esencial es la vela o bujía que puede ser de diferentes materiales cerámicos que proporcionan diferentes tamaños de poros. El agua que se va a filtrar debe estar relativamente limpia ya que, de lo contrario, la vela se tupidaría rápidamente. Estos filtros pueden extraer quistes, protozoarios y cercarias, así como partículas en suspensión, pero es posible que no se eliminen las bacterias y los virus, requiriéndose que el agua se hierva o se desinfecte antes del consumo (OPS/OMS, 1993).

2.1.1.3 Filtros de membrana

Los filtros de ósmosis inversa pueden eliminar virus, bacterias y protozoos, pero, son costosos y el pequeño tamaño de sus poros puede ocasionar la obstrucción de estos, en el caso de que el agua posea sólidos en suspensión. Aquellos cuyo diámetro de poro se encuentra entre 0.1 – 0.3 mm pueden remover bacterias y protozoos, pero no virus. Igualmente se comercializan filtros con resinas impregnadas con yodo, las que son efectivas contra las bacterias, mientras el yodo puede eli-

minar algunos virus. Sin embargo, el tiempo de contacto con el yodo es muy corto para eliminar protozoos como *Cryptosporidium* y *Giardia* (National Center for Infectious Diseases, 2004).

Es importante señalar que los filtros fabricados para remover *Giardia* y *Cryptosporidium* deben presentar alguna de los siguientes mensajes: ósmosis inversa, diámetro de poro de 1 mm o menor o probado y certificado para remoción de quistes.

2.1.2 TEMPERATURA

Es un método efectivo para desinfectar pequeñas cantidades de agua, aun si presenta contenido de materia orgánica. Al hervir el agua se logra la eliminación de los agentes patógenos presentes en ella. Para ello se debe garantizar la ebullición vigorosa de todo el líquido durante, al menos, uno a tres minutos.

Los quistes de *amebas* se destruyen en dos minutos en el agua a 50° C, mientras los de *Giardia* se inactivan de inmediato cuando son sometidos al agua hirviendo. Los virus también son inactivados luego de aproximadamente 1 a 3 minutos de exposición al agua en ebullición.

Sin embargo, hervir el agua tiene varias desventajas, siendo la más importante el hecho de que no proporciona protección contra la recontaminación, por lo que debe tenerse especial cuidado en su conservación y posterior manipulación. Además, el sabor del agua hervida suele ser desagradable y, aunque la aireación puede mejorarlo, no se recomienda por la posibilidad de recontaminación que esto representa (González, 2004).

Hervir el agua es un método excelente para destruir todo tipo de microorganismos, ya sean

bacterias, quistes de protozoarios, huevos de helminto o virus. Sin embargo, y debido a su alto costo, sólo se practica para desinfectar volúmenes pequeños de agua a nivel doméstico aunque con frecuencia sirve para la fabricación de medicamentos y reactivos de laboratorio, donde el proceso es conocido como destilación. Una aplicación interesante por su bajo costo pero aún en estudio es la destilación solar.

2.1.3 RADIACIÓN (SOLAR Y LUZ UV)

Constituye un método eficiente para la desinfección de aguas claras y su efectividad decrece en aguas turbias, requiriendo algún proceso auxiliar (por ejemplo, filtración). Los efectos germicidas provienen de la luz ultravioleta la cual daña al ácido ribonucleico (ARN, ácido nucleico que se encuentra en el citoplasma celular y que sirve para ordenar el funcionamiento de la célula de acuerdo las instrucciones del ADN) y al ácido desoxirribonucleico (ADN, ácido nucleico que se encuentra principalmente el núcleo de la célula. Contiene la información del código genético del organismo) de los organismos. Debido a que el ADN y ARN transportan y procesan la información genética para la reproducción y el funcionamiento del organismo, su daño inactiva efectivamente a la célula. Tiene el inconveniente de que puede haber fotoreactivación, esto es, que la célula sane y como no hay un efecto desinfectante residual puede haber recrecimiento. Este proceso se aborda a detalle en el capítulo 5.

2.1.4 RADIACIÓN GAMMA

Entre las distintas formas de radiación electromagnética se han utilizado, debido a su poder de penetración, los rayos gamma para desinfectar el agua residual, y pueden ocasionar efectos

beneficiosos adicionales en tratamientos terciarios, por alterar las moléculas orgánicas e inorgánicas. La fuente idónea es el Cobalto-60. Debido al alto coste de la energía de radiación. El costo de producción, así como la seguridad de su manejo son una fuerte limitación (Cáceres, 1990).

2.1.5 PROCESOS ELECTROLÍTICOS

Consisten en hacer pasar el agua a través de cámaras equipadas con electrodos, a los cuales se les aplica una corriente eléctrica. Bajo ciertas condiciones, reduce simultáneamente sólidos suspendidos y microorganismos presentes, incluyendo virus (Wolfgang, 1985). El consumo energético es de aproximadamente 4.5 W/h por cada litro de agua tratada (Caceres, 1990).

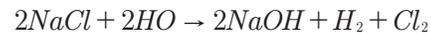
Es una técnica electroquímica de tratamiento de aguas donde se genera hipoclorito de sodio *in situ*, mediante electrólisis de cloruro de sodio (Hinkebeint T. 2005). Para que el proceso tenga lugar se puede aplicar de dos formas; añadiendo cloruro de sodio al agua a tratar o usando agua de mar.

En el proceso se generan varios agentes desinfectantes muy poderosos; Hipoclorito, a partir de la electrólisis; Oxígeno, es un producto de la hidrólisis del agua que colabora en la destrucción de organismos secundarios; Ozono y oxidrilo radical se producen en las reacciones que ocurren en el ánodo y cátodo, ambos son poderosos desinfectantes. El proceso químico de la electrólisis y los productos generados en el proceso se describen mediante la siguiente serie de reacciones.

Las reacciones que se llevan a cabo en los procesos electroquímicos son las siguientes:

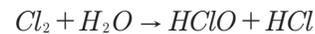
En la electrocloración;

1. En el ánodo se produce cloro (Cl_2) mediante la siguiente reacción:



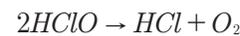
Ecuación 2.1

2. Este cloro generado *in situ* se disuelve en el agua formando ácido hipocloroso:



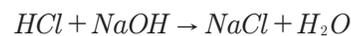
Ecuación 2.2

3. El ácido hipocloroso oxida la materia orgánica, esterilizando así el agua:



Ecuación 2.3

4. Una vez desinfectada el agua, el ácido clorhídrico (HCl) reacciona con el hidróxido de sodio (NaOH) mediante una reacción de neutralización para generar sal y agua:



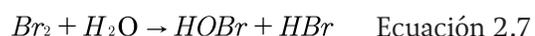
Ecuación 2.4

Se trata de un sistema cerrado, donde no hay pérdida de ninguno de los productos, éstos se descomponen, actúan y se regeneran (Martin, 2009; Holt *et al.*, 2005; Hinkebein y Price, 2005).

2.2. MÉTODOS QUÍMICOS

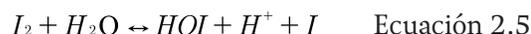
Se utilizan fuertes agentes oxidantes, aunque no necesariamente todo oxidante es un buen desinfectante. La acción desinfectante, teóricamente se realiza en dos etapas; primero penetran la pared celular y luego reaccionan con las enzimas, paralizando el metabolismo de la glucosa y provocando con ello la muerte del organismo. La eficiencia depende del tipo de microorganismo

involucrado, lo que parece estar determinado por la resistencia de su membrana celular y por la concentración del reactivo (Bitton, 1994); a continuación se presentan algunos ejemplos.



2.2.1 YODO

Todos los halógenos son desinfectantes. El yodo es el de mayor peso atómico y por su bajo poder oxidante resulta el más estable; por esta razón sus residuales se conservan mucho más tiempo que los del cloro. El mecanismo de desinfección es similar al del cloro pues al contacto con el agua produce ácido hipoyodoso.



Con una dosis de 0.5 mg/L se destruye el 99.99 por ciento de *Escherichia coli* en un minuto y de quistes de amebas en 100 minutos (Cáceres, 1990). Su desventaja radica en que su aplicación requiere el uso de un neutralizante, por lo que resulta costoso para ser usado en grandes volúmenes de agua. Aún no se han determinado con exactitud sus efectos secundarios. En la Tabla 2.2 se presentan algunas aplicaciones del yodo.

2.2.2 BROMO

Halógeno al fin, comparte el papel de desinfectante, aunque su poder es menor que el del cloro o el yodo. Las reacciones son también similares y forma ácido hipobromoso y bromoaminas, asimismo reacciona con compuestos orgánicos. Las bromoaminas también son agentes desinfectantes.

El ácido no disociado es un agente desinfectante más efectivo que el ion en sí. Para dosis iguales, el bromo es más efectivo que el cloro a valores de pH por arriba de 4. Sin embargo, su costo es más elevado (Droste, 1997). Se recomienda su uso en albercas ya que Tiene propiedades algicidas.

2.2.3 PLATA

2.2.3.1 Plata coloidal

La plata coloidal es obtenida por procesos químicos o eléctricos, ésta constituida por pequeñas partículas o micles de plata metálica de un tamaño generalmente comprendido entre 0.015 a 0.005 micrones. Nanopartículas depositadas en determinados medios líquidos de dispersión que permiten formar coloides protectores de naturaleza proteínica, con lo que se aumenta la estabilidad al formar alrededor de cada micela de plata un retículo que las recubre y protege, tendiendo las partículas a cargarse eléctricamente por la pérdida de iones, la plata en su forma coloidal no elimina a los virus, pero se considera eficaz para destruir diversas bacterias (*E. Coli*, *Staphilococcus Aureus*, *Pseudomonas*, *Aspergillus*, fecales). El mecanismo de desinfección actúa por la inactivación de las enzimas de las células bacterianas y hongos que usan oxígeno para su metabolismo, causando una disfunción celular.

Tabla 2.2 Aplicaciones del yodo

Desinfectante	Aplicación	Observaciones
Yodo	Para pequeñas cantidades (como en las cantimploras)	Se puede aplicar en forma de tabletas (peryoduro de tetraglicina) que equivalen a una dosis de yodo de 5 a 7 mg/L
	En situaciones de emergencia Uso doméstico	Aplicada como tintura de yodo (6.5 g yodo/100 mL) por lo que se recomienda añadir 3 gotas por litro de agua con tiempo de contacto de 15 minutos

Aunque en tiempos muy variables y dependiendo también de la temperatura, a temperaturas menores de 10 °C, se requieren tiempos muy largos, lo que hace difícil determinar su poder germicida con exactitud. Debido a la lentitud en las reacciones de eliminación de materia orgánica, se considera que la plata coloidal no posee un buen poder residual. Dosis recomendada 0.025 a 0.075 mg/Litros.

También se recomienda en albercas (0.05 ppm de concentración expresada en plata). En la Tabla 2.3 se presentan algunas de sus aplicaciones.

2.2.3.2 Plata iónica

La plata iónica está constituida por iones, es decir, átomos que han perdido un electrón quedando con una carga positiva, Para ser eficaces, los iones de plata deben interactuar con el microorganismo y penetrar en él, la plata se introduce en el interior de la célula a través de unos transportadores de metales presentes en su membrana, compitiendo con ellos por los lugares de captación, actúan interfiriendo en la permeabilidad gaseosa de la membrana (respiración celular) y una vez en el interior de la célula, alteran el sistema enzimático, inhibiendo su metabolismo y producción de energía y modificando su material genético. El resultado es que el microorganismo pierde rápidamente toda capacidad de crecer y reproducirse. La plata iónica destruye las bacterias, hongos, virus y protozoos.

Tabla 2.3 Aplicaciones de la plata ionizada

Desinfectante	Aplicación	Observaciones
Plata ionizada	Desinfección de albercas	Se aplican generalmente 0.15 mg/L (Aguilar, 2006)
	Purificación de agua para usos industriales Uso doméstico (ej. en filtros)	Los cloruros, el amoníaco y la materia orgánica interfieren en la desinfección

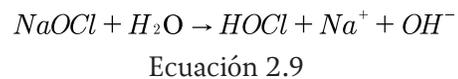
2.2.4 CLORO

Es un desinfectante de gran poder bactericida, aún en dosis pequeñas. Es económico y de fácil empleo, aunque requiere precaución en su manejo. Es el reactivo más usado a nivel mundial tanto en los sistemas de agua potable como residual. Este proceso se aborda a detalle en el capítulo 4.

2.2.4.1 Derivados del cloro

a) Hipoclorito de sodio

Se presenta en estado líquido con un color amarillo verdoso. Se produce al disolver cloro gaseoso en hidróxido de sodio. La reacción entre el hipoclorito de sodio y el agua es:



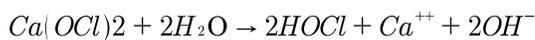
La Ecuación 2.9 es muy similar a la hidrólisis del cloro gaseoso. Sin embargo, en ésta se produce un ion hidroxilo, el cual incrementa el pH del agua

Generalmente, las soluciones de grado industrial y comercial (blanqueadores de ropa) tienen un contenido de hipoclorito del 10 al 16 por ciento. El principal problema es que son inestables y su estabilidad depende de la concentración del hipoclorito, la temperatura de almacenamiento, tiempo, las impurezas y la exposición a la luz. La descomposición del hi-

poclorito afecta las tasas de dosificación y genera subproductos indeseables

b) Hipoclorito de Calcio

El hipoclorito de calcio es el precipitado que se forma al disolver cloro gaseoso en una solución de óxido de calcio (CaO) e hidróxido de sodio (NaOH). Se presenta en estado sólido, ya sea en forma granular de color blanquecino con 30 a 70 por ciento de cloro activo, o bien, como tabletas (con 70 por ciento). La reacción del hipoclorito de calcio con el agua es como sigue:



Ecuación 2.10

La Ecuación 2.10 muestra que la aplicación del hipoclorito de calcio al agua produce también ácido hipocloroso lo que disminuye el pH. El hipoclorito de calcio nunca debe ser almacenado en lugares con alta temperatura o en contacto con materiales orgánicos de fácil oxidación. Las dosis aplicadas de cloro gaseoso varían de 1 a 16 mg/L, pues en ocasiones se emplea tanto como oxidante y desinfectante. Para el caso del hipoclorito de sodio se usan de 0.2 a 1 mg/L y calcio de 0.5 a 5 mg/L. Los usos de estos úl-

timos, se encuentran limitados debido a su mayor costo

2.2.5 OZONO

Además de ser un buen desinfectante, el ozono es desodorante y decolorante. Es poco soluble en agua y muy volátil, se mantiene en solución durante algunos minutos después de su aplicación (sólo el 10 por ciento de su producción).

La eficiencia microbicida del ozono es alta, en tiempos cortos. La razón por la que la rapidez de acción es tan distinta entre el ozono y el cloro se debe a que, aunque ambos son oxidantes el mecanismo de eliminación es diferente. El ozono mata a las bacterias por ruptura de la membrana celular (Nebel, 1982). Tiene un gran poder de eliminación de virus y se recomienda incluso con aguas altamente contaminadas.

Además, el ozono ataca a los precursores de los *trihalometanos*, a éstos ya formados y a los plaguicidas. Sin embargo, su costo es elevado y las instalaciones requeridas son complejas. El consumo de energía eléctrica es de alrededor de 30 kW/h por kilo de ozono (Cáceres, 1990). Este proceso se aborda a detalle en el capítulo 6.



3

DESINFECCIÓN EN ZONAS RURALES

Los organismos responsables del suministro de agua potable no tienen una amplia cobertura o no son suficientes en las zonas rurales de nuestro país, diversas causas como la falta de recursos económicos o técnicos pueden ser los motivos, es bien conocido la amplia variedad de enfermedades infecciosas que provoca el consumo de agua contaminada con microorganismos, ante tal situación, diversos métodos de desinfección (físicos y químicos) de mayor aplicación en zonas rurales o marginadas son descritas a continuación como alternativas de tratamiento.

3.1. MÉTODOS FÍSICOS DE DESINFECCIÓN

3.1.1 RADIACIÓN SOLAR

La exposición de microorganismos a lapsos de tiempo con suficiente intensidad de los rayos UV que son generados por la energía solar provoca un daño al ácido desoxirribonucleico (ADN) o ribonucleico (ARN) de las células microbianas teniendo como consecuencia la inactivación bacteriana y por lo tanto una mejora en la calidad bacteriológica del agua.

La luz ultravioleta (UV) es la luz con longitudes de onda comprendidos entre 100 y 400 nm

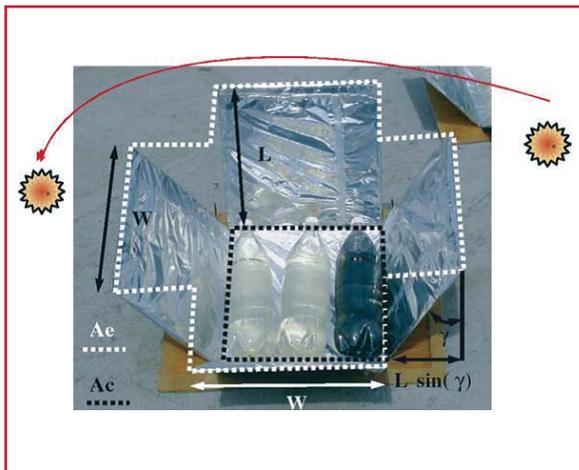
y se subdivide en UV-A (400-315 nm), UV-B (315-280 nm) y UV-C (280-100 nm), la inactivación de mayor efectividad ocurre en el rango UV-C Sin embargo, solo las ondas de UV-A y UV-B llegan a la superficie de la Tierra y la combinación de estas a altas temperaturas 50 a 60 °C, tienen el potencial de inactivar la mayoría de los contaminantes microbiológicos (Kendricks *et al.*, 2013).

3.1.2 CONCENTRADO SOLAR

En el agua, si bien hay algunas bacterias con capacidad de esporular, lo que las hace particularmente resistentes al calor, en general puede afirmarse que la mayoría de las bacterias mueren entre los 40 y los 100 °C, mientras que las algas, protozoarios y hongos lo hacen entre los 40 y los 60 °C. Un concentrado solar es un dispositivo que concentra los rayos ultravioleta de la radiación solar sobre un absorbedor, tiene la finalidad de incrementar el flujo de radiación sobre los receptores, en este caso recipientes con agua que se coloca en botellas que pueden estar parcialmente pintadas de color negro (el efecto de la pintura hace que los rayos ultravioleta sean absorbidos con mayor intensidad) y se deja a la exposición de los rayos UV durante un cierto tiempo, le eficiencia dependerá de la radiación solar de cada zona y de la turbiedad del agua que

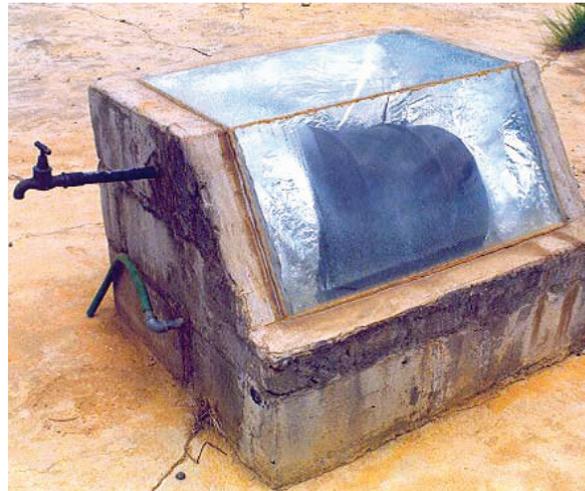
no debe ser mayor a 30 NTU, puede usarse tanto vidrio como tereftalato de polietileno (PET) ya que son materiales apropiados para lograr una efectiva inactivación de microorganismos (Asiimwe et al., 2013). Un estudio realizado con un concentrador solar (Ilustración 3.1) en zonas rurales del estado de Chihuahua, Martín et al., 2005 encontraron que un tiempo de exposición de dos horas a 65 °C es suficiente para tener una desinfección total de microorganismos ya que no se detectaron coliformes totales ni *Escherichia coli* después del tratamiento.

Ilustración 3.1 Concentrador solar para la desinfección de agua (Martín et al., 2005)



La Ilustración 3.2 muestra otro prototipo de aplicación para zonas marginales donde se utiliza un concentrador solar. En su interior tiene láminas de aluminio colocadas en tal forma que se tenga la mayor exposición a los rayos del sol, de ahí su grado de inclinación, se tiene un tanque de lámina recubierto con pintura negra y es expuesto durante el día, una vez que se retira el agua desinfectada mediante el grifo de salida el tanque es nuevamente llenado mediante una manguera adaptada al tanque.

Ilustración 3.2 Concentrador solar aplicado en zonas rurales (OPS-CEPIS, 2002)



Según el CEPIS, 2002 se ha tomado como regla que para un agua cristalina (con turbiedad menor de 5 UTN) se puede asegurar un razonable nivel de seguridad en la desinfección con un tiempo de 30 minutos a 65 °C o 75 °C durante 15 minutos. Desde un punto de vista práctico y operativo estas condiciones de temperatura se aseguran en zonas soleadas con exposiciones de cuatro a cinco horas en el período de máxima radiación, un aspecto importante de la aplicación de esta técnica es que no se han reportado subproductos de desinfección. Diversos factores son implicados en la desinfección solar, estos son mostrados en la Tabla 3.1.

3.1.3 TEMPERATURA

Una alternativa de desinfección a bajo costo que es aplicada en comunidades rurales o marginales es la ebullición (Ilustración 3.3) que consiste en elevar la temperatura del agua por arriba de los 60° C y mantener esa condición por espacio de unos cinco a diez minutos. El resultado es la inactivación de la mayoría, sino de todos,

Tabla 3.1 Factores que actúan en la eficiencia de la desinfección solar

Factor	Efecto sobre la eficiencia de desinfección	Referencia
Compuestos orgánicos (ácidos húmicos)	Absorben los rayos solares reduciendo la intensidad sobre las células bacterianas.	Davies and Evison (1991)
Compuestos inorgánicos	Actúan de forma sinérgica con los rayos solares y promueven la inactivación microbiana	Vicars (1999)
Oxígeno disuelto	Se ve favorecida con presencia de oxígeno disuelto por la posible fotooxidación que provocan las especies de oxígeno.	Reed et al., (2000)
Intensidad de luz y calidad	290 -350 nm corresponde a la región espectral de radiación UVB y UVA, esta es la región óptima de desinfección del agua.	Acra et al., (1984) Oates et al., (2003) Joyce et al., (1996)
Temperatura	Valores por arriba de 40 y 50 °C provoca una efectiva inactivación de microorganismos.	Wegelin et al., (1994)
Contenedor de agua	Vidrio transparente y recipientes de PET son materiales adecuados para la desinfección solar.	Acra et al., (1984) Conroy et al., (1996)
Turbiedad	La inactivación microbiana disminuye a valores elevados de turbidez (300 NTU) ya que las partículas suspendidas absorben los rayos UV.	Acra et al., (1984) Wegelin et al., (1994) Kehoe et al.,(2001)
Tipos de microorganismos	Los virus requieren dos veces la dosis de radiación solar que las bacterias, los hongos requieren entre 3 y 6 horas para su inactivación dependiendo de las especies irradiadas. Lo quistes son inactivados por efectos térmicos en 10 minutos a 56 °C.	Reed (1997) Wegelin et al., (1994) Ciochetti y Metcalfe (1984)

los microorganismos presentes (CEPIS, 2002). El costo sin embargo resulta elevado por el consumo del energético (gas, energía eléctrica, madera), debe hervirse solamente la cantidad de agua considerando el consumo diario ya que no se puede almacenar el agua por mucho tiempo debido al riesgo de una posible incorporación de microorganismos presentes en el entorno.

La temperatura es uno de los parámetros ambientales más comunes que condicionan el crecimiento y la supervivencia de los microorganismos, afecta la velocidad de crecimiento y por lo tanto el tiempo de generación. Algunos mi-

Ilustración 3.3 Ebullición de agua en zonas rurales, técnica de desinfección



croorganismos a bajas temperaturas (0 – 7° C) tienen un efecto bacteriostático, es decir las bacterias no se multiplican debido a que la tasa metabólica se reduce. El calentamiento de agua a temperaturas de 72 °C inactiva microorganismos patógenos y a algunos no patógenos, pero no tiene efecto sobre las esporas. (Tortora et al., 1997).

3.1.4 DESINFECCIÓN CON LUZ UV

El Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA), desarrolló un estudio piloto para desinfectar agua de forma casera en comunidades rurales, se evaluó el funcionamiento del dispositivo de desinfección. La Ilustración 3.4 muestra el prototipo evaluado, se trata de un sistema sencillo que opera por gravedad con tiempo de contacto de 44 segundos a un flujo de 5 L/min, el agua cruda se desplaza desde la cubeta ubicada sobre una repisa, entra al tubo que contiene la lámpara germicida de 15 Watts conectada en corriente de 110-115 Volts

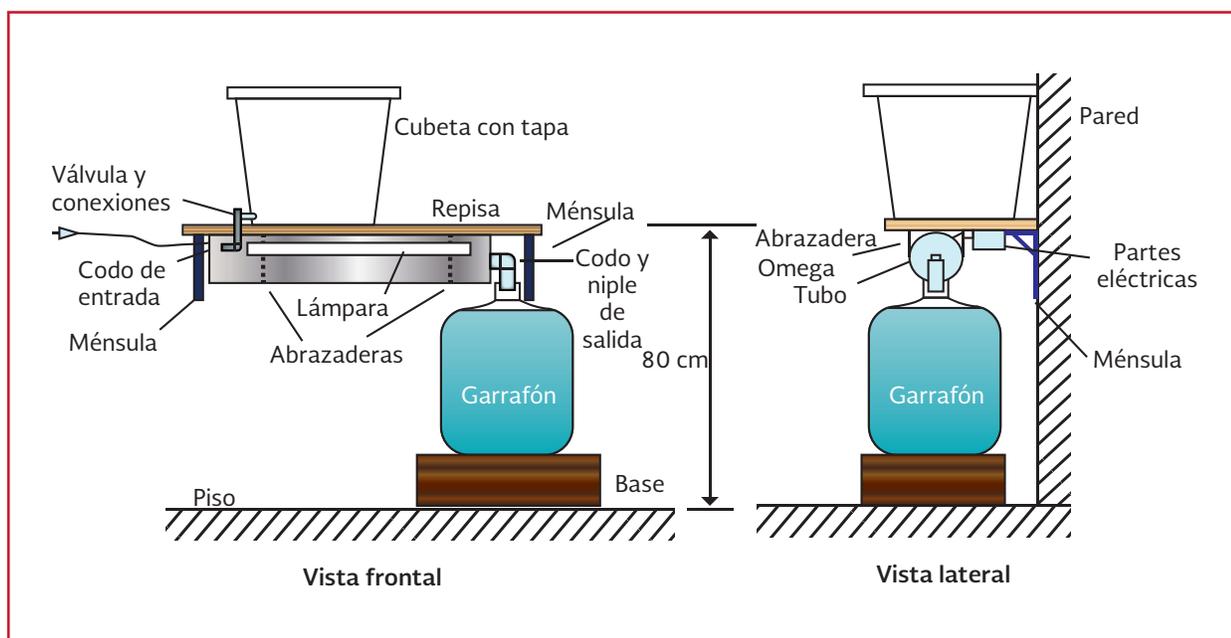
con una dosis de radiación de 860 y 1050 J/m², finalmente el agua es colectada en un garrafón. Posterior a la desinfección con UV, deben mantenerse cerrados los recipientes de agua desinfectada ya que esta técnica no deja efectos residuales que protejan la calidad bacteriológica.

El dispositivo evaluado tuvo una buena aceptación por ser muy práctico de instalar y de operar además de que los resultados de las pruebas de desinfección mostraron elevadas eficiencias de inactivación de microorganismos.

3.1.5 TAMIZADO

La técnica consiste en hacer pasar el agua a través de un manto de tela o algodón limpio que sea suficientemente cerrado el tejido, de esta manera se removerá una cierta cantidad de sólidos suspendidos en los cuales pueden estar alojados bacterias, virus o cualquier otro microorganismo. Esta práctica es aplicada a nivel domiciliario en lugares con alta marginación, aunque no

Ilustración 3.4 Vista frontal y lateral del equipo de desinfección con UV para comunidades rurales



se tiene una completa desinfección sin embargo contribuye a que la densidad bacteriana disminuya en el agua de consumo.

3.1.6 FILTRACIÓN EN FILTROS DE CANTERA

Los filtros de cantera están constituidos por andesita, comúnmente es conocida como cantera café debido al color que adquiere al estar húmeda. La filtración es realizada de manera lenta (goteo constante o intermitente) debido a la estrecha porosidad de la cantera, esto hace que solo el agua traspase dicho material quedando libre de partículas como bacterias y sólidos suspendidos que se quedan retenidos en la superficie de la cantera. Es un método efectivo para realizar la desinfección de forma casera, de fácil aplicación y de inversión inicial baja.

Un aspecto a considerar es que el filtro siempre se debe mantener con agua ya que si se deja secar por más de 6 horas la calidad del agua tratada es afectada, ante tal situación se recomienda que continuamente sea llenado dependiendo del tiempo que tarda en filtrarse. La cantidad de agua filtrada o libre de microorganismos dependerá de la capacidad volumétrica de cada filtro artesanal que es construido tomando en consideración el volumen de agua requerido para el consumo en cada familia. La Ilustración 3.5 muestra un prototipo del filtro artesanal de cantera, el agua filtrada debe procurarse mantener en recipientes perfectamente cerrados para evitar recontaminación bacteriológica.

Ilustración 3.5 Filtro artesanal de cantera (cortesía de la empresa Agua Viva)



3.1.7 FILTROS DE CARTUCHO

Este tipo de filtros son una buena opción para la desinfección de agua en las zonas rurales sin la necesidad de una gran inversión. Pueden conseguirse en el mercado y debe seguirse las especificaciones del producto, son filtros purificadores conformados por un porta cartucho o carcasa y el elemento filtrante de porosidad fina (cartuchos de papel o fibras sintéticas reemplazables) que retienen partículas de arena, lodo y de forma eficiente los microorganismos del agua. Algunos están elaborados además con carbón activado que sirve para eliminar sabores y olores desagradables (Ilustración 3.6).

Ilustración 3.6 Filtros de cartucho disponibles en el mercado



En la superficie del medio filtrante se forma una capa constituida por material de origen orgánico, conocida con el nombre de “schmutzdecke” o “piel de filtro”, a través de la cual tiene que pasar el agua antes de llegar al propio medio filtrante. El schmutzdecke o capa biológica está formado principalmente por algas y otras numerosas formas de vida, como plancton, diatomeas, protozoarios, rotíferas y bacterias. La acción intensiva de estos microorganismos atrapa, digiere y degrada la materia orgánica contenida en el agua. Las algas muertas, así como las bacterias vivas del agua cruda son también consumidas en este proceso. Al mismo tiempo que se degradan los compuestos nitrogenados se oxigena el nitrógeno (OPS-CEPIS, 2002).

3.1.8 FILTRACIÓN LENTA EN ARENA

La filtración lenta en arena (FLA) es una de las tecnologías más antiguas y efectivas para el tratamiento de agua superficial en regiones rurales (Hijnen et al., 2007). FLA se utiliza principalmente para eliminar la turbiedad del agua, pero si se diseña y opera convenientemente puede ser considerado como un sistema de desinfección del agua. El proceso consiste en filtrar el agua lentamente a través de una cama porosa de arena, el agua entra a la superficie del filtro y luego drena por el fondo (Ilustración 3.7).

Ilustración 3.7 Filtro lento de arena en comunidad rural



Los aspectos más importantes a considerar en el diseño de los filtros de arena se mencionan en la Tabla 3.2 y la Tabla 3.3, tanto en los lechos de soporte como para el medio filtrante.

Tabla 3.2 Consideraciones del lecho de soporte

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

Tabla 3.3 Consideraciones del medio filtrante

Tamaño efectivo (mm)	0.15- 0.45
Coefficiente de uniformidad CU	1.5 – 4.0
Altura del medio filtrante (m)	0.5 – 1.0

El parámetro de diseño más importante en un FLA es la velocidad de filtración (Vf), esta debe tener un valor en el rango comprendido entre 0.1 m³/(m² h) y 0.3 m³/(m² h). Los filtros lentos de arena tienen un mejor funcionamiento en condiciones de flujo constante por lo tanto deben trabajarse las 24 horas del día, siempre que sea posible se recomienda la dosificación de cloro en la cámara de salida y la previsión de un tanque de contacto de agua con el desinfectante antes del sistema de almacenamiento y distribución ya que después de la limpieza del filtro de arena, este pierde su capacidad de filtración y retención de microorganismos y puede tardar en recuperarse hasta 4 días después, una gran ventaja de estos filtros es que alcanzan carreras de filtración entre 1 a 3 meses cuando se tienen turbiedades menores a 10 NTU (Wegelin et al., 1998).

Cleasby, 1991 recomienda que para el buen funcionamiento de los filtros lentos de arena usados para desinfección los niveles de turbiedad deben ser menores a 5 NTU, el hierro menor a 0.3 mg/L y manganeso menor a 0.05 mg/L, el agua no debe tener contaminantes inorgánicos tales como el arsénico ya que su presencia disminuye la actividad microbiológica en la superficie del medio filtrante.

La temperatura es un factor que influye en la tasa metabólica de los microorganismos alojados sobre la superficie de la capa fina de arena ya que es más intensa a temperaturas cálidas que frías, de ahí la importancia de operar este tipo de filtros en climas apropiados (Logsdon, 2008).

3.2. MÉTODOS QUÍMICOS DE DESINFECCIÓN

3.2.1 APLICACIÓN DE CLORO

La desinfección con cloro es el tratamiento más utilizado en las zonas rurales, la forma más común la aplicación del hipoclorito de calcio directamente en los tanques de almacenamiento en las comunidades (INEGI, 2014). El uso del cloro es debido a que es confiable, económico y por el efecto residual ya bien conocido, se recomienda que después de la aplicación se debe dejar al menos 30 minutos de tiempo de contacto antes de que el agua sea consumida para asegurar una completa inactivación de microorganismos. La NOM 127-SSA1-1994, recomienda una concentración comprendida entre 0.5 y 1.5 mg/L de cloro residual en el agua de consumo para asegurar protección bacteriológica. La Tabla 3.4 muestra las formas más utilizadas de cloro para la desinfección en comunidades rurales.

3.2.1.1 Cloración a nivel domiciliario

A nivel domiciliario es posible la desinfección utilizando hipoclorito de sodio que tiene los blanqueadores comerciales, generalmente están concentrados al 5 por ciento. No debe utilizarse productos que contengan otros químicos a parte del hipoclorito de sodio. La Tabla 3.5 muestra las cantidades de cloro que deben aplicarse para ciertos volúmenes de agua a desinfectar.

Tabla 3.4 Formas de cloro comunes en sistemas pequeños de abastecimiento

Producto químico	Nombre comercial	Característica	Contenido de cloro	Empaque
Cloro Cl ₂	Cloro gaseoso	Gas licuado a presión	99.8 %	Cilindros de 40 y 70 Kg
Hipoclorito de calcio (CaOCl) ₂	HTH, percloron	Polvo granuloso o tabletas, estable, pero puede iniciar combustión en presencia de sustancias orgánicas	65-70 %	Latas, tambores o baldes plásticos de 15, 45 y 135 Kg
Hipoclorito de sodio NaOCl	Blanqueador líquido	Líquido amarillo pálido. Pierde potencia rápidamente a concentraciones mayores a 7 %	1-15 %	Diversos tamaños en botellas o recipientes de plástico
Cal clorada	Polvo blanqueador	Polvo blanco. Se deteriora rápidamente en presencia de la luz solar o de temperaturas altas	15-35 %	Tambores de 45-135 Kg. Bolsas de 25-40 Kg

Fuente: Wegelin et al., 1998.

Tabla 3.5 Relación del volumen de cloro con respecto a agua a desinfectar

Volumen de agua (L)	Blanqueador (mL)
10	0.5- 1.0
20	1.0-2.0
50	2.5-4.0
100	4.0- 7.0
200	10.0- 15.0

3.2.1.2 Cloración a nivel comunidad

A nivel comunitario si se tiene un flujo de agua constante, una forma de desinfección es aplicando cloro mediante un gotero en el punto más cercano al tubo de salida del cárcamo, la solución se prepara en garrafas o tambos de plástico perfectamente cerrados para evitar que el cloro se volatilice y disminuya su concentración, se regula el flujo del gotero de tal forma que la concentración de cloro residual en el agua quede entre 0.5 y 1.5 mg/L. Debe prepararse una cantidad suficiente de solución de cloro que permita desinfectar por varios días de trabajo (recomendable una preparación por semana) con el fin de facilitar el trabajo y tener un adecuado control de la dosis de cloro (Ilustración 3.8).

Ilustración 3.8 Monitoreo de cloro residual en comunidades rurales



Otra forma de desinfección en los cárcamos de bombeo es la aplicación de pastillas de hipoclorito de calcio o de sodio, estas se colocan en una malla y mediante un hilo se cuelgan de tal manera que queden sumergidas, ahí permanecen hasta que se disuelven por contacto del agua (erosión hídrica), la principal desventaja de esta técnica es que no se tiene control de la dosis de cloro.

3.2.2 APLICACIÓN DE YODO

El yodo es un desinfectante eficaz contra bacterias, virus, quistes y otros microorganismos que provocan enfermedades hidrotansmisibles, sin embargo su disponibilidad y uso han sido limitados, su costo es de 6 hasta 10 veces mayor que el cloro. Al igual que el uso de cloro, la turbiedad puede interferir en la desinfección ya que si hay partículas presentes en el agua, estas pueden proteger a los microorganismos. Después de la aplicación de yodo, el agua debe mezclarse y dejarse reposar de 15 a 20 minutos, es recomendable dejar un residual de 0.5 a 0.8 mg/litro.

Las formas farmacéuticas más convenientes y seguras de yodo son las tabletas, estas tardan en disolverse menos de un minuto a 20 °C liberando 8 mg de yodo elemental por tableta. Esta cantidad basta para tratar un litro de agua en 10 minutos de tiempo de contacto.

3.2.3 USO DE PLATA COLOIDAL

Otra alternativa para tener agua desinfectada a nivel familiar en zonas rurales es la aplicación de plata coloidal, la cual es una suspensión con acción bactericida que tiene un efecto residual prolongado incluso es mayor que el cloro, se encuentra en el mercado con el nombre de Microdyn, una de sus ventajas es que no es volátil, toxico ni corrosivo. Se usa aplicando una

gota por litro de agua y se deja reaccionar en un intervalo de tiempo comprendido entre 30 y 60 minutos antes de ingerirla. La desinfección por este método no debe hacerse en recipientes de aluminio, ya que se pierde la efectividad del desinfectante.

3.3. COMPARACIÓN DE MÉTODOS DE DESINFECCIÓN MÁS APLICADOS EN LAS ZONAS RURALES

Los sistemas de desinfección más utilizados en México a nivel familiar son hervir el agua, radiación solar, radiación UV y la cloración, la Tabla 3.6 menciona una comparación de estas técnicas enfocadas a mejorar la calidad microbiológica del agua en viviendas del sector rural (Vázquez, 2009). Cada uno de ellas presenta ventajas y desventajas, son de aplicación específica a las condiciones locales de infraestructura, capacidad técnica, costo, preferencia, rapidez, volumen a tratar, etc. Actualmente es claro que para localidades rurales o marginadas los sistemas centralizados de tratamiento de aguas son caros, complicados, no apropiados y no garantizan el buen funcionamiento de las tecnologías. Como opción están las tecnologías escala doméstica en el punto de uso que pueden tener mayor probabilidad de éxito en la desinfección del agua.

Tabla 3.6 Comparación de las alternativas de desinfección en viviendas

Criterio	Temperatura (hervir el agua)	Radiación solar	Radiación UV	Cloración
Reducción microbiana	Alta	Alta, extensiva para la mayoría de los patógenos	Alta, extensiva para la mayoría de los patógenos	Alta, extensiva para la mayoría de los patógenos
Desinfectante residual	No	No	No	Si
Requerimientos de calidad del agua a tratar	No	Baja turbiedad (menor a 30 NTU)	Baja turbiedad (menor a 30 NTU), baja cantidad de elementos absorbentes de luz como materia orgánica, hierro y sulfitos	Es aplicable a cualquier calidad de agua, pero la eficiencia aumenta en aguas con baja turbiedad y sin materia orgánica
Cambios químicos en el agua tratada	No, excepto la disminución del oxígeno y precipitación química	Ninguno o no significativo	Ninguno o no significativo	Causa olor, sabor y productos de desinfección
Potencial recrecimiento de microorganismos	Si, si se almacena el agua por más de 1 o 2 días	Si, si se almacena el agua por más de 1 o 2 días	Si, si se almacena el agua por más de 1 o 2 días	Ninguno, si se mantiene el cloro residual
Nivel de habilidad y facilidad para utilizarse	Bajo, fácil de utilizar	Bajo, fácil de utilizar	Habilidad moderada, entrenamiento para el mantenimiento y sustitución de lámparas	Bajo, fácil de utilizar con entrenamiento
Tiempo de tratamiento	Minutos	Horas en días bien soleados, ineficaz en días no soleados	Segundos a minutos	Minutos

Fuente Sobsey et al, 2002.

4

CLORACIÓN

4.1. DEFINICIONES

La práctica de la cloración ha generado un vocabulario específico, a continuación se indican los términos más comunes. Algunos de ellos serán vistos con mayor detalle posteriormente.

Cloro Activo. Suma del cloro elemental y de todas las combinaciones oxidantes en un momento determinado. Es decir, se trata del cloro activo libre (cloro, ácido hipocloroso, ion hipoclorito y óxido de cloro) y del cloro activo combinado (cloro de acción oxidante combinado con amoníaco o aminas).

Cloro Residual Combinado. Cloro que permanece después de la reacción asociado con derivados de amoníaco y de materia orgánica.

Cloro Libre Residual. Cloro que permanece después de la reacción sin formar cloro combinado. Es la suma del HOCl y del OCl, No se presenta en la cloración del agua residual.

Cloro Residual Total. Suma del cloro residual el combinado y libre.

Cloración Simple. Adición de cloro con fines de desinfección. Puede efectuarse en las fuentes de abastecimiento, tanques de almacenamiento o

regulación, las líneas de conducción y diferentes sitios de las redes de distribución.

Cloro Suficiente. Cantidad de cloro requerida para producir el residual deseado, ya sea combinado, libre o total, después de un tiempo de contacto definido.

Demanda de cloro. Cantidad de cloro consumida por las sustancias reductoras, la materia orgánica y los microorganismos patógenos.

Descloración. Eliminación total o parcial del cloro residual contenido en el agua. Se realiza posterior a una sobrecloración con el fin de mantener el cloro residual a un nivel deseado, o bien, eliminarlo todo el residual antes de descargar el agua a un cuerpo acuático sensible

Poscloración. Aplicación de cloro al final del tratamiento. Es un procedimiento normal en potabilizadoras y depuradoras.

Precloración. Aplicación de cloro antes de cualquier otro tratamiento, por ejemplo, en el caso de procesos de clarificación se aplica cloro a las aguas crudas para mejorar la coagulación, reducir o eliminar olores y sabores indeseables y detener el crecimiento de algas en la infraestructura.

Sobrecloración. Aplicación de cloro en cantidad superior a la requerida para desinfectar con objeto de obtener un residual.

Tiempo de Contacto. Tiempo que debe transcurrir entre la dosificación del cloro y la eliminación de las bacterias patógenas. Varía en función de la calidad del agua y la dosis aplicada.

4.2. FUNDAMENTOS

El cloro se usó por primera vez con fines sanitarios en 1851 en Londres para desodorizar lodos. En agua, como método continuo de desinfección se empleó hasta 1908 en Bubbley Creck, Chicago. Actualmente, el cloro se aplica tanto en potabilización como en la depuración de piscinas, e incluye funciones adicionales a la desinfección, como son el control de sabor y olor, la prevención del crecimiento de algas en la infraestructura hidráulica, el mantenimiento de filtros, la remoción de hierro y manganeso, la remoción de color por ciertos colorantes orgánicos y el mantenimiento de sistemas de distribución de agua (para controlar el limo). Hoy en día, se dispone de nuevos y eficientes sistemas para el manejo, control y análisis de la cloración y por ello es el método de desinfección más utilizado a nivel mundial -87 por ciento de los procesos-, (Huebner, 1996) y en el país.

Lo anterior se debe a su bajo costo, confiabilidad, eficiencia, pero sobre todo, el efecto residual que guarda después de ser aplicado y que le permite continuar desinfectando aún después de que el agua haya salido de la planta de trata-

miento; característica, que ningún otro método común de desinfección posee.

4.3. DESINFECCIÓN CON CLORO

4.3.1 CARACTERÍSTICAS

El cloro, en condiciones ambientales de presión y temperatura, es un gas amarillo verdoso, con un olor irritante característico. Es no inflamable, aunque en su forma gaseosa mantiene la combustión de algunos materiales. El cloro se produce en forma gaseosa por electrólisis de una solución de cloruro de sodio. Químicamente es un elemento muy activo, motivo por el cual no se encuentra en la naturaleza en estado libre, sino asociado con otros elementos como, por ejemplo, el sodio, con el cual forma el cloruro de sodio o sal común. Reacciona fácilmente con sustancias explosivas, por lo cual no debe almacenarse cerca de zonas habitadas o lugares de trabajo. El cloro se combina con diferentes compuestos rápidamente incluyendo los nitrogenados (Tchobanoglous, 2012). El cloro es ligeramente soluble en agua (a 1 atm y 20 ° C se disuelve en 10 mil, 1 por ciento de concentración). Sus principales características a presión atmosférica se presentan en la Tabla 4.1.

En presencia de humedad, el cloro, ya sea líquido o gaseoso, es sumamente corrosivo, pues reacciona con el agua para formar ácidos hipocloroso y clorhídrico. Por ello, se produce el cloro

Tabla 4.1 Principales características del cloro a presión atmosférica

Peso molecular	35.357	uma
Punto de fusión	-101.4	°C
Punto de ebullición	-34.5	°C
Densidad relativa al aire	2.5	

seco, que no contiene más de 150 ppm de humedad; sin embargo se recomienda incluso que ésta sea menor de 50 ppm para evitar problemas de corrosión.

4.3.2 MECANISMOS DE INACTIVACIÓN

El cloro causa dos tipos de daño en las células. Por un lado, afecta la integridad de la membrana y ocluye su permeabilidad, y por otro, altera funciones celulares (daña enzimas y ácidos nucleicos). Por ello, la reacción de los microorganismos ante el cloro está determinada por la resistencia de sus membranas así como por la relativa afinidad química de este compuesto con las sustancias vitales del organismo. Para el primer caso, por ejemplo, las bacterias del grupo coliforme y las del género *Salmonella* son poco resistentes ya que efectúan su respiración en la superficie de la célula y su membrana por ello es muy permeable y poco resistente. En cambio, otros microorganismos cuando encuentran condiciones adversas se enquistan y resisten al cloro. Ello ocurre con las amebas cuyos quistes son 100 veces más difíciles de inactivar que *Escherichia coli*. Por su parte, los virus entéricos, como el Echovirus, Cocksakiavirus y Polivirus, también son muy resistentes debido a que poseen una capa de proteínas que los recubre (Tchobanoglous, 2012).

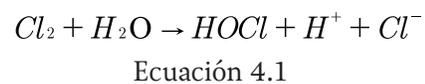
También es importante considerar que cuando las bacterias como los estafilococos forman grupos aquéllas que se encuentren en el interior estarán protegidas. Por ello, para que el cloro, y en general cualquier desinfectante actúe, los microorganismos deben estar distribuidos uniforme y libremente en el agua, lo cual se logra por la ausencia de partículas y la agitación del agua.

4.3.3 PRINCIPALES REACCIONES

La desinfección con cloro puede realizarse con cloro gas (Cl_2), hipoclorito de sodio ($NaOCl$) o hipoclorito de calcio ($Ca(OCl)_2$). A continuación se describen estas tres especies químicas.

4.3.3.1 Cloro gas

El cloro gas se hidroliza rápidamente en agua para formar ácido hipocloroso ($HOCl$).



Cuya constante de equilibrio a 25° C es:

$$k = \frac{[H^+][Cl^-][HOCl]}{[Cl_2]} = 4.5 \times 10^{-4}$$

Ecuación 4.2

El ácido hipocloroso es un ácido débil ($pK_a = 7.5$), lo que significa que se disocia moderadamente pero en cantidad suficiente para disminuir el pH del agua debido a la producción del ion hidronio:



La constante de ionización de esta reacción a 25° C está dada por la Ecuación 4.4 y su variación con respecto a la temperatura se muestra en la Tabla 4.2.

$$k = \frac{[H^+][OCl^-]}{[HOCl]} = 2.9 \times 10^{-8}$$

Ecuación 4.4

Entre un pH de 6.5 y 8.5 la disociación del ácido hipocloroso es incompleta y coexiste con el OCl^- . No se produce a valores de pH menores de 6.5 mientras que por arriba de 8.5 es completa

Tabla 4.2 Valores de la constante de equilibrio del ácido hipocloroso a diferentes temperaturas (Von Sountag et al 2004)

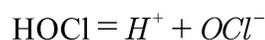
Temperatura	$k \times 10^8$
(° C)	(mol/L)
0	1.49
5	1.75
10	2.03
15	2.32
20	2.62
25	2.90

(Ilustración 4.1). La suma del $HOCl$ y del OCl^- es el llamado cloro libre residual.

Debido a que la eficiencia de desinfección del $HOCl$ es de 80 veces mayor que la del OCl^- se prefiere la cloración a pH 's ácidos.

4.3.3.2 Hipoclorito

La cloración del agua potable se lleva a cabo en la práctica mediante el burbujeo del cloro gaseoso o mediante la disolución de los compuestos de cloro y su posterior dosificación. El cloro en cualquiera de sus formas, se hidroliza al entrar en contacto con el agua, formando ácido hipocloroso ($HOCl$). Durante el proceso químico de la desinfección, se producen compuestos tales como cloraminas, dicloraminas y tricloraminas en presencia de amoníaco en el agua. Las cloraminas sirven igualmente como desinfectantes aunque reaccionen de una manera sumamente lenta. Asimismo, se forman el ácido clorhídrico (HCl) y los hidróxidos de calcio y sodio, los cuales no participan en el proceso de desinfección. La especie desinfectante es el ácido hipocloroso ($HOCl$), el cual se disocia en iones hidrógenos (H^+) e hipoclorito (OCl^-) y adquiere sus propiedades oxidantes:



Ecuación 4.5

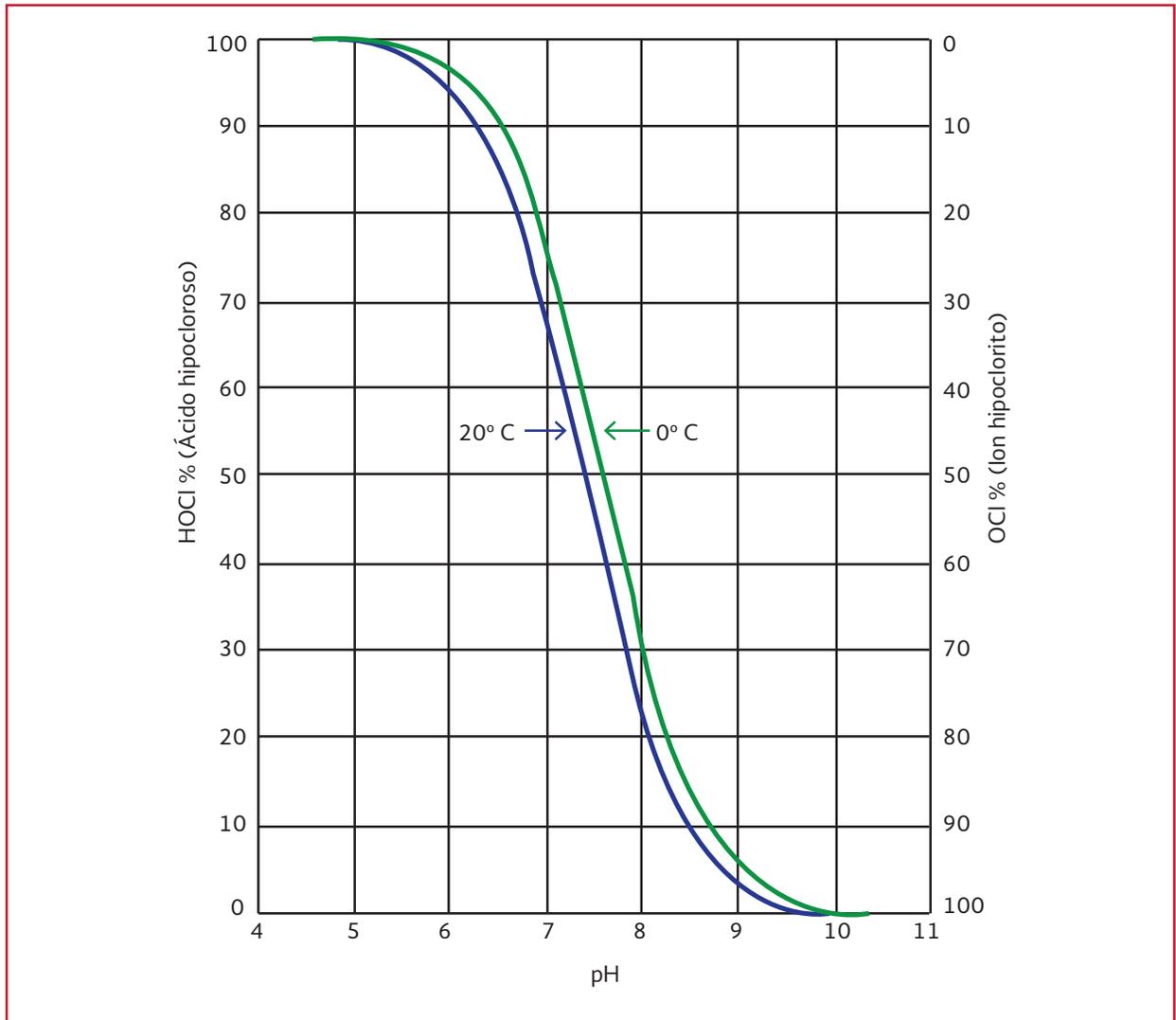
Ambas fracciones de la especie son microbicidas, y actúan inhibiendo la actividad enzimática de las bacterias y virus, y produciendo su inactivación.

Tanto el ácido hipocloroso ($HOCl$) como el ion hipoclorito (OCl^-) están presentes hasta cierto punto cuando el pH varía entre 6 y 9 (el rango usual para el agua natural y potable). Cuando el valor de pH del agua clorada es 7.5, el 50 por ciento de la concentración de cloro presente será ácido hipocloroso no disociado y el otro 50 por ciento será ion hipoclorito. Los diferentes porcentajes de $HOCl$ y OCl^- a diferentes valores de pH pueden verse en la Ilustración 4.1. Las diferentes concentraciones de las dos especies significan una considerable diferencia en la propiedad bactericida del cloro, ya que estos dos compuestos presentan diferentes propiedades germicidas. En realidad, la eficiencia de $HOCl$ es por lo menos 80 veces mayor que la del OCl^- . Por esta razón, cuando es monitoreado el cloro del agua, es aconsejable vigilar el pH , ya que esto dará una idea del potencial real bactericida de las especies desinfectantes presentes.

4.3.3.3 Hipoclorito de sodio

Se produce al disolver cloro gas en una solución de hidróxido de sodio. La reacción entre el hipoclorito de sodio y el agua es la siguiente.

Ilustración 4.1 Distribución del ácido hipocloroso y del hipoclorito en agua a diferentes valores de pH (adaptada de Tchobanoglous 2012)

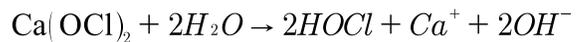


Ecuación 4.6

Esta reacción produce ácido hipocloroso similar al producido en la reacción de hidrólisis del cloro gas (Ecuación 4.1). Sin embargo, y contrario a lo que sucede con el cloro gas, la adición de hipoclorito de sodio al agua produce iones hidroxilo que incrementan el *pH* del agua.

4.3.3.4 Hipoclorito de calcio

Se forma al precipitar una solución formada de gas cloro, óxido de calcio y dióxido de sodio. La reacción entre el hipoclorito de calcio y el agua es la siguiente:



Ecuación 4.7

Como se observa, el hipoclorito de calcio produce también ácido hipocloroso, al igual que el hipoclorito de sodio pero incrementa el pH debido a la generación de iones hidroxilo.

4.3.4 OTRAS REACCIONES

El cloro es un agente químico tan activo que también se combina con muchas de las sustancias disueltas o suspendidas en agua, por ejemplo, con la materia orgánica, ácido sulfhídrico, manganeso, hierro, nitritos y amoníaco. En conjunto, estas sustancias se denominan compuestos reductores y su cantidad varía en cada agua, dependiendo del tipo de fuente (superficial, subterránea o descargas), la naturaleza del compuesto que contenga el agua o la época del año. Por ello, al entrar en contacto el cloro con el agua, una cantidad es consumida por los compuestos reductores que lo convierten en cloruros cuando son inorgánicos, organoclorados si son orgánicos o cloraminas si contiene derivados del amonio, inhabilitándolo para la desinfección. La composición del agua se refleja así en la demanda de cloro no sólo para desinfección. A continuación se da mayor detalle de las reacciones del cloro con algunos compuestos.

4.3.4.1 Hierro y manganeso

Uno de los principales usos del cloro es la oxidación del hierro y manganeso. En la Tabla 4.3 se presentan las dosis y condiciones en las que se lleva a cabo esta reacción.

El cloro reacciona con la materia orgánica y sus derivados cambiando su estructura, tornándose inocuo y formando organoclorados de acuerdo con:



Ecuación 4.8

La materia orgánica se encuentra en forma natural en el agua de suministro por la presencia de ácidos húmicos o en forma artificial cuando las aguas negras (donde es un componente habitual) se mezclan con las fuentes de abastecimiento. De acuerdo con Cáceres (1990), por este último motivo se puede encontrar en el agua Alcanos clorados, que son compuestos fabricados y utilizados en grandes cantidades en la industria química. Sólo se tienen estudios del 1,2-dicloroetano, utilizado ampliamente como solvente y que es reconocido como carcinógeno y mutágeno.

- Etano clorados, compuestos de uso difundido en la industria que se utilizan como solventes, ablandadores, diluyente de pintura y líquido para tintorería. De ellos, el cloruro de vinilo es reconocido como carcinógeno para seres humanos
- Los trihalometanos son un subconjunto de los organoclorados, derivados del metano (CH_4), de cuya molécula son sustituidos tres átomos de hidrógeno por igual número de halógenos (cloro, bromo o yodo). La sustitución puede ser hecha

Tabla 4.3 Dosis y condiciones de aplicación de cloro para la oxidación de hierro y manganeso (EPA, 1999)

	Dosis típica	pH óptimo	Tiempo de reacción
Hierro	0.62 mg/mg Fe	7.0	Menos de 1 hora
Manganeso	0.77 mg/mg Mn	7-8	1-3 horas

por un solo compuesto, por ejemplo, triclorometano, o por una mezcla como en el bromodiclorometano. Algunos de ellos poseen nombres especiales como: cloroformo ($CHCl_3$), bromoformo ($CHBr_3$) y yodoformo (CHI_3). Siendo el de más ocurrencia y por ende más estudiado el cloroformo (Tchobanoglous, 2012)

Cáceres, (1990) propone cuatro aspectos que controlan la formación de los THMs:

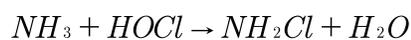
- **Cantidad de cloro:** Cuando existe una gran demanda de cloro o el sistema es operado con elevados residuales hay mayor probabilidad de formar cloroformo y otros THMs
- **Temperatura.** Cuanto más caliente es el agua, mayor es la posibilidad de formar THMs. Diversos experimentos realizados con el mismo *pH* y la misma dosis de cloro, demostraron que al variar la temperatura entre 3 y 40° °C, la concentración de cloroformo aumenta de 30 a 200 mg/L
- ***pH*.** La formación de THM es mayor conforme aumenta el *pH* del agua, por su acción catalítica sobre el haloformo
- **Los sólidos suspendidos.** Reducen tanto la velocidad de producción como la cantidad de THMs formados

Los trihalometanos son regulados por la EPA para protección ecológica y de la salud humana. La concentración límite en agua potable es de 100 µg/L. Los THMs incrementan la mortalidad por cáncer después de un consumo prolongado. En especial, se ha demostrado que el cloroformo es absorbido rápidamente por la mucosa intestinal, se distribuye en los tejidos y se acumula en el tejido adiposo donde tiene una larga vida media. Su metabolismo se produce principalmente

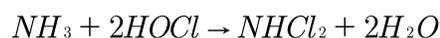
en el hígado y en menor proporción en los riñones y otros tejidos. Sin embargo, la OMS recomienda nunca omitir la desinfección del agua de suministro por el riesgo de formar THMs cuando no es posible aplicar otro método. Conviene señalar que los THMs, no se forman exclusivamente durante el tratamiento de agua, sino aún después de realizada la cloración.

4.3.4.2 Amoniaco

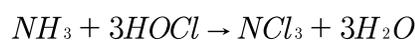
El amoniaco es resultado de la descomposición de la materia orgánica y la urea presentes en forma ocasional en aguas naturales. Asimismo, las aguas negras e incluso los efluentes de las plantas de tratamiento contienen cantidades significativas de nitrógeno. Este nitrógeno reacciona con el ácido hipocloroso que es un agente oxidante muy fuerte, para producir cloraminas:



Ecuación 4.9



Ecuación 4.10



Ecuación 4.11

Estas reacciones dependen de factores tales como el *pH*, la temperatura, el tiempo de contacto y de las cantidades presentes de cada compuesto. Las especies predominantes, en la mayoría de los casos, son las monocloraminas (NH_2Cl) y las dicloraminas ($NHCl_2$), compuestos que en conjunto se denominan cloro residual combinado (Tchobanoglous, 2012).

Las cloraminas también tienen capacidad desinfectante pero en menor intensidad que el $HOCl$ o OCl^- (alrededor de 50 veces); no obstante son más perdurables en agua por lo que su poder residual es más prolongado y llega incluso a

inactivar virus (Droste, 1997). Como ejemplo, se señala que es necesario aplicar 80 de cloraminas para inactivar el 90 por ciento de los organismos, con un tiempo de contacto de 90 minutos (Korich et al., 1990). Debido a que las cloraminas no generan THMs, actualmente su uso se prefiere en potabilización (Zierler et al., 1987). En agua residual puesto que no es posible formar cloro residual libre con las dosis usuales, la desinfección se lleva a cabo por las cloraminas, por lo que el tiempo necesario para la desinfección es mayor.

4.3.5 CLORACIÓN AL PUNTO DE QUIEBRE

Como se mencionó anteriormente, debido a que el cloro es un agente oxidante fuerte, reacciona con la mayor parte del material en estado reducido (Fe^{2+} , Mn^{2+} , H_2S y amoníaco), esta materia consume el cloro antes de que éste actúe como desinfectante. La cantidad de cloro necesaria para obtener cloro residual libre es determinada experimentalmente y la Ilustración 4.2 muestra una curva típica para ello (Tchobanoglous 2012).

Conforme el cloro es añadido, reacciona con la materia oxidable y así todo se reduce a ion cloro (punto A). Después de haber cubierto esta demanda, el cloro sigue reaccionando con el amoníaco para formar cloraminas (entre el punto A y B). Posteriormente, entre el punto B y el punto de quiebre, algunas de las cloraminas se convierten a tricloruro de nitrógeno (NCl_3), las cloraminas restantes son oxidadas a óxido nitroso (N_2O) y nitrógeno (N_2) y el cloro se reduce a ion cloro. Si se adiciona más cloro, la mayoría de las cloraminas se oxidarán. Teóricamente, la relación en peso de cloro a nitrógeno amoniacal para alcanzar el punto de quiebre es de 7.6:1 (Tchobanoglous 2012). En la Ilustración 4.3 se muestra

la distribución del cloro en el agua residual. Una vez alcanzando el punto de quiebre, la adición de cloro resulta en un incremento proporcional del cloro residual libre.

En la actualidad, por su efectividad, facilidad de control y economía, la cloración a residual libre o cloración después del punto de quiebre sólo se realiza para agua de suministro, donde las cloraminas son muy escasas.

Las ventajas de la cloración a residual libre son:

- Se puede obtener una desinfección efectiva con un período de contacto de 10 minutos
- El valor del cloro residual no cambia para valores de pH entre 6.0 y 8.0 y en un amplio intervalo de temperatura
- Mejora el olor y sabor del agua potable
- Es posible mantener el efecto desinfectante a lo largo de la distribución

La Tabla 4.4 resume las ventajas e inconvenientes del proceso de cloración.

4.3.6 DEMANDA DE CLORO

La cantidad de cloro que consumen las sustancias reductoras y la materia orgánica se define como demanda de cloro. Cuantitativamente representa la cantidad que se agrega menos la que se conserva al término de la reacción (cloro residual) y se mide en partes por millón. El tiempo de reacción generalmente se fija en 10 minutos para agua potable y de 15 a 30 minutos para agua residual.

En general y dependiendo de la cantidad de cloro que se dosifique, la reacción puede dar origen a los siguientes resultados:

Ilustración 4.2 Curva obtenida en la cloración a punto de quiebre (Tchobanoglous, 2012)

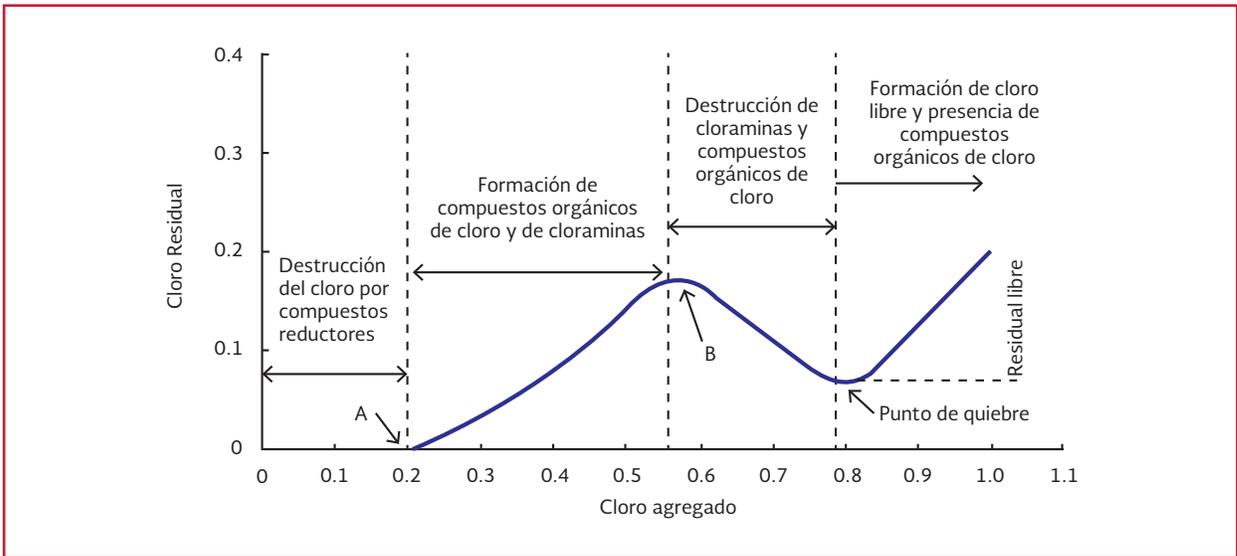


Ilustración 4.3 Especies que conforman el cloro total residual

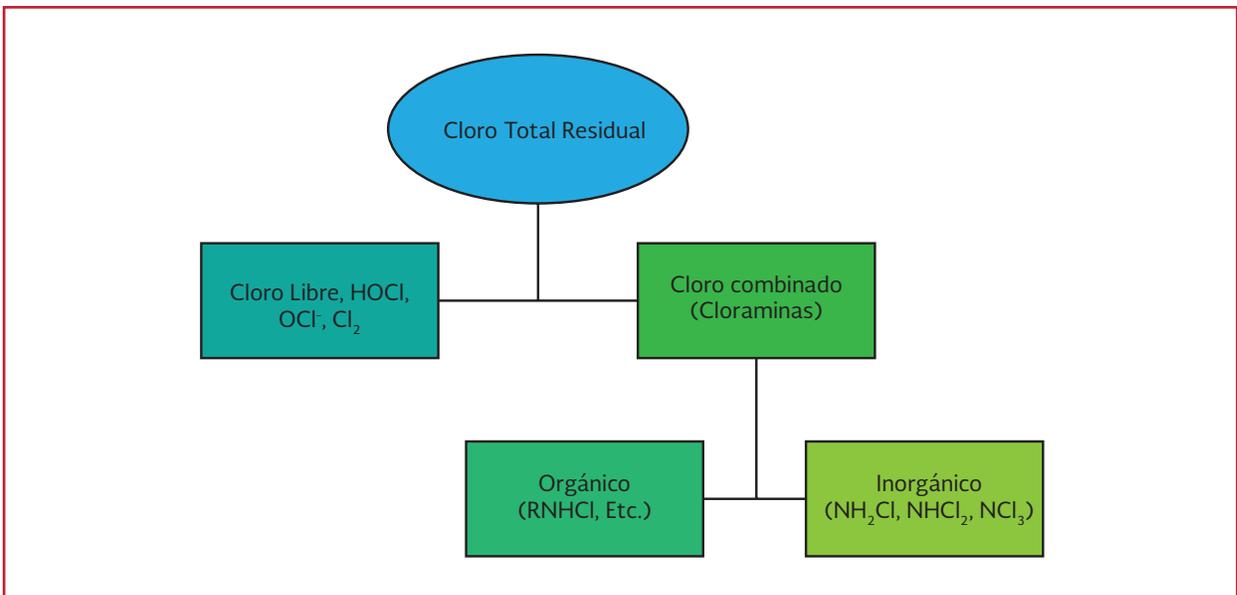


Tabla 4.4 Ventajas y desventajas de la cloración

Ventajas	Desventajas
Tecnología bien establecida	En ocasiones es necesario utilizar una descloración para reducir la toxicidad residual
Muy eficiente	Forma trihalometanos y otros hidrocarburos clorados
Capacidad de mantener efectos residuales	Incrementa las medidas de seguridad
La reacción con amoníaco genera un efecto desinfectante adicional	Las dosis utilizadas para inactivar coliformes no actúan en algunos virus, esporas y quistes
Efecto germicida durante un largo período	El pH del agua residual puede ser reducido si la alcalinidad es insuficiente por la generación del ácido HOCl
Relativamente económica	Libera compuestos orgánicos volátiles
Uso tradicional	Elevado costo de automatización

- Que el cloro adicionado sea suficiente para oxidar las sustancias presentes en el agua y no quede residual para actuar como desinfectante
- Que el cloro adicionado sea suficiente para reaccionar con los compuestos reductores y la materia orgánica presente para formar compuestos orgánicos de cloro, los cuales tienen poca o ninguna acción desinfectante pudiendo, además, provocar sabores u olores indeseables
- Que el cloro que se dosifique sea el suficiente para reaccionar con todas las sustancias reductoras, la materia orgánica y quede, además, una cantidad que trabaje en agua potable como cloro libre residual y lleve a efecto la desinfección del agua o, en agua residual, se combine con el amoníaco para producir cloraminas, también desinfectantes
- Organismos que se intenta destruir u organismos índice (coliformes, *Entamoeba histolytica* o *Giardia lamblia*)
- Tiempo disponible entre el momento en que se aplica el cloro al agua y el momento en que ésta es consumida, usada o descargada
- Cantidad de cloro que económicamente se debe agregar
- Clase de desinfectante que se forma en el agua ($HOCl$, OCl , NH_2Cl) según sea el pH y el contenido de nitrógeno y materia orgánica de ella
- Definir si el agua requiere pre y poscloración o sólo poscloración, dependiendo de las características de la fuente. Por ejemplo, aguas altamente contaminadas con coliformes superiores a 5×10^3 o que presenten una excesiva producción de algas en la planta, deben siempre preclorarse
- Definir si se requiere una etapa de descloración

La demanda de cloro es la cantidad mínima necesaria de cloro activo para eliminar las bacterias del agua en el nivel deseado después de que el cloro haya reaccionado con las sustancias presentes por lo que los primeros casos presentados no cumplen este propósito. Para evaluar la demanda de cloro se agregan cantidades conocidas del reactivo y se evalúa la cantidad remanente de microorganismos.

4.3.7 DOSIS DE CLORO

La dosis de cloro ideal es la necesaria para destruir todos los organismos patógenos presentes en ella, antes de que sea consumida por la población o descargada al medio ambiente. Por tanto, para poder determinarla es indispensable tener en cuenta los siguientes parámetros:

En potabilizadoras, la poscloración debe usarse en todos los casos. Las dosis dependen de la demanda de cloro en la red. Las redes de gran longitud, al presentar largos periodos de retención, requieren dosis iniciales mayores que las redes cortas.

Para determinar la dosis óptima, se deben realizar pruebas de laboratorio agregando cantidades crecientes de cloro al agua y midiendo su concentración a través del tiempo. La dosis óptima será la que produzca un residual de cloro libre siendo de 0.2 a 1.5 para agua potable al final del período de contacto o la eliminación total o parcial de patógenos según requiera la norma

(1 000 NMP/1 000 mL de coliformes fecales para agua de riego según la NOM-001-SEMAR-NAT-96, o en su caso norma oficial vigente). Por ejemplo, en la Tabla 4.5 se presentan las dosis típicas de cloro (en sus diferentes formas) usadas en plantas potabilizadoras.

4.3.8 FACTORES QUE AFECTAN LA EFICIENCIA DE DESINFECCIÓN

Los principales factores son; la dosis, el tiempo de contacto, la temperatura y el *pH*.

4.3.8.1 Tiempo de contacto

Uno de los aspectos más importantes se refiere al tiempo disponible para que el cloro actúe sobre los microorganismos. Este tiempo de contacto debe ser como mínimo de 10 a 15 minutos en agua potable y de 15 a 30 minutos en agua residual. Sin embargo, es preferible dejar transcurrir el mayor tiempo posible para lograr una desinfección efectiva. Idealmente, el tiempo de contacto se calcula a partir de la ecuación de Chick.

4.3.8.2 Temperatura

La eliminación de microorganismos con cloro es mucho más rápida a mayor temperatura. A pesar de esto, el cloro es más estable en agua fría, lo que en la práctica compensa la menor velocidad de desinfección. Así, para lograr la misma acción a 4° C que a 21° C, la concentración de cloro residual debe ser el doble con los demás factores constantes.

4.3.8.3 *pH*

El *pH* afecta la acción desinfectante del cloro, particularmente la del cloro residual combinado. De forma general, mientras más alcalina sea el agua se requieren mayores dosis para una misma temperatura y tiempo de contacto (Bitton, 1994). A un *pH* de 6.5 y una temperatura de 21° C, 0.3 de cloro residual combinado causa un efecto letal al 100 por ciento de bacterias. A la misma temperatura y para lograr el mismo efecto, el cloro residual combinado debe aumentarse hasta 0.6 para un *pH* de 7.0 y hasta 1.2 para un *pH* de 8.5.

4.3.9 DESCLORACIÓN

La desinfección con cloro de agua negra tratada, por su poder residual, puede ser altamente tóxica cuando se descarga a cuerpos de agua con vida acuática. Esta toxicidad no depende de la cantidad de cloro utilizado, sino más bien, de la concentración y composición del cloro residual (libre o combinado), así como de factores como son; la presencia de materia orgánica, el *pH*, la temperatura y el tiempo de contacto (WERF, 1995). Para controlarla se recurre a desclorar el agua antes de verterla a estos cuerpos receptores. Para ello, comúnmente se utiliza el dióxido de azufre o el carbón activado.

4.3.9.1 Dióxido de azufre

Este compuesto en estado gaseoso, remueve sucesivamente cloro libre, monocloramino, diclo-

Tabla 4.5 Dosis de cloro aplicadas en plantas potabilizadoras (EPA, 1999)

Compuesto de cloro	Dosis (ppm)
Cloro gas	1-16
Hipoclorito de sodio	0.2-2
Hipoclorito de calcio	0.5-5

raminas, tricloruro de nitrógeno y compuestos policlorados. En la práctica se ha encontrado que se requieren cerca de 1.0 de dióxido de azufre para eliminar 1.0 de cloro residual (expresado como Cl_2).

Por otra parte, debido a que la reacción entre el dióxido de azufre y las cloraminas es casi instantánea, el tiempo de contacto no es un factor limitante aunque sí es necesaria una agitación intensa (Metcalf & Eddy, 2003).

El dióxido de azufre es muy usado en los procesos de tratamiento de aguas residuales. Sin embargo, se debe cuidar no exceder la dosis debido a que este compuesto reacciona con el oxígeno y disminuye en consecuencia la concentración del oxígeno disuelto, incrementa la *DBO* y la *DQO* y puede haber una posible disminución del *pH*.

4.3.9.2 Carbón activado

Este medio (usado en filtros) remueve completamente tanto el cloro libre residual como cloro combinado. Es un método efectivo pero costoso, por lo que su aplicación se limita a efluentes clorados en los cuales sea necesario remover además altos niveles de compuestos orgánicos (Metcalf & Eddy, 2003).

4.3.10 COMPARACIÓN CON OTROS DESINFECTANTES

La efectividad de un desinfectante puede ser expresada como C/t , donde C es la concentración de desinfectante y t el tiempo requerido para inactivar cierto porcentaje de la población bajo condiciones específicas de *pH* y temperatura. Valores de C/t para diferentes organismos y cloro como desinfectante se muestran en la Ta-

bla 4.6 y pueden ser obtenidos en función de la temperatura y *pH*, con el polinomio.

$$\frac{C}{t} = aC^b (pH^c)(T^d) \quad \text{Ecuación 4.12}$$

donde:

- C = concentración de desinfectante
- t = tiempo requerido para matar el 99 % de los organismos seleccionados
- T = temperatura
- a, b, c y d = son constantes de ajuste del polinomio

La Tabla 4.7 muestra los coeficientes de letalidad para diferentes desinfectantes en especial para los derivados de cloro; además, es una forma rápida de comparar desinfectantes así como de analizar la sensibilidad relativa de diversas especies.

4.4. PRESENTACIÓN DEL PRODUCTO

El cloro se encuentra en tres presentaciones comerciales, tal como se muestra en la Ilustración 4.4.

Ilustración 4.4 Presentaciones comunes del cloro comercial

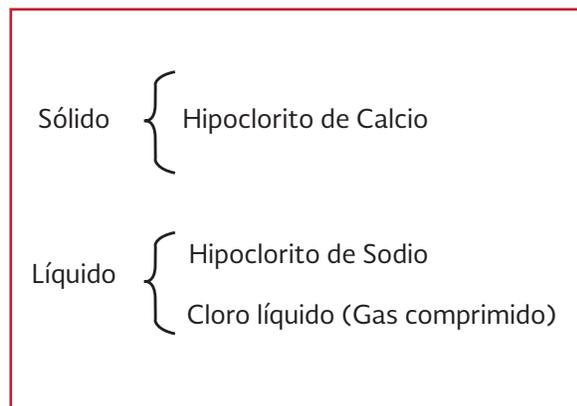


Tabla 4.6 Valores de C/t para diferentes organismos y cloro como desinfectante

Microorganismos	Cloro (mg/L)	Tiempo de Inactivación (minutos)	C/t
Escherichia coli	0.1	0.4	0.04
Polivirus	1.0	1.7	1.7
Quistes de Entamoeba histolytica	5.0	18	90
Giardia lamblia	1.0	50	50
Giardia muris	2.5	100	250

Tabla 4.7 Coeficientes específicos de letalidad de alternativas de desinfectantes

Desinfectante	Bacterias entéricas	Virus	Esporas	Quistes de amebas
O ₃	500	5	2	0.5
ClO ₂	10	1.5	0.6	0.1
Col	20	1.0	0.05	0.05
OCl ⁻	0.2	0.02	0.0005	0.0005
NH ₂ Cl	0.1	0.005	0.001	0.02

1/(x min), asumiendo que el coeficiente de dilución es igual a 1

4.4.1 HIPOCLORITO DE CALCIO

Conocido también como cloruro de cal, es producido al adicionar monóxido de cloro al agua y neutralizar con lechada de cal para crear una solución de hipoclorito de calcio. Posteriormente, se elimina el agua de la solución para dejar el hipoclorito de calcio en forma granular. El contenido de cloro activo varía del 30 al 70 por ciento.

Se suministra en dos presentaciones. La primera y más común tiene una apariencia granular. Es de color blanquecino y se envasa en cuñetes de 45 kg (100 lb), en cubetas de polietileno con 4 kg o en tarros de plástico con 1 kg cada uno. La segunda presentación viene en forma de tabletas y se envasa en tarros con 1.2 kg, en cubetas de 3.60 kg o cuñetes de 45 kg. El peso de las tabletas es de 0.007 a 0.30 kg y tienen un contenido de cloro activo del 70 por ciento.

La preparación de una solución de hipoclorito de calcio al 2 por ciento a partir de hipoclorito de calcio comercial (70 por ciento de cloro activo)

se presenta en la Tabla 4.8 y su desarrollo puede consultarse en el anexo A.

4.4.2 HIPOCLORITO DE SODIO

Se produce al disolver cloro gas en una solución de hidróxido de sodio. Es un líquido de color amarillo verdoso, se suministra en envases plásticos (porrones) de 20 y 50 litros así como en pipas de 10 y 20 toneladas. Su contenido de cloro activo es del 13 por ciento en peso.

La preparación de una solución de hipoclorito de sodio al 2 por ciento a partir de hipoclorito de sodio comercial (contenido de cloro activo del 13 por ciento) se presenta en la Tabla 4.8.

4.4.3 CLORO LÍQUIDO

El cloro gaseoso es licuado aplicándole presión a bajas temperaturas. Como el líquido es de color ámbar con peso 1.5 veces el del agua y se envasa en cilindros de acero para su suministro de 68 o 907 kg. El cloro líquido,

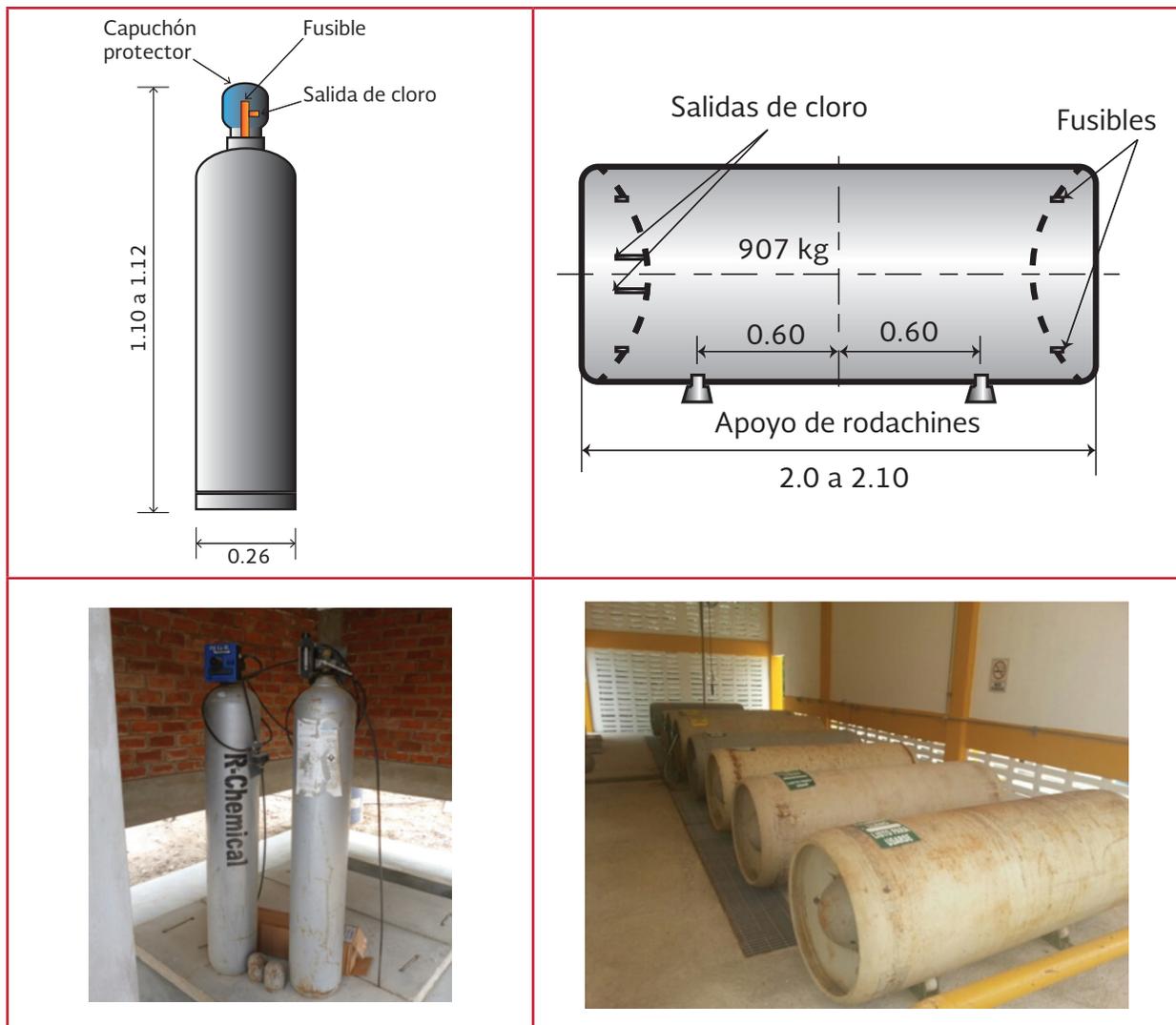
Tabla 4.8 Preparación de una solución de hipoclorito de calcio al 2%

Volumen a preparar (L)	Peso de hipoclorito de calcio (kg)
50	1.4
100	2.9
200	5.8
500	14.5
1 000	29.0
Volumen a preparar (L)	Volumen de hipoclorito de sodio (L)
50	7.5
100	15
200	30
500	75
1 000	150

también se distribuye en carros tanque especiales de 10, 15, 20 o más toneladas (Ilus-

tración 4.5). Contiene, para efectos prácticos, un 100 por ciento de cloro activo.

Ilustración 4.5 Recipientes de cloro: cilindro y carros tanque, respectivamente

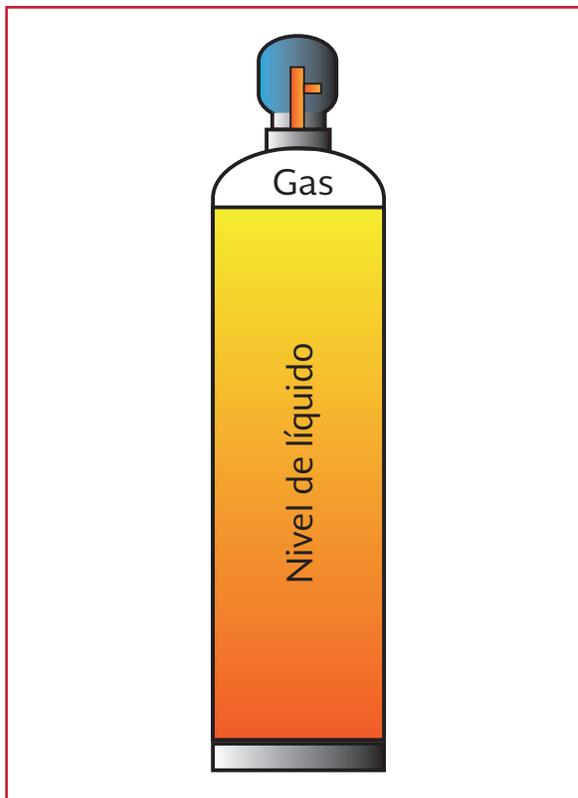


A continuación se dan más detalles de los envases para cloro líquido, que es la presentación de cloro más barata.

4.5. CONTENEDORES DE CLORO

El cloro líquido en realidad se encuentra presente en los cilindros o en los carros tanque en dos estados: líquido (85 por ciento) y gas (15 por ciento), observe la Ilustración 4.6. La proporción de cada uno varía con la temperatura ambiente: a menor temperatura, menor es el volumen de gas.

Ilustración 4.6 Cilindro de cloro mostrando en su interior los volúmenes de cloro en estado líquido y gaseoso



En ambos tipos de recipientes se puede indistintamente extraer líquido, de la parte inferior, o gas de la parte superior, según se desee.

4.5.1 CILINDROS

4.5.1.1 Cilindros de 68 kg

Se construyen sin costuras y el fondo puede ser de tres tipos: con anillo o cóncavo (sumergido) y de fondo-doble (Ilustración 4.7). Se fabrican mediante el proceso conocido como de rechazo (spinning) cuyo objeto es darle la máxima integridad. La única apertura permitida es la practicada en la parte superior para conectar la válvula, misma que va protegida mediante un capuchón de acero. Los cilindros se prueban en diferentes condiciones para verificar su integridad. Los cilindros son de acero al carbón, al manganeso o al cromo molibdeno y se construye bajo la especificación del Departamento de Transportes de los Estados Unidos (DOT) 3AA 484, que implica los valores de Tabla 4.9.

Tabla 4.9 Especificaciones para cilindros

Capacidad mínima de agua (en peso)	57.0 kg
Volumen mínimo de agua	57.0 L
Peso promedio	64.4 kg
Presión de servicio	34.0 kg/cm ²
Presión de prueba	57.0 kg/cm ²

Las dimensiones del cilindro así como las leyendas que llevan estampadas en su cabeza, están indicadas en la Ilustración 4.8.

4.5.1.2 Cilindros de 907 kg

En México, los recipientes de 907 kg son de acero soldado y se fabrican de acuerdo con el código ASME (Tabla 4.10). Los lados están enrollados en los extremos hacia adentro para formar remates que se convierten en soportes y ayudan al manejo del equipo. Las tapas de los extremos son cóncavas y una de ellas está equipada con

Ilustración 4.7 Tipos de fondos en cilindros para cloro de 68 kg

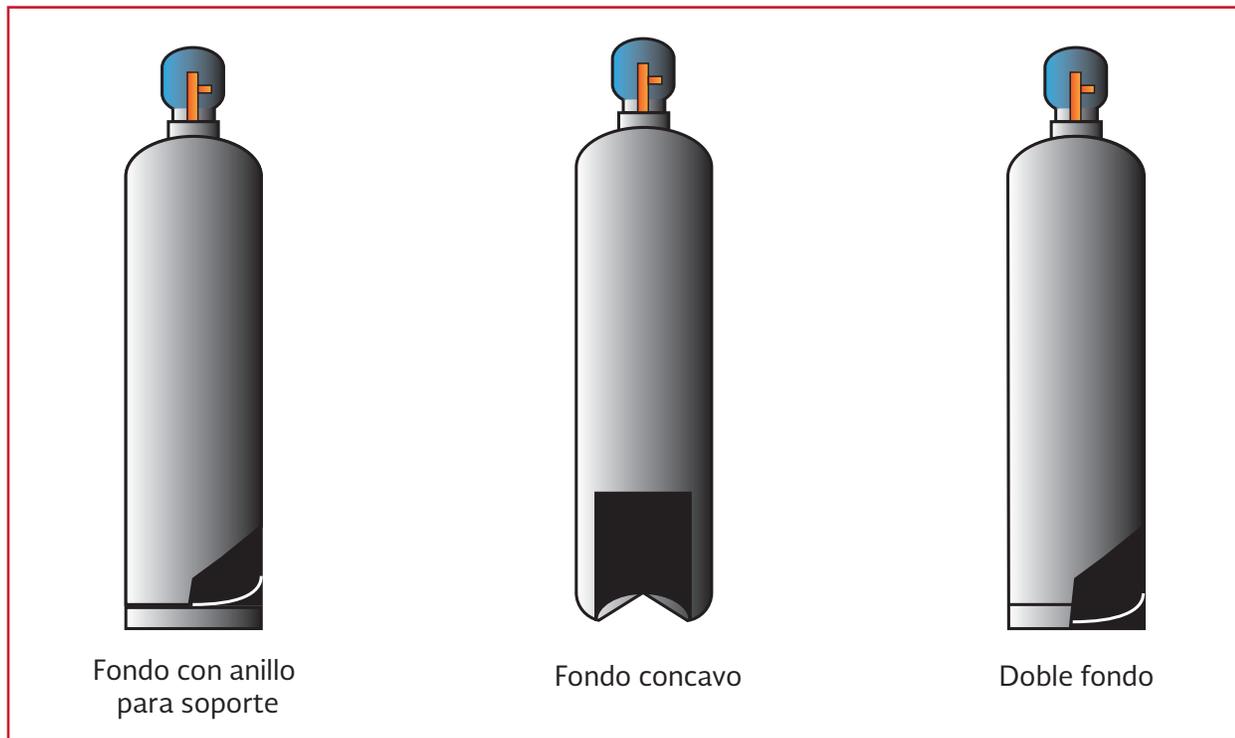
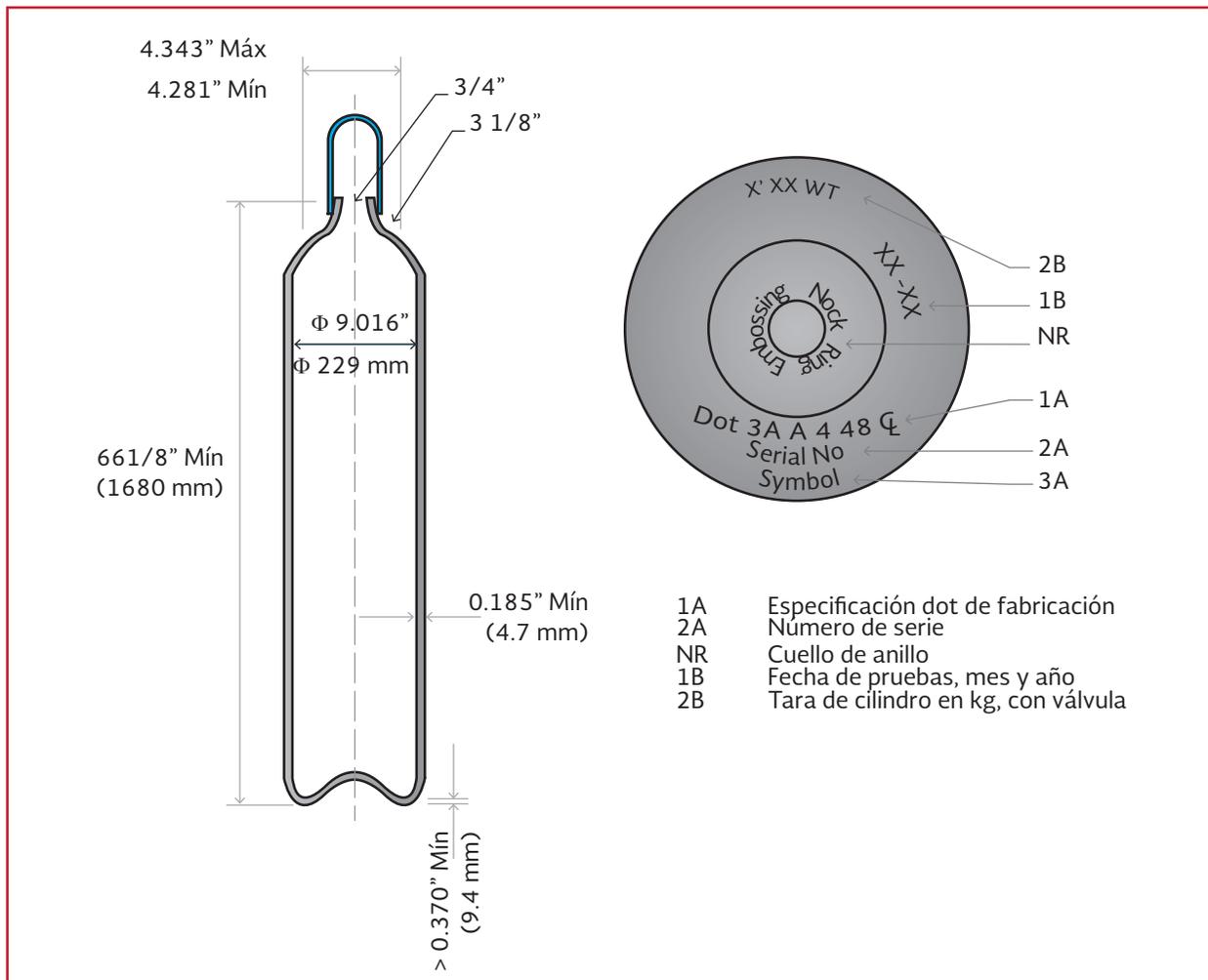


Tabla 4.10 Especificaciones del código ASME para cilindros de 907 kg

Cilindro de 907 kg	Especificaciones de construcción
Presión de diseño	21.00 kg/cm ²
Presión de prueba	35.00 kg/cm ²
Diámetro exterior	762 mm (30")
Longitud total	2.080 mm
Tipo de cabezas	Semiélticas
Espesor nominal de cabezas	16mm (5/8")
Espesor de cuerpo	11.1 mm (7/16") mínimo
Material del cuerpo y cabezas	A-285-C
Factor de corrosión	20 %
Radiografiado	100 %
Relevado de esfuerzos	Sí
Tratamiento	Chorro de arena, aplicación de primarios anticorrosivo y acabado de esmalte color blanco
Tara	645 kg
Información marcada en el cuello	Número de serie del fabricante Fecha de pruebas Capacidad de agua (725.75 L) Presión de diseño (21.09 kg/cm ²) Temperatura de diseño (15.5 °C) Presión hidrostática (35.15 kg/cm ²)
Accesorios	Dos válvulas para cloro de 19 mm Seis fusibles de seguridad de 19 mm Un protector de válvulas Dos cuellos de 756 mm de diámetro
Notas generales	Aberturas roscadas son de 3/4" Pintura dos manos de primer y acabado de esmalte blanco

Ilustración 4.8 Corte de un cilindro para cloro de 68 kg



dos válvulas protegidas mediante un casco de acero, y conectadas a tubos de salida tanto de cloro líquido como gaseoso. Además, cuentan en cada tapa con tapones de alivio fundibles, colocados a 120° uno de otro (Ilustración 4.9). En caso de incendio o incremento de la temperatura, el metal de los tapones se licúa liberando la presión interna del cilindro y evitando así su posible ruptura.

El número de cilindros con que cada planta debe contar estará condicionado por la facilidad y confiabilidad del suministro de cloro. La reserva puede ser de 8 a 30 días, según el caso. A la cantidad resultante hay que agregarle un número

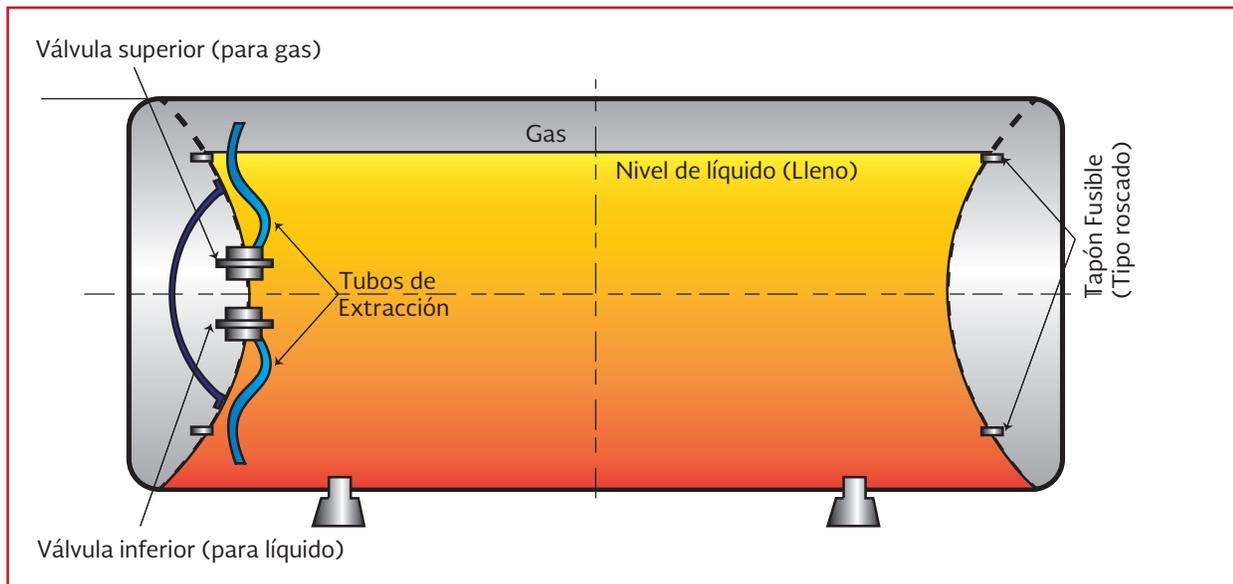
adicional de unidades para tomar en cuenta los cilindros que están en espera de ser transportados hasta la fábrica o los que están en camino.

Es importante que el fabricante entregue el certificado del tanque y de sus aditamentos, así como la gráfica de relevo de esfuerzos. Por lo anterior, si el proveedor no es el fabricante se le debe exigir la documentación para garantizar que los cilindros sean nuevos.

4.5.2 CARROS TANQUE

Los carros tanque se usan cuando el consumo de cloro es superior a 2.0 ton/d, por ejemplo, para

Ilustración 4.9 Accesorios de un cilindro de 907 kg



una dosis de 20, empleada por ejemplo para agua residual, equivale a 1.2 m³/s. Se emplean en combinación con evaporadores pues de ellos casi es sólo posible extraer exclusivamente cloro líquido. Tienen cinco válvulas encapsuladas en una cámara cerrada: dos para líquido, dos para gas y otra de alivio. Son apropiados para grandes instalaciones porque:

- Evitan el manejo de cilindros de 907 kg para los que se requiere poleas y grúas
- No es necesario usar cabezales para interconectar cilindros
- Simplifican la operación pues se conecta directamente a los evaporadores
- Según su tamaño, pueden durar ocho o más días sin tener que reemplazarlos
- Se pueden colocar separados de los cloradores en un patio de maniobras al aire libre

4.5.3 INSTALACIÓN DE LOS CILINDROS

Los cilindros pequeños, de 68 kg, deben siempre almacenarse y utilizarse en posición vertical. En

cambio, los de 907 kg se colocan en posición horizontal sobre soportes de rodamientos para que se puedan girar con facilidad. Conviene observar las siguientes precauciones:

- No mover los cilindros de 68 kg sin el capuchón protector colocado y debidamente atornillado
- Encadenar o amarrar los cilindros de 68 kg mientras están en servicio para evitar que puedan caerse y golpearse

Los cilindros de cloro se colocan directamente sobre una báscula con el objeto de medir la cantidad que se está dosificando, y saber cuándo estén vacíos. Para ello debe conocerse su peso neto (sin cloro). También, se les adaptan válvulas de intercambio que automáticamente cierran la alimentación al agotarse el cloro en uno o en el conjunto de los cilindros y la transfieren a los que están interconectados al mismo cabezal de alimentación, llenos y en reserva. Otra opción es colocar un manómetro, el cual basta con observarlo para saber cuál cilindro está en funcionamiento.

Por lo general, se debe dejar un espacio suficiente para tres recipientes: uno o dos fijos y otro para ser transportado con un remolque. Normalmente, las unidades fijas se llenan con las móviles, aunque éstas se pueden usar directamente como suministro.

Cualquiera que sea el tamaño del cilindro cuando se requieren varias unidades hay que conectarlas a un cabezal, cuyo diseño debe garantizar un flujo sin obstrucciones. Para ello, la temperatura de los recipientes debe ser más alta o igual a la de las tuberías, pues si ésta es inferior, el gas se licua y obstruye los cloradores.

Tanto para los cilindros como para los carros tanque se debe respetar lo siguiente:

Todos los cilindros y contenedores deberán ser almacenados en lugares donde se minimice la exposición a ambientes corrosivos

Evitar que el sol caliente los cilindros o carros tanque

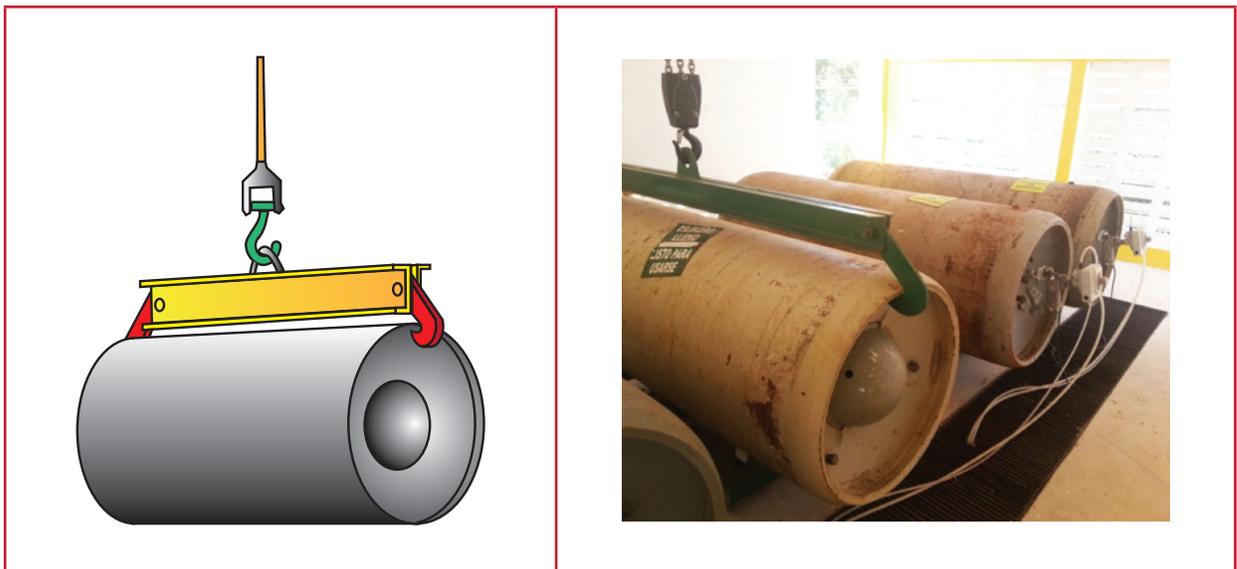
Nunca exponga a los cilindros y contenedores al fuego directo o a temperaturas extremas, ya que los fusibles provistos como protección, actuaran (cerca de 70° C), dejando escapar el cloro; por otro lado, el cloro puede iniciar fuego si se expone el acero a una temperatura de 250° C

4.5.4 TRANSPORTE Y ALMACENAMIENTO

El cloro es un elemento altamente peligroso, por lo que hay que extremar precauciones durante su transporte, ya sea de la fábrica a la planta de tratamiento o bien entre las diferentes instalaciones de la misma. Cuando se trata de cilindros pequeños (68 kg) el manejo se hace manualmente. En cambio, cuando se usan cilindros de 907 kg se necesitan poleas montadas y ganchos como los que se muestran en la Ilustración 4.10.

Por ello, las unidades automotrices que realicen el servicio, deben ser de plataforma abierta con redilas metálicas, especialmente para los tanques de 907 kg.

Ilustración 4.10 Mecanismo para mover cilindros de 907 kg



4.6. UNIDADES PARA APLICAR EL CLORO

Existen dos formas de aplicar el cloro: como gas o como líquido preparado a partir de solución de cloro. Como se mencionó, la primera se restringe a instalaciones que cuenten con medidas de seguridad suficientes para evitar y controlar fugas. La dosificación se regula mediante aparatos llamados cloradores cuando aplican gas o hipocloradores cuando usa la forma líquida.

Cabe destacar que el cloro a presión (líquido o gaseoso) se debe conducir por tuberías metálicas de acero de 1" de diámetro, sin costuras y cédula 80. No se debe usar PVC o plástico pues el cloro ataca rápidamente estos materiales. La Ilustración 4.11 presenta un diagrama para las diferentes opciones de aplicación.

4.6.1 HIPOCLORADORES

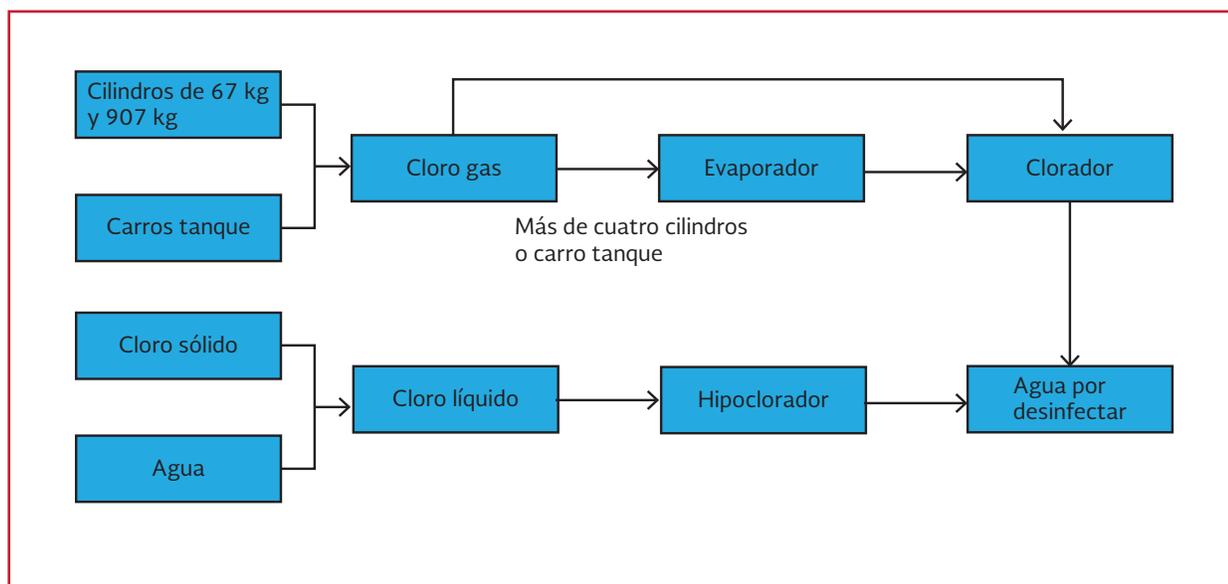
Aunque una solución de hipoclorito puede agregarse a un abastecimiento de agua mediante

dispositivos improvisados, lo que se usa con mayor frecuencia es una bomba de diafragma; sin embargo, existen otros dispositivos disponibles, tales como los tanques de presión en los que se almacena la solución de hipoclorito, la cual es forzada a salir mediante bombeo de agua, aire o un aceite inerte. Sin embargo este último no suele usarse en plantas de tratamiento de agua (Hilleboe, 1994).

La selección del equipo depende primordialmente de las características de cada instalación, como son: el tipo de fuente de abastecimiento o de agua, la calidad del agua, el caudal, la facilidad de acceso al sitio, la existencia o inexistencia de energía eléctrica y la capacidad técnica de los operadores.

Por ejemplo, cuando el agua que se va a tratar fluye a gasto uniforme, como en un abastecimiento por bombeo, el equipo controlado manualmente es el más adecuado. Cuando el gasto no es uniforme es esencial el uso de un hipoclorador de alimentación proporcional (Hilleboe, 1994).

Ilustración 4.11 Clasificación de las unidades de suministro de cloro



4.6.2 CLORADORES

Existe una gran variedad (Tabla 4.11) que en general, se clasifican en dos tipos básicos: los de presión, donde el gas se inyecta directamente desde los cilindros, y los de vacío donde la constricción creada por un tubo Venturi produce una presión negativa que se transmite a través de todos los dispositivos internos de los cloradores y las líneas de conducción. Los primeros son más costosos, pero tienen la ventaja de que no necesitan suministro adicional de agua ni de energía eléctrica. Sin embargo, los de vacío, son más seguros y confiables, por lo que su uso es más extendido. Todos los equipos pueden ser instalados directamente en el cilindro de gas, sobre una pared, pedestal o en una caja separada, según sea el tamaño y la marca de los mismos. Comúnmente,

los de menor capacidad van directamente sobre el cilindro o adosados a la pared.

4.6.2.1 Cloradores de presión

El gas entra a la presión a la que está en el cilindro (de 5.3 a 6.3 kg/cm²) y llega a una válvula reguladora (A), en la cual se reduce la presión a 1.4 kg/cm². De allí, pasa por un medidor de caudal (C) que suele ser un rotámetro calibrado en lb/día o kg/h y un sistema de ajuste (D) que permite fijar el flujo. Finalmente, el cloro se inyecta a la tubería por medio de un difusor (F). En estos sistemas la contrapresión en el punto de inyección no debe ser mayor a la mitad de la presión del gas en el cilindro. Una válvula de seguridad (E) impide que un exceso de presión cause un accidente (Ilustración 4.12).

Ilustración 4.12 Esquema de un aplicador de cloro a presión

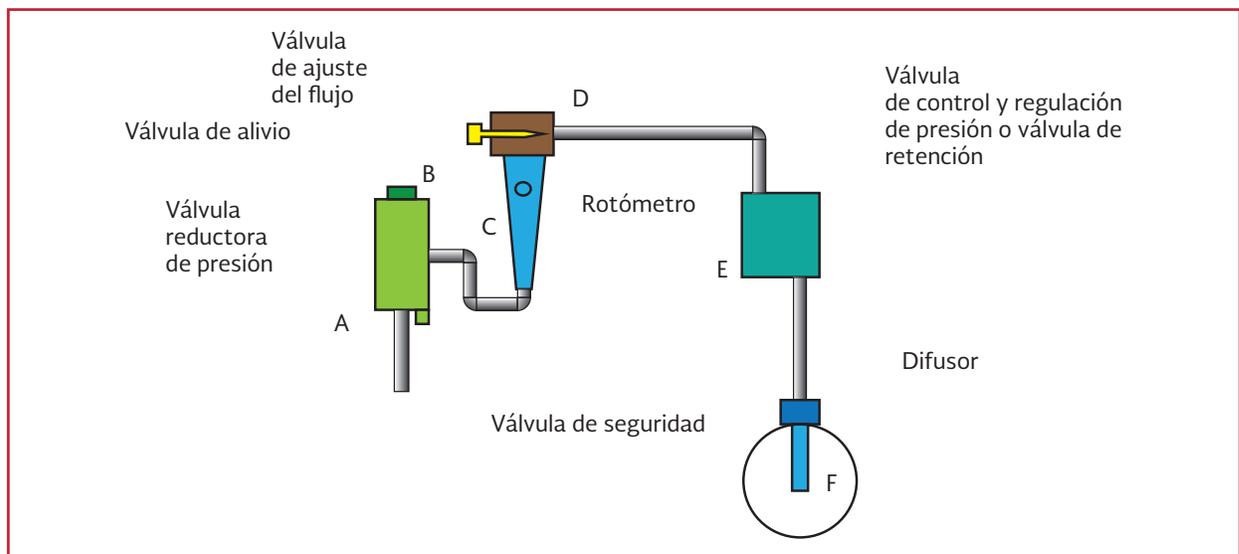


Tabla 4.11 Clasificación de aparatos cloradores

Tipo	Sistema de montaje	Capacidades	
		kg/d	lb/d
De presión	En pedestal	2 a 140	4 a 300
	Directamente en los cilindros	1 a 34	2 a 75
De vacío	En pedestal	35 a 5 000	77 a 11 000
	En la pared	1.4 a 250	3 a 550
	Directamente en los cilindros	1.4 a 230	3 a 500

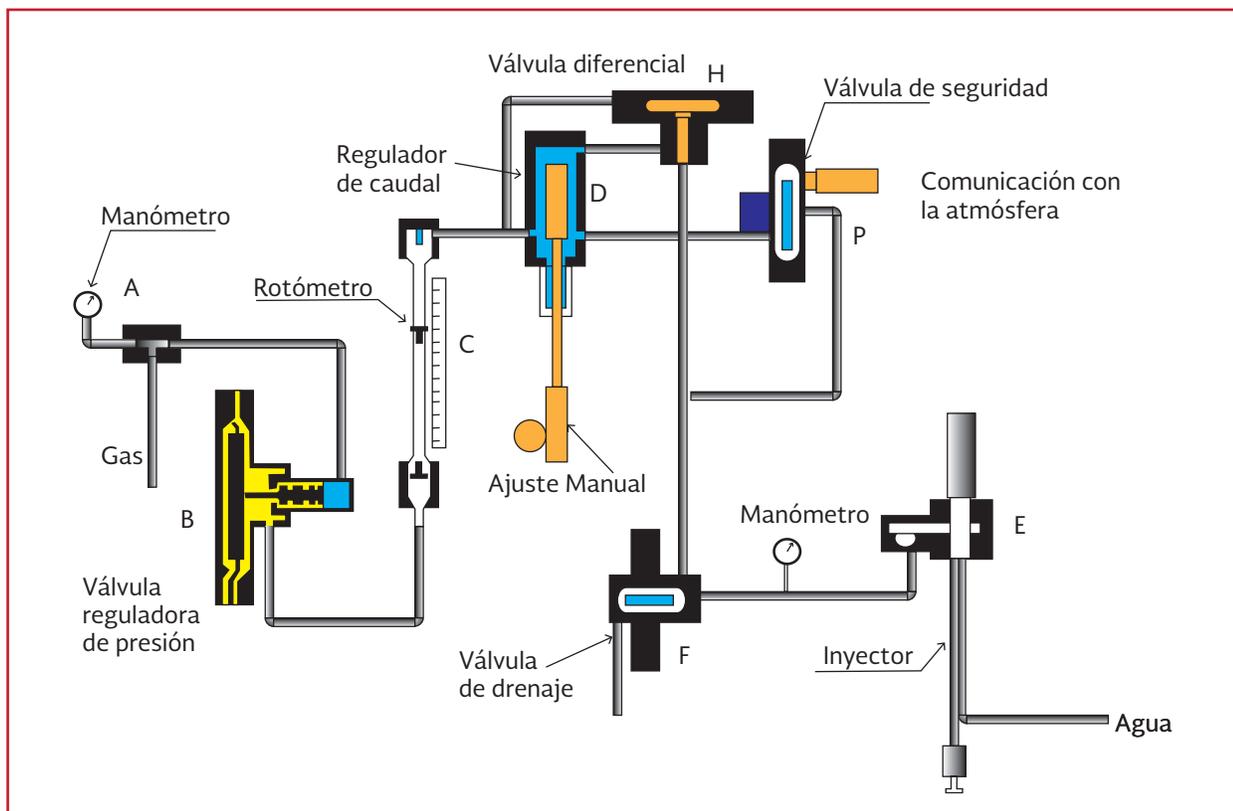
4.6.2.2 Cloradores de vacío

El funcionamiento de los cloradores al vacío está esquematizado en la Ilustración 4.13.

Para su funcionamiento, después del cilindro, se coloca un manómetro (A), un filtro y una válvula reductora de presión (B). El gas pierde toda su presión, hasta hacerse negativa, por efecto del inyector (E). En la válvula reguladora del vacío hay un muelle y un diafragma que sirve para cerrar el suministro de gas en caso de accidente. El vacío inducido por el inyector tiene que ser mayor que la fuerza que desarrolla el muelle para que el diafragma se abra y entre gas al clorador. Por tanto, dicha válvula separa el gas que viene a presión del que está en el vacío y se coloca fuera del clorador para aislar la zona en que hay cloro gaseoso a presión (en la que los escapes de cloro

son más probables) de la en que hay vacío (en la que prácticamente no puede haber escape). En los aparatos menos recientes la válvula reguladora del vacío va dentro del clorador. El gas cloro que sale de la válvula (B) pasa a un rotámetro (C), que mide el flujo. Cada modelo tiene un juego de rotámetros para medir diferentes intervalos de caudales. El ajuste diferencial de vacío (válvula H) tiene por objeto regular la presión después del orificio medidor (D). Consiste en una caja que contiene un diafragma operado por un muelle que regula la posición, de acuerdo con el vacío producido por el eyector, de forma que se mantenga dentro de los valores establecidos. Una válvula de alivio (F) se abre cuando se excede cierto límite y permite la succión de aire para evitar que salga el cloro a la atmósfera. Esta válvula tiene un tubo ventilador que descarga fuera del recinto donde se encuentran los cloradores.

Ilustración 4.13 Esquema de un aplicador de cloro al vacío



Los dispositivos de regulación del flujo varían según la marca y clase de aparato. En algunos casos, usan un orificio en V que puede desplazarse hacia arriba o hacia abajo, aumentando o disminuyendo el área de paso. En otros, se usa un cono dentro del cual se mueve una pieza que puede aumentar o disminuir la sección. Por último, otros fabricantes incluyen un orificio regulado por una válvula de aguja. Estos dispositivos permiten controlar la tasa de flujo con la cual trabaja el clorador y pueden ser operados manual o automáticamente, según sea el modelo. Para la operación automática que regula el flujo de acuerdo con la dosis requerida o caudal tratado, se requiere un actuador o comando electrónico (Ilustración 4.14).

4.6.3 EVAPORADORES

Se usan en estaciones grandes de cloración (< 1 000 kg) donde al requerir más de cuatro cilindros conectados al mismo cabezal se tienen problemas para extraer el gas, o bien cuando se emplean carros tanque que sirven como almacenadores y suministro. El cloro líquido se extrae con las siguientes ventajas:

- Disminuye el número necesario de cilindros en servicio, pues cuando se extrae cloro líquido no existe la limitación de flujo que se mencionó ocurre cuando se extrae en estado gaseoso.
- Se puede vaciar la totalidad del cilindro en corto tiempo con velocidades de hasta 900 kg/h.
- Se evita la re-licuefacción del cloro en las líneas de conducción, especialmente cuando la longitud de la tubería va del sitio de almacenamiento al lugar de aplicación.

Los evaporadores, se instalan lo más cerca posible de los equipos de cloración y consisten en un tanque sumergido dentro de un baño de agua caliente, cuya temperatura es controlada por un termostato entre 70 y 75° C. Esto hace que el cloro pase de estado líquido al gaseoso y de esta forma sea llevado a los cloradores (Ilustración 4.15).

Entre los cilindros o el carro tanque y el evaporador debe haber los siguientes elementos:

Ilustración 4.14 Dispositivos de control del flujo de cloro

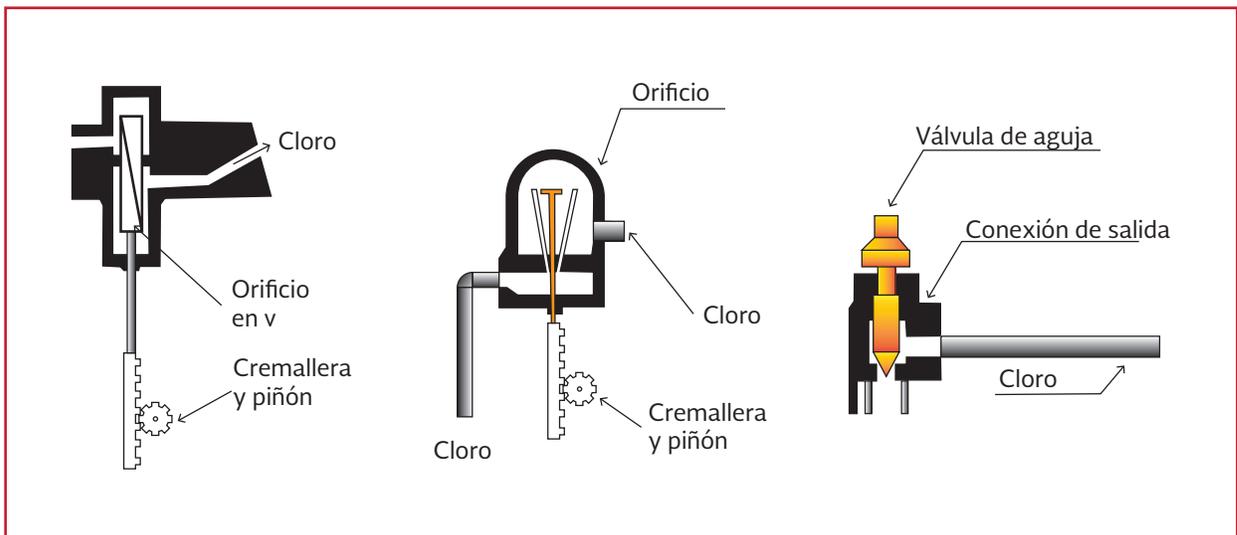
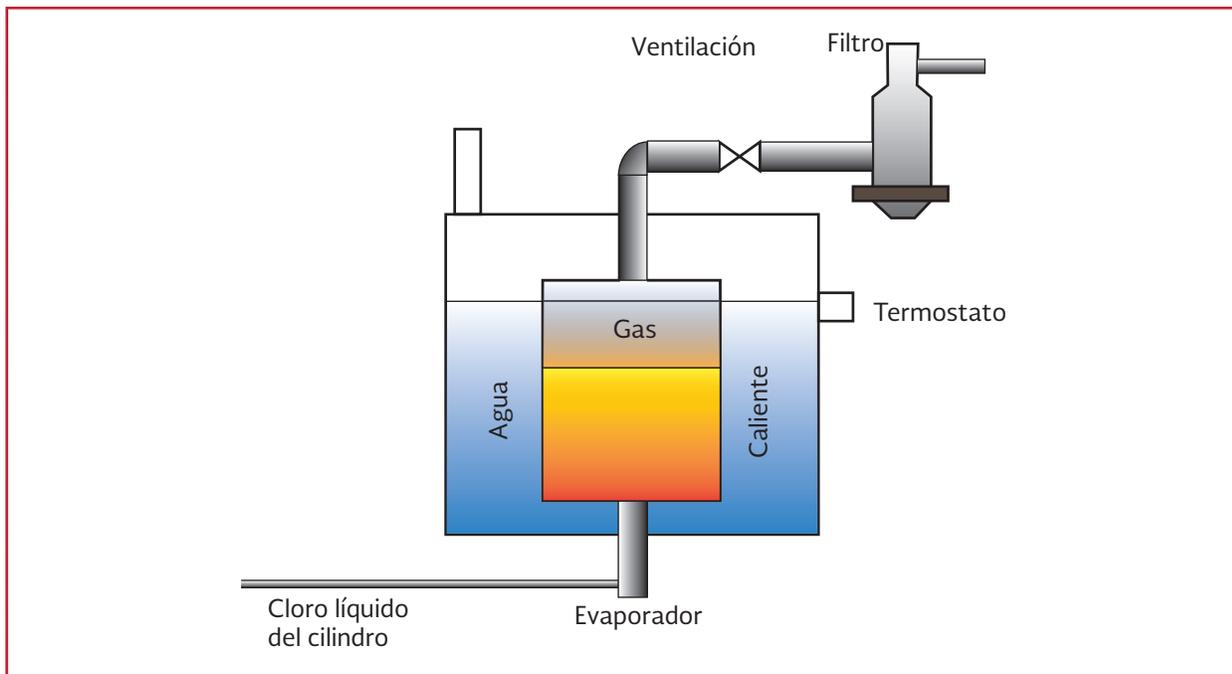


Ilustración 4.15 Instalación de un evaporador



- Una válvula de corte para suspender el suministro
- Un manómetro para conocer la presión del líquido en el tubo
- Un disco para romper la presión y la lleve a 28 kg/cm²
- Una cámara de expansión cuando haya riesgo de que quede cloro líquido atrapado entre dos válvulas y en donde la presión tienda a subir al aumentar la temperatura con la consiguiente rotura de las tuberías. El cloro líquido cuando se expande incrementa su volumen en 400 veces
- Un interruptor de presión con alarma protegido por un diafragma, para advertir al operador sobre peligro de explosión de las tuberías
- Una válvula de corte para aislar el evaporador cuando se necesite
- Una unión con discos para romper la presión que sirve para proteger las tuberías
- Un interruptor de presión con alarma para alertar al operador cuando se exceda la presión
- Una válvula de alivio y seguridad con escape de aire
- Un manómetro para medir la presión del gas a la salida del evaporador
- Un filtro para remover las impurezas y conservar sin obstrucciones las válvulas del clorador.
- Una válvula reductora de presión de 7 a unos 2.8-3.5 kg/cm² y de cierre automático que actúa en caso de falla eléctrica

A la salida del evaporador, cuando el cloro se transforma en gas a presión y antes de los cloradores, debe haber:

Cuando se emplean evaporadores, el cloro debe ser de buena calidad pues si hay cantidades apreciables de tricloruro de nitrógeno como impureza se pueden presentar explosiones que constituyen un serio riesgo para los operadores y la infraestructura de la planta.

4.6.4 INYECCIÓN

Para conseguir los mejores resultados del cloro, éste se debe aplicar cuidando mantener una mezcla completa con toda el agua por desinfectar, un suministro continuo y una dosificación acorde con la calidad del agua.

La mezcla inicial es fundamental. Un régimen turbulento conduce a índices de remoción de dos órdenes de magnitud mayores a los conseguidos en un reactor de mezcla completa. A pesar de ello no se conoce la turbulencia "óptima" y sólo se considera recomendable tiempos de mezcla del orden de un segundo (Metcalf & Eddy, 2003).

4.6.4.1 Mezcla rápida y difusión

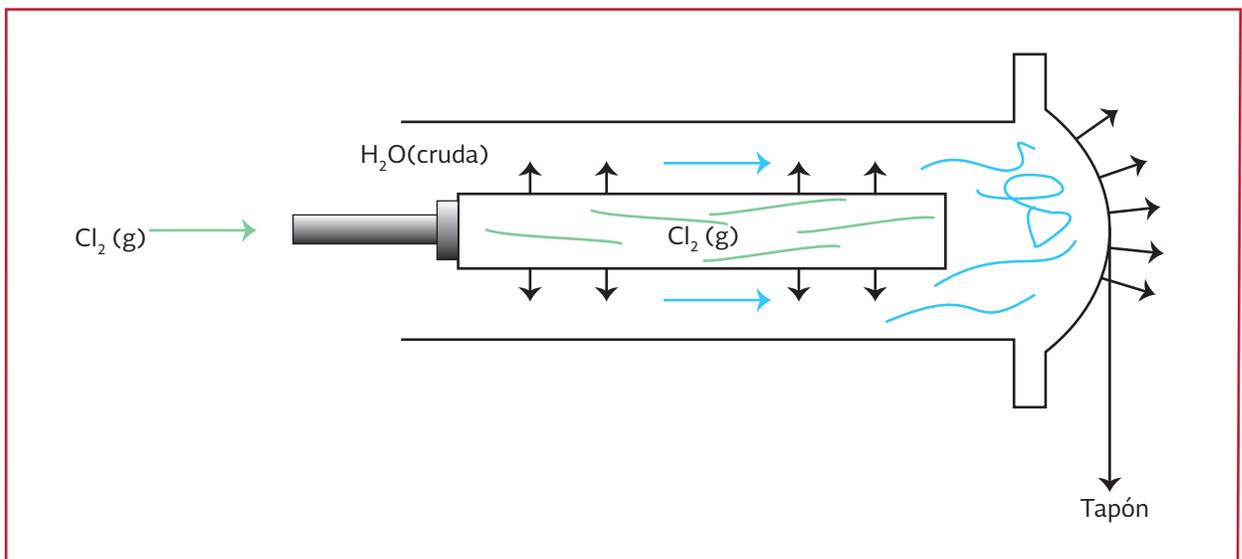
Debido a que es muy difícil disolver un gas a presión en un líquido, sin que se produzcan grandes escapes, el cloro se inyecta en una solución acuosa. La función del inyector es crear

un vacío para permitir la disolución del gas en el agua, lo que tiene la ventaja adicional de facilitar la cuantificación de éste en el rotámetro, al mantener en esas condiciones una densidad constante durante el paso por él.

La mezcla rápida del cloro con el agua tiene diversos beneficios, el primero, aunque ocurre momentáneamente, es que con un buen mezclado existe una mejor distribución de HOCl, el cual entra en contacto con los microorganismos ejerciendo su efecto biocida.

Comúnmente el difusor se encuentra dentro de la tubería de alimentación de agua filtrada, al llegar, se topa con un obstáculo (tapón perforado) que genera un flujo turbulento dentro del mezclador. Por su parte el cloro es liberado por el cuerpo poroso, y gracias a la turbulencia generada en el interior se logra una eficiente mezcla. Al salir del mezclador, el patrón de flujo cambia hasta lograr una aproximación al de tipo pistón, ver Ilustración 4.16 (US. EPA, 1986).

Ilustración 4.16 Sistema de mezclado cloro gas – agua



4.6.4.2 Difusores del cloro

La solución de cloro también puede aplicarse en tuberías o en canales, en donde el agua está en movimiento. Nunca en tanques de almacenamiento por la dificultad para inducir una mezcla rápida. Cuando se trata de tuberías, puede utilizarse un difusor como el que se esquematiza en la Ilustración 4.17. Su diseño se basa en los principios dados para los filtros múltiples. La turbulencia puede crearse utilizando un alto Número de Reynolds en la tubería, aguas arriba del difusor. Los fabricantes venden también difusores cerámicos que realizan una dispersión más completa del flujo pero son más costosos. También, pueden emplearse mallas en tubos. El mismo tipo de elementos pueden usarse en los canales, pero debe ponerse cuidado en evitar que produzcan “humos de cloro”. Para ello, se debe emplear una profundidad mínima de 1.50 a 2.0 m de agua y, si es posible, diseñar sistemas como los que se incluyen en la Ilustración 4.18.

4.6.5 OPERACIÓN DE LOS CLORADORES

La operación puede hacerse manual o automáticamente, como se muestra en la Tabla 4.12.

4.6.5.1 Simple con determinación ocasional de cloro residual

Consiste en ajustar el clorador para que inyecte una dosis fija y predeterminada de cloro, la cual

se verifica sea la adecuada cada cierto tiempo haciendo en laboratorio el análisis del cloro residual. En caso necesario, manualmente se corrige la cantidad que se está aplicando. Este tipo de operación requiere determinar dos parámetros: demanda de cloro y caudal de la planta. Su uso se recomienda cuando éstos dos no varían con frecuencia, de manera que los ajustes periódicos puedan hacerse con facilidad. Se recomienda en plantas pequeñas donde métodos más complejos de control están condenados al fracaso (Ilustración 4.19).

4.6.5.2 Con analizador permanente y alarmas

Posee un registro permanente del cloro residual que permite el uso de alarmas y de cartas registradoras que indican en cualquier momento fallas en la dosificación. Constituye una forma de vigilancia permanente, pero implica también, la determinación de dos parámetros: la demanda de cloro y la del caudal tratado. Por tanto, su uso es recomendado cuando éstos no varían frecuentemente y la operación de la planta es continua (Ilustración 4.20).

4.6.5.3 Ajuste de dosis proporcional al flujo tratado (circuito abierto)

Constituye un método de control de circuito abierto en el cual las lecturas registradas de presión diferencial son convertidas por un “traductor” en impulsos eléctricos o neumáticos que

Tabla 4.12 Sistemas de control de cloradores

Método	Sistemas de control
Manual	I. Simple con determinación ocasional de cloro residual
	II. Con analizador permanente y alarmas
	III. Ajuste de dosis proporcional al flujo tratado (circuito abierto)
Automático	IV. Ajuste de dosis proporcional a la demanda (circuito cerrado)
	V. Ajuste de dosis proporcional tanto a la demanda como al flujo tratado (circuito compuesto)

Ilustración 4.17 Difusores

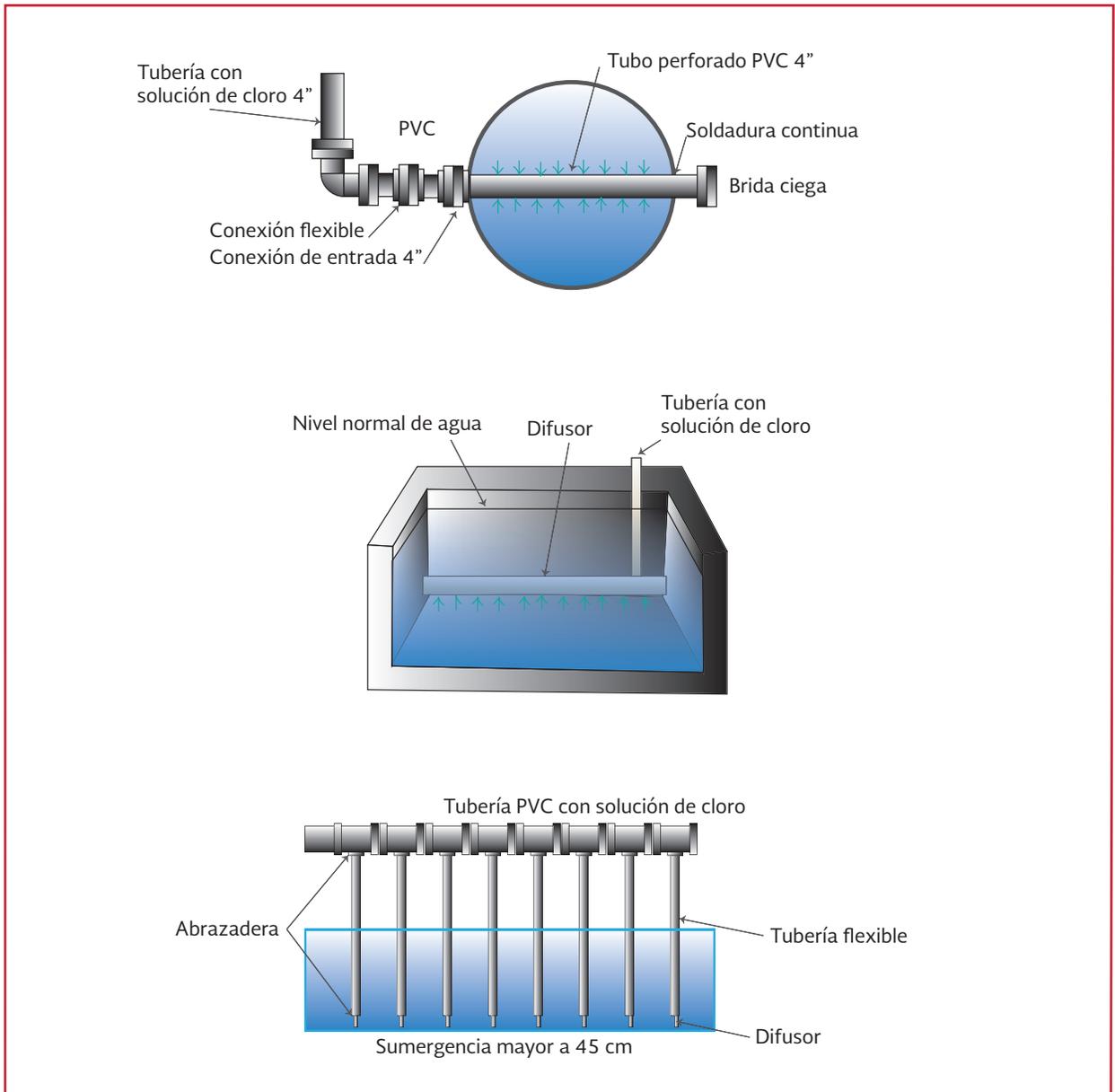


Ilustración 4.18 Sistema de difusores

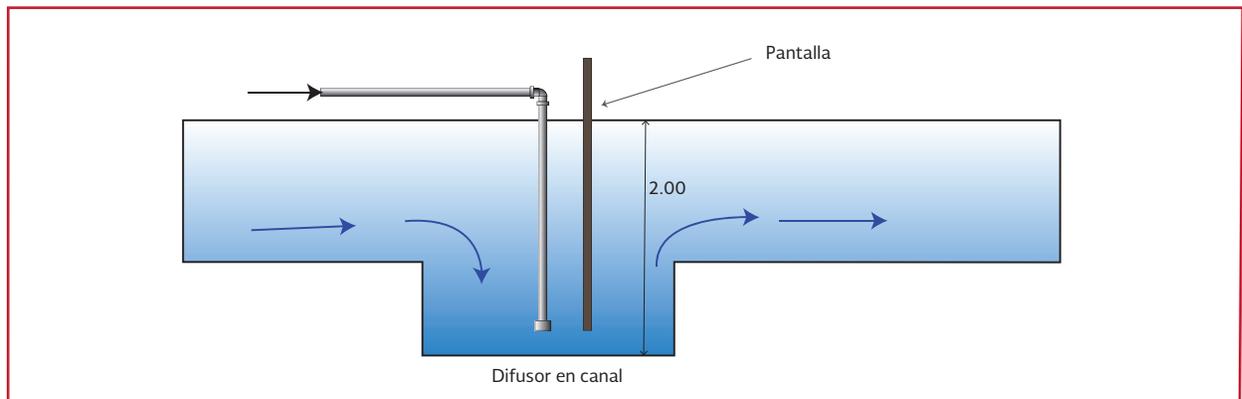


Ilustración 4.19 Operación simple con determinación ocasional de cloro residual

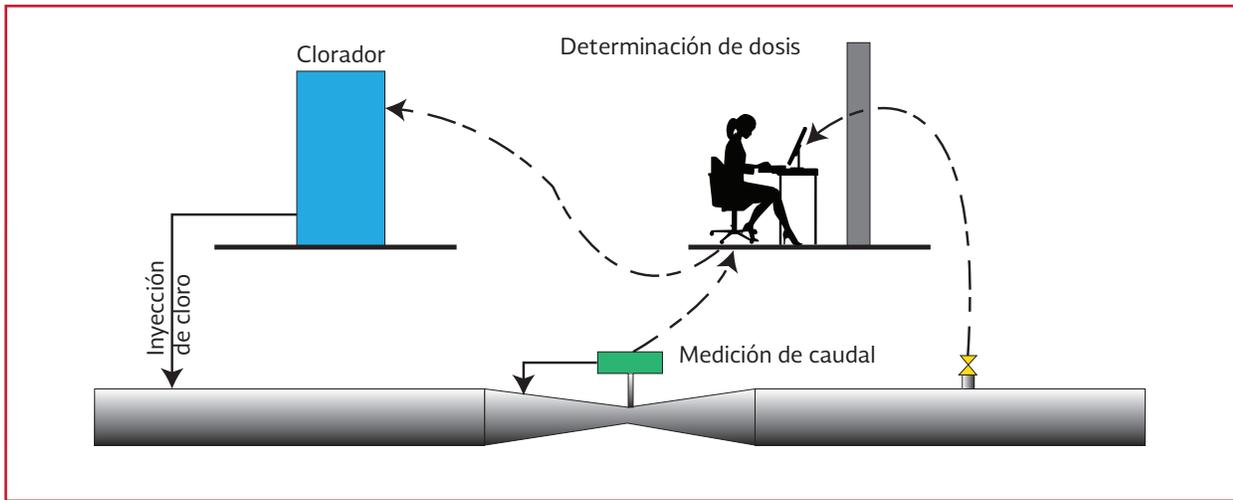
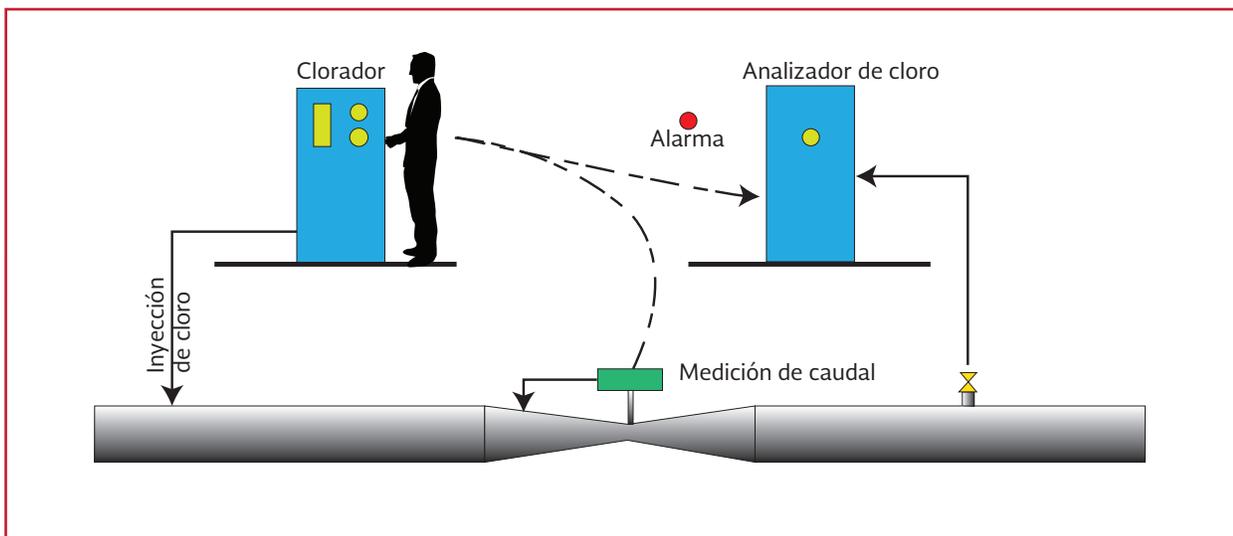


Ilustración 4.20 Operación con analizador permanente y alarmas



modifican la posición del mecanismo regulador del clorador y aumentan, disminuyen o cierran el flujo del gas. Este método es muy conveniente cuando no hay variaciones rápidas de la demanda, pero sí hay interrupciones frecuentes en el abastecimiento de agua o fluctuaciones constantes en el caudal tratado, como sucede a menudo en las estaciones de bombeo de pozos profundos. Aquí la única determinación que el operador debe ejecutar es la evaluación de la dosis de cloro (Ilustración 4.21).

4.6.5.4 Ajuste proporcional a la demanda (circuito cerrado)

Es un método de control de circuito cerrado en el que después de 15 a 30 segundos de inyectado el cloro, una muestra continua de agua es tomada y analizada por un medidor de cloro residual. Del resultado depende que se modifique o no la tasa de flujo del clorador. Su uso es recomendable en los casos en que el gasto es casi constante, pero la demanda de cloro

4.6.5.5 Ajuste de dosis proporcional tanto a la demanda de cloro como al flujo tratado (circuito compuesto)

Es un sistema de control en el cual el orificio de regulación del clorador es operado tanto por los diferenciales de presión del sistema de aforo, como por el analizador de cloro residual, de acuerdo con la demanda. El sistema puede ser eléctrico o neumático según el fabricante. Su uso se recomienda en plantas de tratamiento grandes en donde existen frecuentes fluctuaciones tanto del caudal como de la demanda de cloro (Ilustración 4.23). El funcionamiento del equipo es totalmente automático y la intervención del operador se limita a la vigilancia del sistema.

4.6.6 SELECCIÓN DEL SISTEMA DE CONTROL

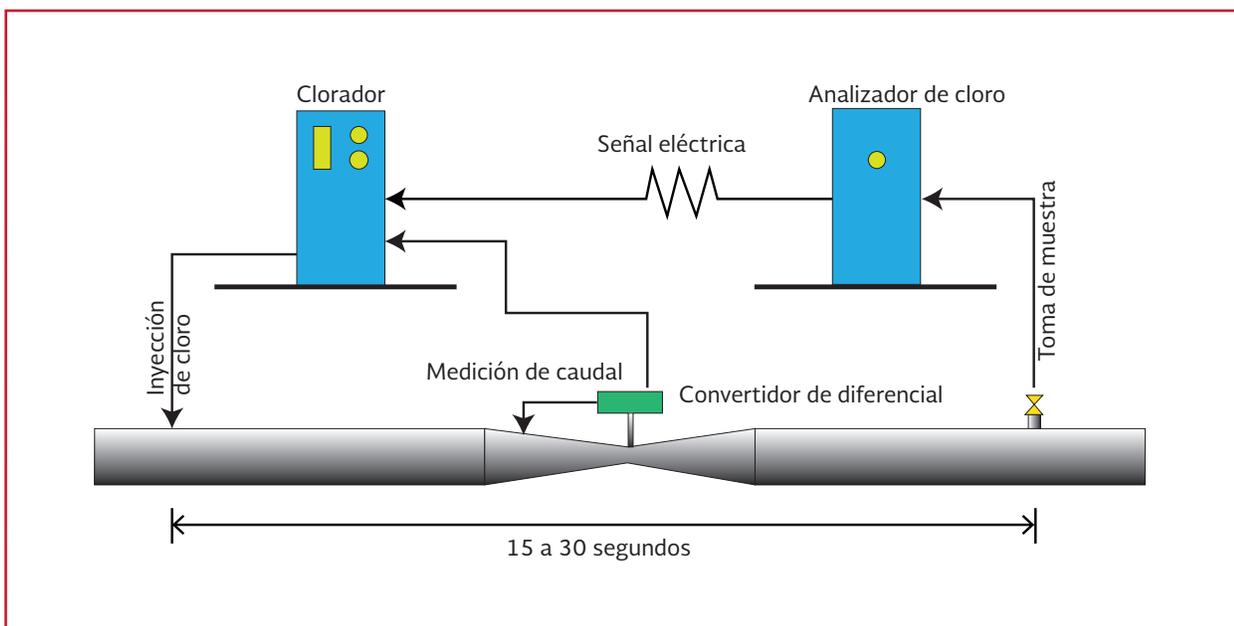
En los métodos descritos, la diferencia principal es el grado de automatización. Para decidir sobre cuál conviene más, el ingeniero debe hacer un

análisis detallado de las condiciones en que van a quedar instalados los cloradores, del personal que los va a manejar y de la calidad de agua a tratar. La operación manual simple tiene un mínimo de mecanización, pero un máximo de intervención personal. El uso de analizadores permanentes de cloro residual mejora la supervisión del proceso, pero introduce un equipo que hay que calibrar y mantener. El método del circuito abierto automatiza los arranques y paros del clorador, pero deja al criterio del operador fijar la dosis. El método del circuito cerrado, en cambio, automatiza la dosis pero deja al operador la apertura o cierre del equipo. El método del circuito compuesto automatiza la operación total del clorador, pero implica la supervisión y mantenimiento de un equipo complejo y delicado.

4.7. DISEÑO

Para diseñar una unidad de cloración se debe definir:

Ilustración 4.23 Ajuste de dosis proporcional tanto a la demanda como al flujo tratado (circuito compuesto)



- La dosis óptima en relación con la demanda y tiempo de contacto para un agua específica
- La forma del cloro que se va a emplear (gas o sólido)
- El consumo diario, el método de cloración más conveniente, el punto de inyección y el equipo necesario para ello
- El almacenamiento de cloro de acuerdo con el tipo de estibamiento para el cloro sólido o el número de cilindros y su tonelaje
- Los espacios o áreas que debe tener la sala de cloración
- Los métodos para afrontar las emergencias, los equipos usados en ellas y el plan de contingencia
- El método de control (manual, automático, semiautomático, etcétera)

4.8. MEDICIÓN DEL CLORO RESIDUAL

La desinfección del agua se controla tomando como indicador el cloro residual existente en el agua ya sea libre para agua potable o combinado para agua residual. Desde principios de siglo pasado se han desarrollado diferentes métodos para ello. A la fecha existen una gran variedad, por lo que debe ponerse especial cuidado en los límites de detección y las interferencias que cada uno tiene. Por desgracia, es frecuente que muchos operadores e ingenieros adopten un sólo procedimiento analítico que aplican indiscriminadamente sin cuidar las variables que pueden invalidar el ensayo. Hay métodos, como por ejemplo el yodométrico que sólo debe usarse para concentraciones mayores de 1.0. Otros, por su complejidad como el de leucocristal violeta (APHA, AWWA y WPCF, 1995) son difíciles de manejar. En la Tabla 4.13 se muestran algunos de los más utilizados. Los más antiguos son el yo-

dométrico y el de la ortotolidina. Este último, a pesar de ser un método rápido de determinación de cloro residual, no es recomendable debido a su baja confiabilidad y precisión, así como tampoco por su naturaleza tóxica. Los Métodos Estándar han eliminado la ortotolidina de sus técnicas, y su descripción se omite en este trabajo.

En la actualidad, el método más confiable es el de DPD (N,N-dietil-p-fenilendiamina), que sirve para determinar no sólo el cloro total sino también para diferenciar entre el libre y el combinado, así como el método amperométrico. En este último, una celda produce una corriente eléctrica que es proporcional a la concentración de cloro. La corriente es medida y transformada a un indicador y se puede determinar, en forma separada, el cloro libre y combinado.

4.8.1 ANALIZADORES AUTOMÁTICOS

Dada la importancia de mantener un adecuado residual de cloro en el agua, el uso de analizadores automáticos es común cuando:

- El gasto que se trata es variable de hora en hora
- La demanda de cloro cambia frecuentemente durante el día
- La contaminación es muy grande ($>2.0 \times 10^4$ coliformes)
- Se quiere mantener registros permanentes del cloro residual, lo que facilita grandemente la supervisión y control del proceso de desinfección.
- Se desea obtener residuales de cloro libre (cloración por arriba al punto de quiebre) para agua potable
- Existe una combinación de los factores anteriores

Tabla 4.13 Métodos más conocidos para la determinación del cloro residual

Método	Determina	Reactivos	Interferencias	Procedimiento	Límite de detección
DPD	Cloro total	N,N-dietil-p-fenilendiamina (DPD)	Óxidos de manganeso (puede compensarse) pH entre 6.2 y 6.5	Titulométrico	0.018
	Cloro libre	Solución tampón de fosfato		Colorimétrico	0.01
Amperométrico	Cloro combinado	Yoduro de potasio	NCl ₃ Dióxido de cloro Halógenos libres Cobre Plata	Titulación	0.2
	Monocloramina	Solución de sulfato ferroso amoniacal		Titulación Bajo Nivel	0.010
	Dicloramina				
	Tricloruro de N.				
Yodométrico	Cloro total	Yoduro de potasio	Fe	I	0.04
		Almidón	Mn	II	1
Siringaldacina (PCLD)	Cloro libre	Ácido acético glacial	Concentraciones altas de monocloraminas (35) y de manganeso oxidado	Fotométrico	0.1
		Indicador de siringaldacina		Colorimétrico	
		2- propanol			
		Hipoclorito			
		Soluciones tampones			

- Hace posible la operación automática de los cloradores

Existen diferentes tipos de analizadores: el amperométrico, el voltamétrico, el polarográfico y el potenciométrico. Unos miden sólo cloro total, otro cloro libre y combinado. Puesto que son equipos delicados, que requiere buena calibración y mantenimiento; además, sólo deben instalarse donde esto sea posible.

El cloro en solución puede medirse utilizando una celda especial (amperométrica), que puede determinar también la concentración del yodo y el bromo (pero no del flúor). Sin embargo, no puede medir la concentración del cloro reducido o combinado. Funcionan con base en el principio de medir la energía oxidante del cloro en solución (capacidad relativa para aceptar electrones). Así, la celda amperométrica mide la

cantidad de corriente que fluye entre dos electrodos y que es proporcional a la concentración del constituyente electroactivo. Normalmente, una celda amperométrica tiene un electrodo de platino y otro de cobre. Uno de ellos es pequeño, de modo que puede polarizarse fácilmente. Cualquier sustancia de la solución que despolarice ese electrodo hará que fluya una corriente a través de la muestra que se está analizando. El flujo de la corriente es producido por la migración de la sustancia electroactiva a la superficie del electrodo polarizado, y es proporcional a la concentración del material electroactivo. La determinación se efectúa en la siguiente forma: se agrega una solución de yoduro de potasio, y tanto el cloro combinado como el libre reaccionan con éste para producir yodo en una cantidad proporcional a la cantidad del cloro presente. De esta manera la celda mide, en realidad, la concentración del yodo que ha sido liberado. Cuan-

do el pH del agua es inferior a 6.0 o superior a 8.0 se requiere la amortiguación de la muestra, de lo contrario, el yoduro se descompone.

Las celdas amperométricas tienen un coeficiente de temperatura de aproximadamente 2 por ciento por grado centígrado. Por lo tanto, cambios pequeños de este coeficiente pueden producir errores substanciales. El equipo puede proporcionar una compensación manual o automática de este factor.

4.8.2 DETERMINACIÓN EN CAMPO

Conviene tener en cualquier planta este equipo para verificar rápidamente el funcionamiento adecuado de aparatos complejos, o bien, hacer unos de ellos en caso de fallas de los otros. El procedimiento es de tipo colorimétrico y emplea la ortotolidina, reactivo que al adicionarse al agua clorada cambia de color. La intensidad varía desde el amarillo pálido al anaranjado rojizo, los colores pálidos indican bajos contenidos de cloro residual y las fuertes concentraciones altas. Es importante considerar que si el agua contiene nitritos, hierro o manganeso (los dos últimos en concentraciones mayores de 1), se produce un falso color con la ortotolidina.

Los medidores de cloro residual se encuentran ampliamente difundidos en el mercado nacional, además, pueden medir el pH. Son equipos confiables, precisos y de operación sencilla. El comparador que se usa en abastecimientos de agua potable puede medir el cloro residual y pH de acuerdo a los siguientes valores: 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0, 1.2, 1.5, 2.0 ppm y 7.2, 7.4, 7.6, 7.8, 8.0, 8.2, 8.4, y 8.6, respectivamente.

El equipo se suministra en una caja de plástico resistente, para permitir su traslado sin ningún

riesgo. Contiene las instrucciones detalladas del fabricante para realizar cada una de las pruebas necesarias y los siguientes componentes:

Recipientes debidamente titulados conteniendo: ortotolidina (reactivo para la prueba de cloro residual) y rojo cresol (para la prueba de pH)

Seis tubos para pruebas de 5 mL de capacidad (fabricados en vidrio –pues el plástico se mancha con los productos químicos o se decolora con la exposición a la luz y al aire)

Dos comparadores colorimétricos, uno para el cloro residual y otro para el pH (ambos son prismas rectangulares de 9.5 cm de ancho, 8.3 cm de altura y 1.9 cm de fondo, construidos de plástico resistente a los productos químicos. Los prismas tienen integrados los tubos sellados que contienen los colores patrones para cada residual de cloro o valor de pH, teniendo impreso el valor a que corresponde cada color

4.9. SEGURIDAD

Para proteger al personal es necesario contar con un mínimo de equipo, ya sea para alejarse del punto en el que se suscitó la emergencia o para tomar las acciones necesarias para afrontarla y controlarla. Las emergencias más comunes son incendios, explosiones o fugas de cloro, ya sea en la instalación propiamente dicha (equipos de cloración, tuberías, conexiones) o en los tanques de almacenamiento.

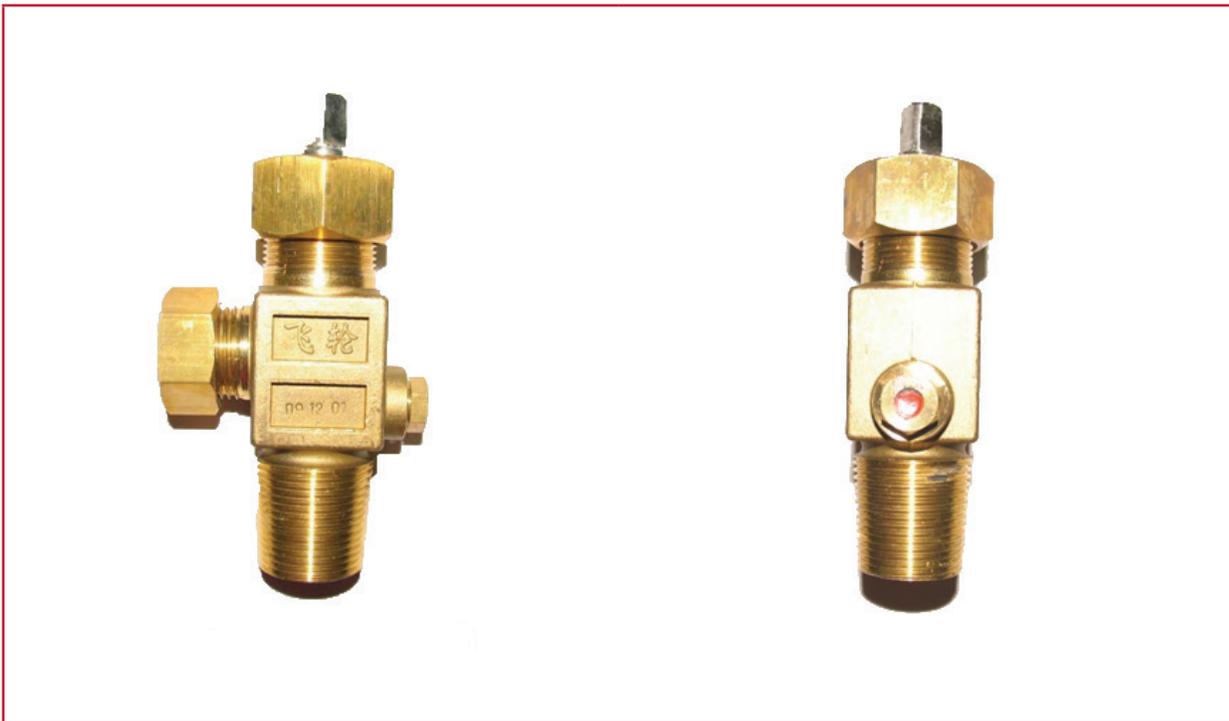
Una primera línea de seguridad es la inherente al equipo y se refiere a los aditamentos de seguridad con que cuentan los cilindros y los carros tanque, y que ya fueron mencionados en el apartado 4.6, así como la instalación de los mismos. A continuación se da mayor detalle de ellos.

4.9.1 SEGURIDAD INHERENTE AL EQUIPO

4.9.1.1 Válvulas de seguridad

Están diseñadas específicamente para los recipientes de cloro. En la Ilustración 4.24 se muestra la válvula tipo usada en cilindros de 68 y 907 kg. Su diseño prácticamente es igual con la diferencia de que en la primera hay un tapón fundible abajo del asiento de la válvula. En tanto que en los tanques de 907 kg, los tapones fundibles están instalados en sus tapas. Ambos se funden entre 70 y 73.9° C para que el cloro escape por el orificio. Por lo mismo, por ningún motivo deben bloquearse o inutilizarse. Por otra parte, la cuerda de la conexión de salida de la válvula no es estándar, sino una cuerda recta especial para evitar confusiones con la cuerda de conexión al tanque que es una rosca estándar de ¾ de pulgada.

Ilustración 4.24 Válvulas para cilindros de cloro



4.9.1.2 Equipo y manejo

El cloro gaseoso es más pesado que el aire y para evitar accidentes es preciso:

- Instalar los tanques en áreas elevadas y aisladas
- Mantener una temperatura entre 15 y 25° C

Además es importante tomar en cuenta que el cambio de las botellas de cloro es especialmente peligroso.

4.9.2 EQUIPO DE PROTECCIÓN

Una vez ocurrido un accidente debe entrar la línea de seguridad que se refiere a la detección y control del problema.

4.9.2.1 Detectores de fugas

Son indispensables en todas las instalaciones de cloro gas, para detectar en cualquier momento los escapes y poder repararlos sin peligro para los operadores de la planta.

La botella de amoníaco es la forma más antigua y probablemente la más común para detectar fugas. Al destaparla y acercarla al posible escape, se producen humos blancos que evidencian la presencia de cloro. Debe tenerse presente que, cuando empiezan las fugas de cloro pueden ser muy pequeñas pero a medida que continúan la formación de ácido clorhídrico en el escape corroe el metal, ensancha la abertura e incrementa el problema. De ahí que sea indispensable detectarla donde el inicio, antes de producir daños más graves.

Existen otros tipos de detectores. Los más comunes son los de pared y los internos de los aparatos. Los primeros pueden ser de dos tipos: un simple papel sensible al cloro impregnado con ortotolidina, cuya decoloración es analizada por una celda fotoeléctrica y los resultados transmitidos a un circuito de alarma. También incluyen celdas que detectan los cambios de conductividad de un cierto volumen de agua por la que se hace circular una corriente de aire proveniente del ambiente por analizar. Si existe cloro disuel-

to en la muestra, la alarma suena y permanece sonando hasta que se corrige la fuga.

Las alarmas internas, en cambio, se encuentran dentro de los recipientes de almacenamiento están acopladas a la válvula de alivio y suenan cada vez que disminuye el vacío por debajo de un límite fijado o que se incrementa por encima del nivel de operación. Lo primero puede ocurrir por una falla en el suministro de agua, el taponamiento del inyector, el incremento de presión de agua abajo del inyector, o por cualquier fuga en el sistema de vacío. Lo segundo, ocurre cuando existe una falla en el abastecimiento de cloro al clorador.

4.9.2.2 Equipo para reparar fugas

El Instituto de Cloro de los Estados Unidos fabrica diferentes tipos de herramientas que vienen en cajas especiales y sirven para reparar fugas, tanto en cilindros de 68 kg como en los de 907 kg.

Una caseta de cloración deben ser únicamente para los equipos e instrumentos necesarios para su adecuado funcionamiento, no ser usadas como bodega o dormitorio y contar con el equipo señalado en la Tabla 4.14.

Es indispensable que las personas que participan en estas actividades cuenten con máscaras de

Tabla 4.14 Equipos e instrumentos para controlar emergencias

Equipo de Seguridad	Especificaciones
Extintores	Tipo C, para combatir fuegos de origen eléctrico
Juegos de herramienta	Para atender emergencias en cilindros de cloro de 45, 68 y 907 kg. Estos juegos fueron diseñados por el Instituto del cloro para atender emergencias ocasionadas por desperfectos en el cilindro y permiten controlar fugas, originadas, ya sea en las válvulas o en el cuerpo de los cilindros.
Regaderas y lavaojos	De operación sencilla y en lugares estratégicos

gas con filtro para cloro, traje protector, guantes de goma y botas de goma.

Máscaras

Existen básicamente tres tipos

- a) Canister. Consisten de careta, tubo respiratorio, arnés y una lata de químico absorbente (Ilustración 4.25 e Ilustración 4.26). Debe reemplazarse periódicamente y no sirve para altas concentraciones de cloro en el ambiente

Se fabrican en varios tipos y proporcionan protección contra ciertos gases, vapores y partículas. Se selecciona para satisfacer condiciones de exposición específicas (por ejemplo, con careta que cubren toda la cara). Las latas de químico absorbente (canister) están etiquetadas y varían de acuerdo con el tipo de aplicación y limitaciones de uso. Tienen un código de color para un reconocimiento fácil y preciso. Se suministran en un estuche de plástico

Ilustración 4.25 Máscara para gas con tubo respiratorio para colgar en el pecho



Desde un punto de vista práctico son adecuadas para áreas ventiladas con niveles de concentración relativamente estables y no están diseñadas para atmósferas que contengan menos de 19.5 por ciento de oxígeno o peligrosas. Estas máscaras se usan “SÓLO PARA ESCAPE”, cuando:

- a. No existen concentraciones mayores de 2 por ciento en volumen de gases tóxicos o vapores
 - b. En casos de incendio
 - c. En espacios reducidos o en los que se puede dar deficiencia de oxígeno o elevadas concentraciones de gas
- b) Mascara con tanque de aire a demanda de presión. Está diseñada para mantener una ligera presión de aire dentro de la mascarilla durante la inhalación y la infiltración de contaminantes por el contorno de la mascarilla, (Ilustración 4.27). El equipo está formado por; mascara con válvula de inhalación con retención (check) que impide que el aire exhalado contamine el regulador montado en la mascarilla, lente de policarbonato, arnés

Ilustración 4.26 Máscara para gas con canister tipo barbilla



Ilustración 4.27 Máscara con tanque de aire a demanda de presión



Regulador de 2 etapas: cuentan con un regulador de primera etapa que reduce la presión del cilindro hasta una presión intermedia de 80 Psig y un regulador de segunda etapa montado en la mascarilla, que regula el flujo de aire a una presión levemente superior a la presión atmosférica, llamada presión positiva

Cilindro de Aire: Los hay disponibles en varias opciones; En baja presión (2 216 psig) para 30 min de duración, con cilindros recubiertos de fibra de carbono o, cilindros parcialmente recubiertos de fibra de vidrio. En alta presión (4 500 psig) para 60 min de duración

Cuenta con un arnés portador, es recomendable que sea de postura rápida

- c) Máscara de respiración autónoma. Este aparato debe usarse cuando no se conocen o se sospeche que las concentraciones de oxígeno y de cloro excedan los límites. Son los únicos que se recomiendan para los trabajos directos de control de fugas en instalaciones de cloración, en virtud de contar con un tanque de oxígeno o tener la opción de conectarse

a un equipo de suministro de aire (Ilustración 4.28). No tienen las limitaciones expresadas para las máscaras canister

El equipo consta de una unidad de soporte dorsal y un arnés, una unidad de cilindro y válvula para almacenar un suministro de aire respirable bajo presión, un reductor de presión de doble vía montado sobre el soporte dorsal, un regulador de respiración presión-demanda montado en la pieza facial, una pieza facial y un arnés para sujetar la pieza facial a la cara. Están equipados con indicadores de terminación del tiempo de servicio

Ilustración 4.28 Máscara de respiración autónoma



4.9.3 PREVENCIÓNES Y ACCIONES DE EMERGENCIA

En la Tabla 4.15 se indican las precauciones y acciones de emergencia en caso de fuga o incendio, para lo cual es muy importante recordar las características del cloro:

- No arde pero puede mantener la combustión

- Su mezcla con combustibles puede hacerlo explotar
- Puede incendiar materiales combustibles
- Reacciona con el agua produciendo corrosión
- Explota en los cilindros cuando se calientan

En la Tabla 4.16 se muestra la preparación y cantidades de solución para absorber el cloro, de acuerdo con la capacidad del cilindro dañado.

4.10. PRIMEROS AUXILIOS

4.10.1 EFECTOS FISIOLÓGICOS DEL CLORO

El cloro principalmente agrede al sistema respiratorio. En su forma líquida causa fuertes quemaduras en piel y ojos. Los daños son más severos a medida que la concentración y el tiempo de exposición son mayores. Puesto que

Tabla 4.15 Prevención y acciones en caso de emergencia

Prevención	<p>Contar con equipos de personal para el control de las fugas de cloro, rescate y atención de los intoxicados.</p> <p>Contar con juegos de herramienta para emergencias adecuado a los tamaños de cilindros de cloro 2.</p> <p>Efectuar simulacros de fugas de cloro periódicamente, para entrenar al personal en el uso del equipo de protección, control y reparación de fugas.</p> <p>Todo el personal que trabaje en áreas expuestas a la contaminación con cloro, debe portar mascarilla para gas cloro.</p> <p>Contar con todo el equipo de protección y reparación de fugas, tanto de la instalación misma, como de los cilindros, isocontenedores y carros tanque.</p>
Acciones de emergencia	<p>A causa de fuga de gas:</p> <p>Todo el personal no capacitado y que se encuentre cercano a la fuga, debe colocarse la mascarilla y alejarse del sitio, buscando ubicarse en lugares lo más elevado posible.</p> <p>El personal se debe alejar caminando tranquilamente sin correr y en dirección contraria al viento. Para saber la dirección del viento, se recomienda colocar veletas en los puntos más altos visibles de las instalaciones.</p> <p>Si la instalación se localiza en una zona habitacional, se deben tomar las medidas pertinentes para evacuar la zona.</p> <p>Avisar a las autoridades y a los cuerpos de vigilancia y auxilio, acordonar y alejar a los curiosos.</p> <p>Proceder de inmediato con personal capacitado y perfectamente equipado a controlar la fuga.</p> <p>Separar el recipiente que presente fuga de los demás, usando los juegos de herramientas para emergencias, manejándolo de tal forma que la fuga sea de cloro gaseoso y no líquido.</p> <p>Cuando ocurre una fuga del sistema de tuberías, cerrar inmediatamente las válvulas del recipiente de cloro.</p> <p>Nunca aplicar agua en una fuga de cloro, la aplicación de agua lo hace mucho más corrosivo.</p> <p>Cuando sea posible, conducir el cloro fugado mediante una tubería y absorberlo burbujeándolo a través de una solución de agua con sosa cáustica, soda ash o cal hidratada.</p> <p>A causa de incendio:</p> <p>Utilizar un agente extintor apropiado.</p> <p>Apagar el fuego desde la máxima distancia posible y utilizar soportes autónomos para mangueras o pitones reguladores.</p> <p>Retirarse de inmediato en el caso de que las válvulas de seguridad produzcan sonido o el cilindro se empiece a decolorar.</p> <p>Mantenerse alejado de los extremos de los cilindros.</p> <p>Alejar los cilindros del área del fuego, en caso de poder hacerlo sin riesgo. Enfriar los cilindros con volúmenes abundantes de agua para garantizar su enfriamiento, y manejar aquellos que presenten daños con sumo cuidado.</p>

Tabla 4.16 Preparación y cantidades de solución para absorber el cloro de acuerdo con la capacidad del cilindro dañado

Tamaño del recipiente de cloro (Kg)	Sosa cáustica		Soda Ash		Cal Hidratada	
	kg 100 %	Litros agua	kg 100 %	Litros agua	kg 100 %	Litros Agua
68	85	230	204	570	159	570
500	625	1 680	1 500	4 160	1 120	4 160
907	1 140	3 050	2 730	7 570	2 040	7 570

Nota: Las cantidades de la tabla absorben el contenido del recipiente en cada caso.

en presencia de humedad reacciona formando ácidos hipocloroso y clorhídrico, el cloro actúa como irritante de las membranas mucosas y de todas aquellas partes de nuestro cuerpo que contengan humedad. Aunque a temperaturas y presión normales es un gas, si es ingerido, puede producir quemaduras en la boca, esófago y estómago. El cloro se considera como un irritante del sistema respiratorio, de las membranas mucosas y de la piel. El cloro líquido causa fuertes quemaduras al contacto con la piel y en los ojos, los efectos son más severos a medida que es más alta la concentración y mayor el tiempo de exposición. Puesto que, en presencia de humedad reacciona formando ácidos hipocloroso y clorhídrico, el cloro actúa como irritante de las membranas mucosas y de todas aquellas partes de nuestro cuerpo que contengan humedad. Aunque a temperaturas y presión normales es un gas, si es ingerido, puede producir quemaduras en la boca, esófago y estómago. Los síntomas de la exposición a altas concentraciones consisten en náusea, y vómitos seguidos de una notoria dificultad para respirar. El cloro no tiene efectos acumulativos conocidos y todas las molestias que causa se deben directa o indirectamente a su acción irritante local. Sin embargo, las personas que dentro de su historial clínico padezcan enfermedades crónicas del aparato respiratorio, la piel o los ojos, no deben trabajar en áreas o instalaciones donde se maneje cloro. En la Tabla 4.17, se resumen los efectos toxicológicos del cloro a diferentes concentraciones.

4.10.2 ATENCIÓN A HERIDOS

Es conveniente aclarar que las medidas de primeros auxilios son exclusivamente de emergencia mientras se consigue la ayuda profesional correspondiente:

- Llamar a un médico inmediatamente
- Trasladar a la persona del área contaminada con cloro, a un sitio en el cual se le pueda mantener a una temperatura de 30° C, para lo cual, en caso necesario, se usarán cobijas o algún otro material que lo abrigue; es importante cuidar que no realice ningún tipo de movimiento para acelerar su recuperación
- Colocar a la persona acostada sobre su espalda con la cabeza elevada
- Si la persona ha sufrido salpicaduras de cloro líquido o de agua sobreclorada, se le debe quitar inmediatamente toda la ropa contaminada
- Las áreas del cuerpo que hayan estado en contacto con las salpicaduras o con la ropa, se deben lavar perfectamente con abundante agua y jabón por lo menos durante 10 minutos; jamás tratar de neutralizar el cloro con sustancias químicas; tampoco se deben aplicar ungüentos durante 24 horas
- Cuando los ojos hayan estado en contacto con el gas o cloro líquido, lávelos con mucha agua corriente cuando me-

Tabla 4.17 Efectos fisiológicos del cloro a diferentes concentraciones

Efectos Fisiológicos	Cloro (ppm)
Umbral de detección. Dosis máxima que puede ser respirada por una hora sin consecuencias graves, pero después de varias horas produce signos ligeros de envenenamiento.	1 – 4
Sensación de sequedad y quemaduras en nariz y garganta con prurito nasal, tos y pérdida de voz. En algunas ocasiones, los accesos de tos provocan expectoraciones hemorrágicas e intensos dolores musculares torácicos. Dolor de cabeza intenso. Predisposición a infecciones del tracto respiratorio con aparición de bronquitis crónica y tuberculosis pulmonar. En ocasiones se observan ulceraciones en la mucosa bucal, nasal y faríngea. En contacto con los ojos puede causar fuertes inflamaciones y lesiones. En contacto con la piel puede causar fuertes irritaciones y quemaduras químicas con ulceraciones y marcas en ésta.	6.0 – 15
Sensación de ahogo, sofocación y ansiedad. Tos quintosa (accesos intensos o constantes) con urgencia atrás del esternón. Salivación, náuseas y vómitos con dolor epigástrico. A este cuadro se asocia intensa cianosis (coloración azul púrpura de las mucosas y de la piel), con pulso tenso, dilatación, contracción de las venas del cuello y con aumento de la presión venosa. El cuadro sintomático puede agravarse al sobrevenir edema agudo del pulmón. Como secuela de la neumonía química resultante, puede quedar secuelas de bronquitis con enfisema y edema pulmonar.	15 – 30
Produce intoxicación grave en 30 a 60 minutos.	40 - 60
Dosis mortal en pocos segundos.	1 000

nos durante 15 minutos; se debe repetir el lavado por otros 15 minutos, los párpados deben mantenerse separados del globo ocular para asegurar que toda la superficie es rociada; al finalizar el lavado aplicar dos o tres gotas de hidrocloruro de tetracaína (pentocaína) al 0.5 por ciento, o algún otro anestésico acuoso de igual efectividad; no se deben aplicar aceites o ungüentos a menos que el médico tenga experiencia con alguno

- Si se ha inhalado cloro es recomendable administrar a la persona, una mezcla de bióxido de carbono y oxígeno (el

bióxido de carbono no debe rebasar el 7 por ciento) durante dos minutos de aplicación por dos de descanso, el tiempo total de aplicación no excederá de 30 minutos; en caso de no contar con el bióxido de carbono, se puede utilizar solo oxígeno, para esto se debe contar con el equipo apropiado

- Para aliviar un poco la irritación de la garganta, se puede suministrar leche condensada
- Si la respiración del paciente se ha detenido, se le debe practicar inmediatamente la respiración artificial

5

LUZ ULTRAVIOLETA

Si bien el cloro por su simplicidad de aplicación y bajo costo es la práctica más empleada, tiene la desventaja de generar productos secundarios denominados *organoclorados* y *trihalometanos* que se consideran carcinógenos. Como una alternativa existe la luz ultravioleta (UV), la cual sin generar subproductos es efectiva para inactivar organismos patógenos.

La radiación UV se ha usado comercialmente durante muchos años en industrias como la farmacéutica, de cosméticos, de bebidas y electrónica. Fue utilizada en agua de suministro a principios de 1900 pero se abandonó por sus altos costos de operación, los problemas de mantenimiento y la falta de disponibilidad de equipo. Sin embargo, la razón más importante fue que la cloración resultó ser más eficiente y rentable (Rajeshwar & Ibañez, 1997).

Paradójicamente, hoy en día la desinfección con luz UV es un proceso que está ganando terreno con respecto a la cloración debido a la estricta reglamentación de los productos secundarios que esta última ha generado. En los últimos 20 años, el uso de la luz UV se ha incrementado incluso en plantas de tratamiento de aguas residuales. Comparada con la clora-

ción, la luz UV desinfecta el agua residual sin la necesidad de almacenar o manejar reactivos químicos peligrosos y por sus cortos tiempos de contacto (del orden de segundos o minutos), reduce el tamaño de los tanques de tratamiento y con ello el costo (Rajeshwar & Ibañez, 1997). Actualmente, se han construido o planeado gran número de sistemas de desinfección con luz UV y por lo mencionado han resultado ser económicos y competitivos con respecto a la cloración.

Además, la luz ultravioleta tiene un campo de aplicación muy interesante al adaptarse por su simplicidad de operación a comunidades rurales y aisladas, por ejemplo:

Los resultados en la aplicación de paneles fotovoltaicos en las escuelas primarias, para el desarrollo del programa de medios audiovisuales, así como los trabajos experimentales de laboratorio sobre el poder germicida de la luz ultravioleta y la necesidad de desinfección del agua en zonas rurales, sugirieron la posibilidad de aprovechar el sistema energético ya instalado, en la aplicación de forma experimental de este método de potabilización en algunas escuelas primarias rurales en Cuba (Sarmiento *et. al.*, 2003).

5.1. FUNDAMENTOS

5.1.1 CARACTERÍSTICAS

La luz ultravioleta es una radiación electromagnética que está presente en el espectro natural de la radiación solar. Tiene una longitud de onda menor a la de la luz visible (400 nm) (las unidades estándar para longitud de onda es el nanómetro (nm), un nm = 10^{-9} m) y mayor a la de los rayos X, que es de 100 nm (Ilustración 5.1). Mientras menor es la longitud de onda mayor es la energía contenida, por lo que, la radiación ultravioleta tiene una energía inferior a la de los rayos X pero mayor que la de la luz visible. La región de UV se divide en cuatro subregiones: UV de vacío, UV-C, UV-B y UV-A.

La radiación de región UV-A (315-400 nm) es usada para las lámparas de bronceado. La UV-B (280-315 nm) y la UV-C (200-280 nm) son las que contienen las longitudes de onda más efectivas para la acción germicida siendo la longitud **óptima** la de 254 nm (Trojan Engineering, 1994).

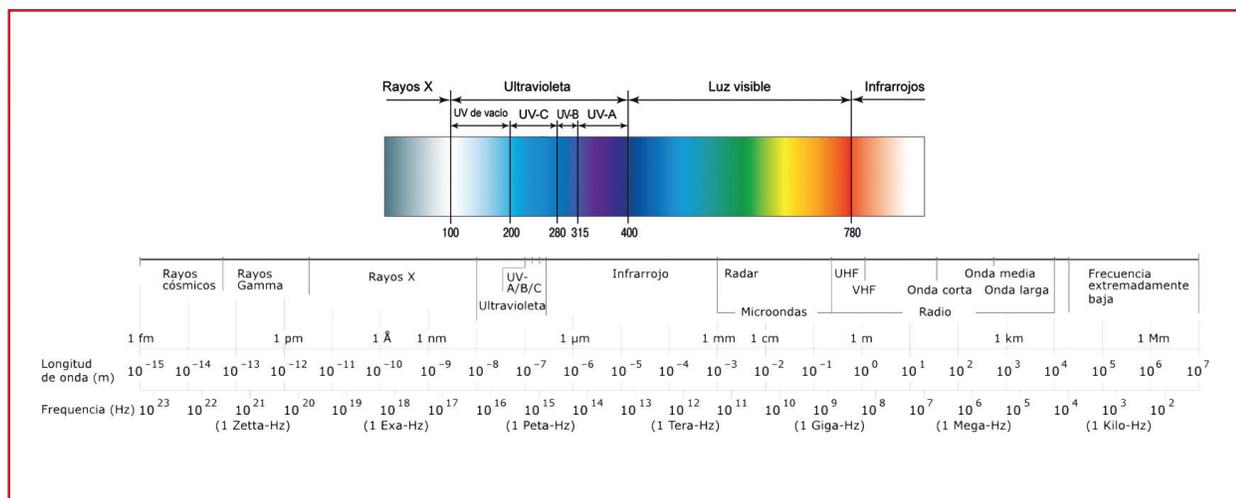
5.1.2 PROPIEDADES FÍSICAS Y QUÍMICAS

5.1.2.1 Efecto en los microorganismos y modo de acción

Los cambios fotoquímicos inducidos por la radiación ultravioleta en el material nuclear de un organismo, especialmente, en el ADN (Ácido desoxirribonucleico), y el ARN (Ácido ribonucleico) y por los cuales ocurre la desinfección han sido ampliamente estudiado. El ADN está constituido por nucleótidos compuestos a su vez por una molécula de azúcar, otra de fosfato y una base nitrogenada. Las bases nitrogenadas pueden ser púricas o pirimídicas. Los nucleótidos con base pirimídicas son la citosina (encontrada en el ADN y ARN), la timina (encontrada solamente en el ADN) y el uracilo (encontrado sólo en el ARN). Las de bases púricas son la adenina y la guanina.

La radiación de luz ultravioleta penetra la pared celular de los organismos y es absorbida por el ADN y el ARN dimerizando dos bases (las une entre sí con un doble enlace), lo cual im-

Ilustración 5.1 Espectro Electromagnético expandido de la radiación ultravioleta



pide la reproducción o produce la muerte de la célula (Metcalfe & Eddy, 1996). La dimerización de dos timinas es la más eficiente para inactivar los microorganismos (Ilustración 5.2), Darby *et al* (1995).

La formación de muchos dímeros a lo largo de la cadena de ADN hace que la duplicación sea muy difícil pues la estructura helicoidal se encuentra distorsionada. Una célula que no se puede duplicar o reproducir se considera muerta, aunque en este caso se acostumbra a decir que ha sido “inactivada”, debido a que es incapaz de multiplicarse e infectar al huésped.

5.1.2.2 Reactivación

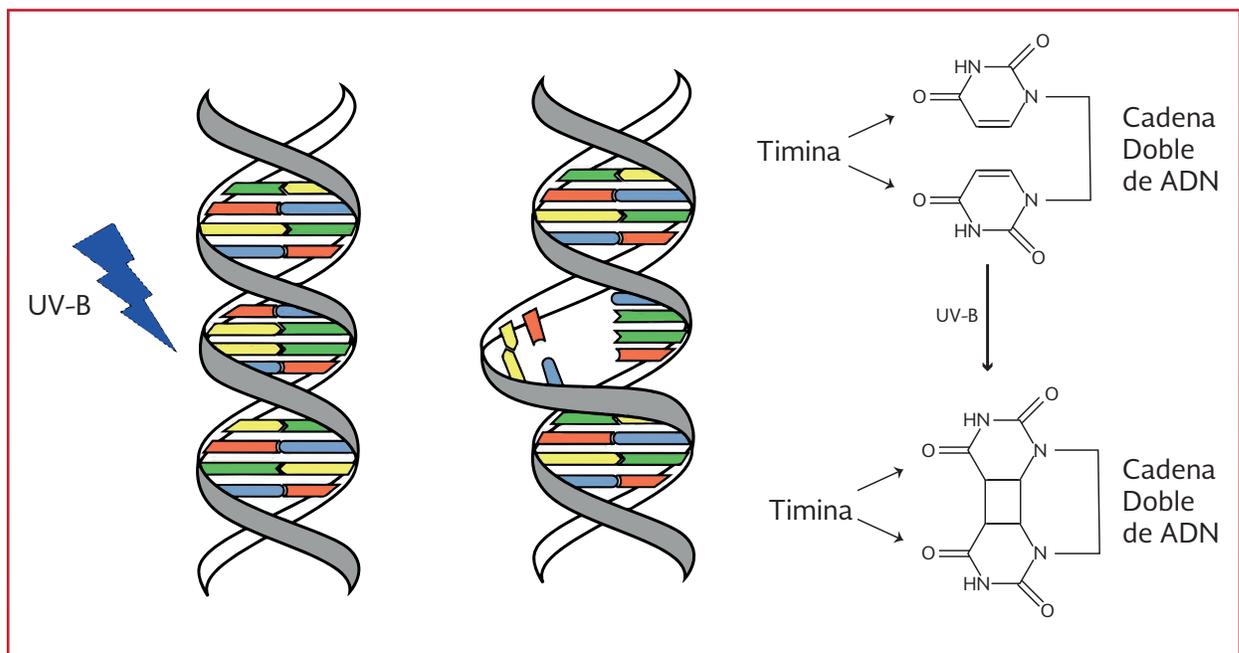
La mayoría de los microorganismos poseen la capacidad de reparar los daños causados por condiciones ambientales hostiles a su ADN, tal es el caso de la exposición a los desinfectantes. Existe un número limitado de enzimas que pueden realizar estos procesos, por lo que el daño al gen que codifica a las enzimas de reparación

o a cualquier sitio de regulación requerido en la síntesis de proteínas, limita el proceso de reparación. Los virus no tienen este sistema de reparación (Cairns, 1993). Así, bajo ciertas condiciones, el daño fotoquímico causado por la luz UV puede ser reparado, permitiendo que vuelvan a ser viables después del proceso de desinfección. Existen dos mecanismos de reparación:

- La fotoreactivación
- La reparación en la oscuridad

El proceso más sencillo es la fotoreactivación, la cual se realiza en presencia de luz con longitudes de onda entre 310 y 480 nm (Shaban *et al.*, 1997). Este proceso, en consecuencia, no ocurre en líneas de distribución cerradas o en receptores profundos de agua (Cairns, 1993). Al aumentar la dosis inactivadora, el microorganismo expuesto acumula mayor número de dímeros de pirimidina y la reparación del daño depende de la disponibilidad de radiación fotoreactivante (WEF, 1996). La importancia de la fotoreactivación depende de tres factores:

Ilustración 5.2 Acción germicida de la luz UV sobre las bases nitrogenadas



- La dosis inicial de radiación UV para la inactivación
- La dosis de la radiación fotoreactivante
- Cada tipo de microorganismo

La reparación en la oscuridad, el otro mecanismo, implica el reconocimiento de la doble ligadura en la cadena del ADN y su eliminación. Pero es menos probable que ocurra.

Desde el punto de vista operacional, la existencia de los mecanismos de reparación inducen a aumentar la dosis requerida para que no se lleven a cabo, lo que implica también la introducción de más equipo. Lindenauer y Darby (1994) señalan que el efecto de la reactivación es insignificante para dosis entre 60 a 80 mW s/cm² (WEF, 1996). Los ingenieros que diseñan y operan los sistemas de desinfección deben tomar en cuenta este aspecto.

5.1.2.3 Interferencias

El éxito de la desinfección con luz UV depende de las características del agua a desinfectar, observe la Tabla 5.1.

Efecto de las sustancias que absorben la luz

Debido a que la luz UV debe ser absorbida por los microorganismos para que los inactive, cualquier cosa que evite su contacto afecta el grado de desinfección. La capacidad que tiene el agua para transmitir la luz UV determinará si es posible la desinfección con luz UV. De estos efectos se destacan dos:

a) **Transmitancia**

La transmitancia se define como la capacidad que tiene el agua para dejar pasar la luz, en este caso la UV, a través de ella. Es leída a una longitud de onda de 254 nm y se expresa como un porcentaje de la transmitancia que presenta el agua desionizada (establecida como 100 por ciento). La transmitancia es disminuida por ciertos compuestos orgánicos e inorgánicos, así como por los sólidos suspendidos

La transmitancia de la luz UV tanto en el agua potable como residual tratada depende del tipo de proceso de tratamiento y del origen del agua. El intervalo más frecuen-

Tabla 5.1 Impacto de las características del agua residual en la desinfección con luz UV

Características del agua residual	Efecto en la desinfección con luz UV
Amonio	No tiene o es menor
DBO	No tiene o es menor
Dureza	Afecta la solubilidad de metales que pueden absorber la luz UV
Nitritos	No tiene o es menor
Nitratos	No tiene o es menor
pH	Puede afectar la solubilidad de metales y carbonatos
Sólidos Suspendidos	Absorción de luz UV y protección de bacterias
Sólidos Disueltos	Absorben la luz UV
Transmitancia	Evita el paso de la luz UV

te para el agua potable es de 75 a 95 por ciento. Para el agua residual, generalmente los procesos basados en un crecimiento biológico suspendido producen efluentes con una transmitancia de entre 60 y 65 por ciento (Sakamoto, 1996). La *National Sanitation Foundation* estableció que no es conveniente usar luz UV cuando el porcentaje de transmitancia es menor a 75 por ciento, aunque con los avances recientes es aceptable hasta un 40 por ciento. Debido a que la dosis es el producto de la intensidad por el tiempo de exposición, una intensidad menor provocada por la falta de transmitancia puede ser compensada extendiendo el tiempo de retención pero, en ese caso, se requiere mayor espacio y más equipo de radiación

b) **Sustancias disueltas**

Las sustancias disueltas, orgánicas e inorgánicas afectan la absorción de la luz UV. Las principales sustancias orgánicas son algunos pigmentos de algas, ácidos fúlvicos y húmicos, compuestos fenólicos y triptona (Gehr, 1996)

Sustancias inorgánicas como el hierro, el calcio, el magnesio y el manganeso afectan el equipo de luz UV. En efecto, estos compuestos precipitan y se depositan en las cámaras de cuarzo de las lámparas, evitando que la luz UV penetre en el agua. Un límite máximo de hierro y magnesio de 0.3 mg/L es recomendable. Así también, los procesos que utilizan altas concentraciones de cloruro férrico para mejorar la remoción de sólidos, producen generalmente bajas transmitancias, debido tanto a la presencia de hierro disuelto que absorbe la luz como a su precipitación. Otro de los efectos del uso del hierro es que forma una capa

protectora para las bacterias inmersas en las partículas. El empleo de sulfato de aluminio como coagulante produce mayores transmitancias y no inhibe la penetración de la luz (Toft *et al.*, 1988)

Efecto de las partículas

El papel de las partículas suspendidas es muy importante. Carnimeo *et al.* (1994) demostraron que la efectividad disminuye al aumentar el contenido de sólidos suspendidos, debido que:

- La materia coloidal puede absorber la luz
- La materia coloidal puede reflejar la luz

Se evita de esta manera que la luz penetre totalmente los microorganismos (Ilustración 5.3). Es importante por tanto conocer factores como el número de las partículas, la distribución de su tamaño y la composición de las mismas para evaluar la aplicación de la luz ultravioleta.

5.1.2.4 Dosis del desinfectante

En toda desinfección, el grado del efecto germicida depende de la dosis del agente desinfectante. En este caso, la dosis de la luz UV se define como el producto de la intensidad de la luz por el tiempo de exposición.

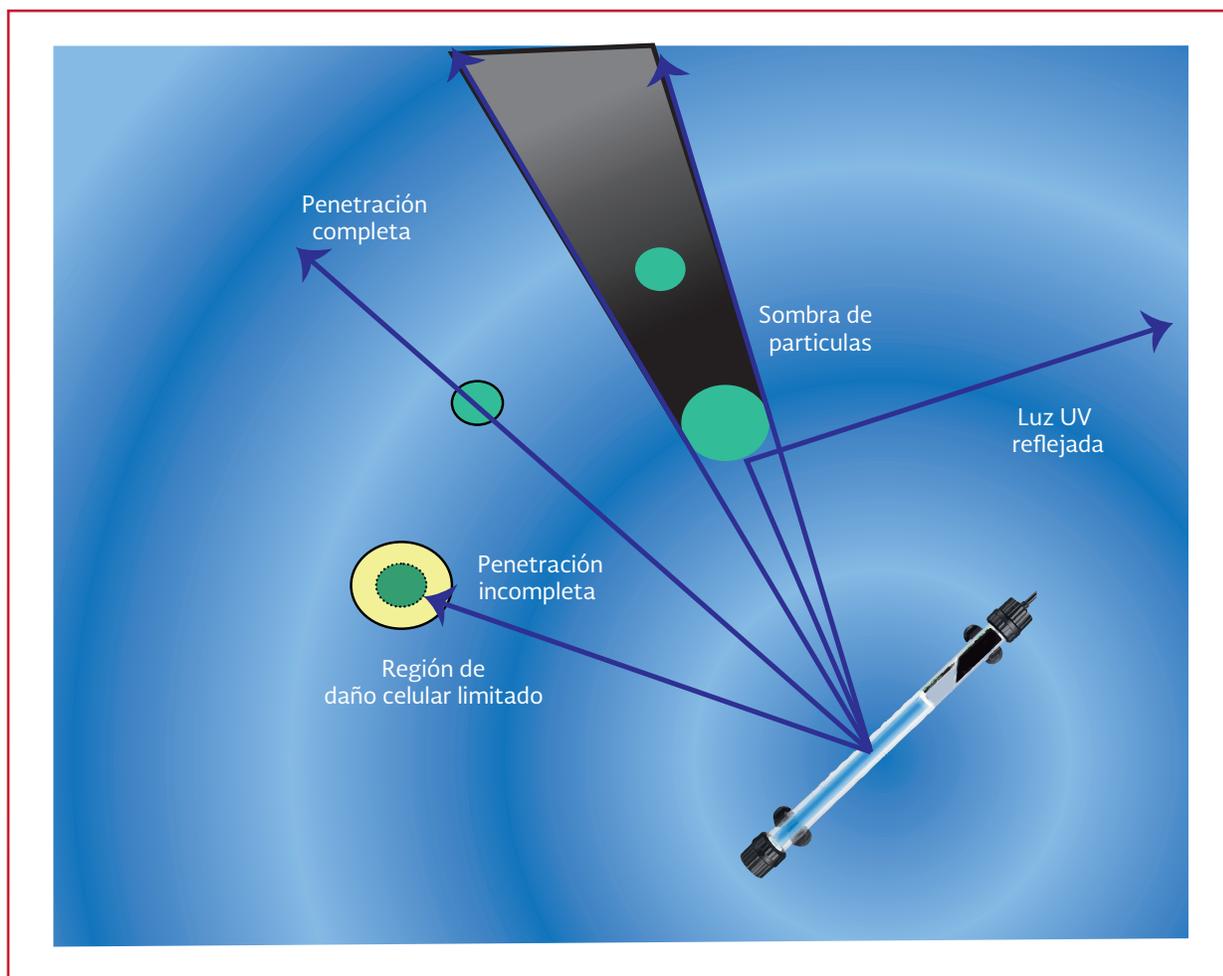
$$D = It \quad \text{Ecuación 5.1}$$

dónde:

- D = Dosis de luz UV, mW s/cm²
 I = Intensidad promedio de la energía UV, mW/cm²
 t = Tiempo de exposición, s

Los factores que afectan la dosis están relacionados con la velocidad del flujo, el tiempo de

Ilustración 5.3 Efecto de las partículas en la radiación de luz UV



retención y la intensidad de la luz. Esta última depende tanto de las condiciones del equipo UV como de la calidad del agua (Tabla 5.2).

La cantidad de daño celular depende de la energía absorbida por los microorganismos así como

por su resistencia a la luz UV. Los microorganismos responden de diferente manera a la luz UV debido a la diferencia en su estructura física. La dosis requerida parece aumentar con el tamaño de la célula así como con la cantidad de ADN y ARN. La mayoría de las bacterias y virus re-

Tabla 5.2 Factores que afectan la dosis

D	=	I	x	t
		Calidad del Agua		Caudal
		Transmisión UV		Patrón de flujo
		Sólidos Suspendidos		Existencia de cortos circuitos
		Orgánicos Disueltos		o zonas muertas
		Hierro, Calcio, Magnesio		Diseño del Reactor
		Condición de la Lámpara		Disponibilidad del terreno
		Limpieza de la Camisa		
		Envejecimiento		
		Proceso de Tratamiento		

quieren dosis relativamente bajas. Los quistes de protozoarios son de 10 a 15 veces más resistentes que *E. coli* y las bacterias *gram* negativas son más sensibles que las *gram* positivas y las esporas, en general (Trojan Technologies Inc, 1997). La Tabla 5.3 muestra las diferentes dosis requeridas para una variedad de microorganismos.

5.1.3 PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO

Todas las lámparas germicidas se basan en el mismo principio de funcionamiento: la radiación ultravioleta es generada por el paso de una descarga eléctrica a través de vapor de mercurio ionizado mezclado con un gas noble. Debido a que los gases a presión atmosférica no son buenos conductores de la electricidad se requiere un aparato especial llamado tubo de gas de descarga o lámpara germicida para presurizar. Este tubo es de vidrio y tiene dos electrodos sellados a sus paredes. Generalmente, éste se instala dentro de una camisa de cuarzo para protegerlo de los efectos del agua (Fahey, 1990). Una lámpara

fluorescente, de las que comúnmente se emplean para la iluminación opera con el mismo principio y, de hecho, también produce energía UV. La diferencia radica en que estas están cubiertas con un compuesto de fósforo que transforma la luz UV en luz visible (Ilustración 5.4).

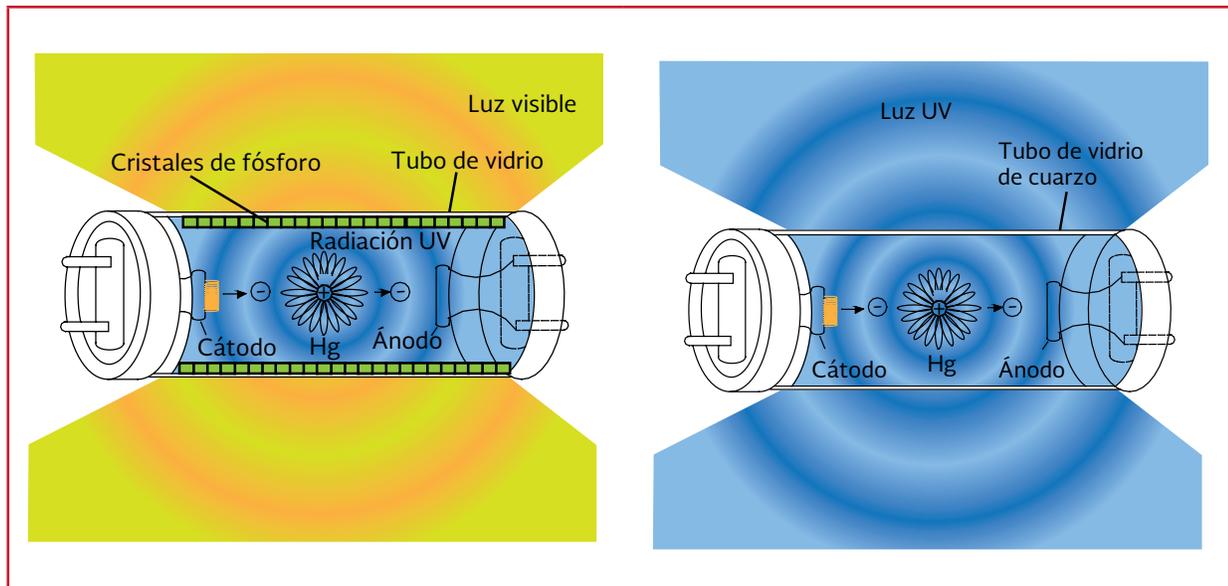
Cuando la lámpara de desinfección está fría, el mercurio se encuentra en su estado natural (líquido). Al encender la lámpara la presión del argón disminuye, se produce muy poca luz pero que calienta y evapora gradualmente al mercurio. Conforme éste se evapora, la presión aumenta y la luz UV empieza a producirse (Goldwasser y Klipstein, 1998). Durante este proceso, pueden pasar dos cosas:

- Que la alta densidad de las moléculas gaseificadas de mercurio dificulte la salida de luz UV con longitud de onda de 254 nm de la lámpara, pues al ser emitido un fotón (Partícula de luz) de luz UV por un átomo de mercurio otro cercano lo absorba

Tabla 5.3 Comparación de la sensibilidad de diferentes microorganismos a la desinfección con luz UV

Microorganismo		Dosis (mw s/cm ²) para la reducción de un 90% en la cuenta
Bacterias		
<i>Bacillus anthracis</i>	Gram +	4.5
<i>Bacillus subtilis</i> (esporas)	Gram +	12
<i>Corynebacterium diphtheriae</i>	Gram +	3.4
<i>Staphylococcus aureus</i>	Gram +	5
<i>Streptococcus faecalis</i>	Gram +	4.4
<i>Escherichia coli</i>	Gram -	3.2
<i>Pseudomona aeruginosa</i>	Gram -	5.5
<i>Salmonella enteritidis</i>	Gram -	4
<i>Salmonella typhi</i>	Gram -	2.1
<i>Shigella dysenteriae</i>	Gram -	2.2
Virus		
<i>Bacteriophago F</i>		6.9
Virus de la influenza		3.6
Poliovirus		9.5
Rotavirus		11.3
Protozoario		
<i>Giardia lamblia</i>		82
<i>Cryptosporidium parvum</i>		80

Ilustración 5.4 Comparación entre una lámpara fluorescente y una germicida



- Que las frecuentes colisiones entre los átomos excitados de mercurio conduzcan a la emisión de luz con gran variedad de longitudes de onda, incluyendo luz visible. Con el incremento de la presión, el número de líneas en el espectro del mercurio se incrementa y tiene un espectro más continuo

En el anexo B se presenta una clasificación de las lámparas de mercurio.

5.2. DISEÑO DE UNIDADES ULTRAVIOLETAS PARA DESINFECCIÓN

5.2.1 EQUIPOS DE LUZ ULTRAVIOLETA

A principios de 1980 los equipos consistían en cámaras cerradas que empleaban lámparas sumergidas o fuera del líquido. Actualmente, son modulares con lámparas sumergidas, general-

mente instaladas en canales abiertos para facilitar su mantenimiento y mejorar la distribución hidráulica. La clasificación de los equipos se hace con base en:

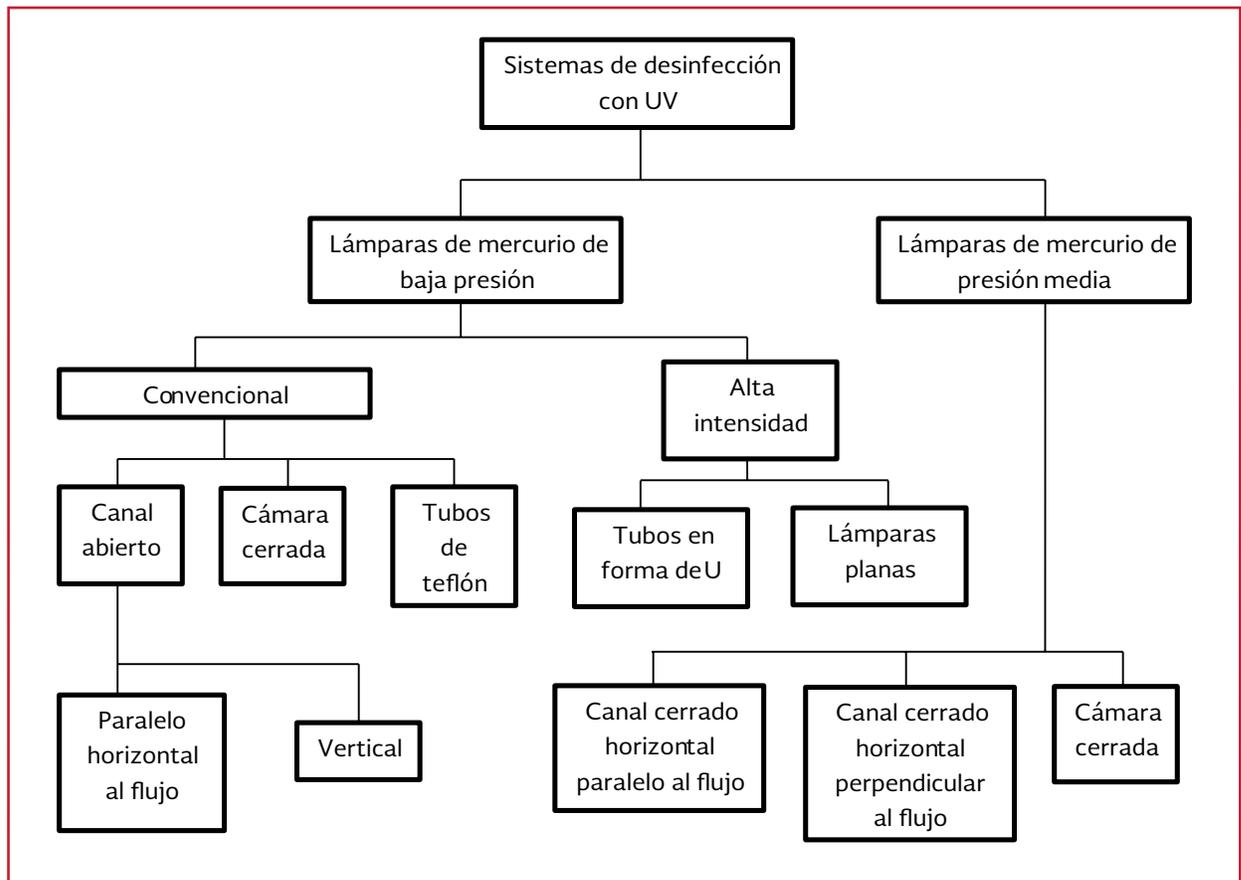
- El tipo de lámpara (baja presión, presión media o alta)
- El tipo de instalación (canal abierto o cerrado)
- La disposición de las lámparas (horizontal o vertical)

En la Ilustración 5.5 se presenta esta clasificación.

5.2.2 HIDRÁULICA DEL REACTOR

Las condiciones hidráulicas óptimas para un reactor UV son de flujo tipo pistón con dispersión axial y sin mezclado transversal (WEF, 1996). Para asegurar que cada segmento del líquido sea irradiado se debe controlar el mezclado en la zona de irradiación. De forma general, esto se logra minimizando cortos circuitos y zonas muertas por

Ilustración 5.5 Tipos de sistemas de desinfección con luz UV



medio de la geometría de las estructuras de la entrada y la salida que deben diseñarse para promover perfiles uniformes de velocidad (Fahey, 1990).

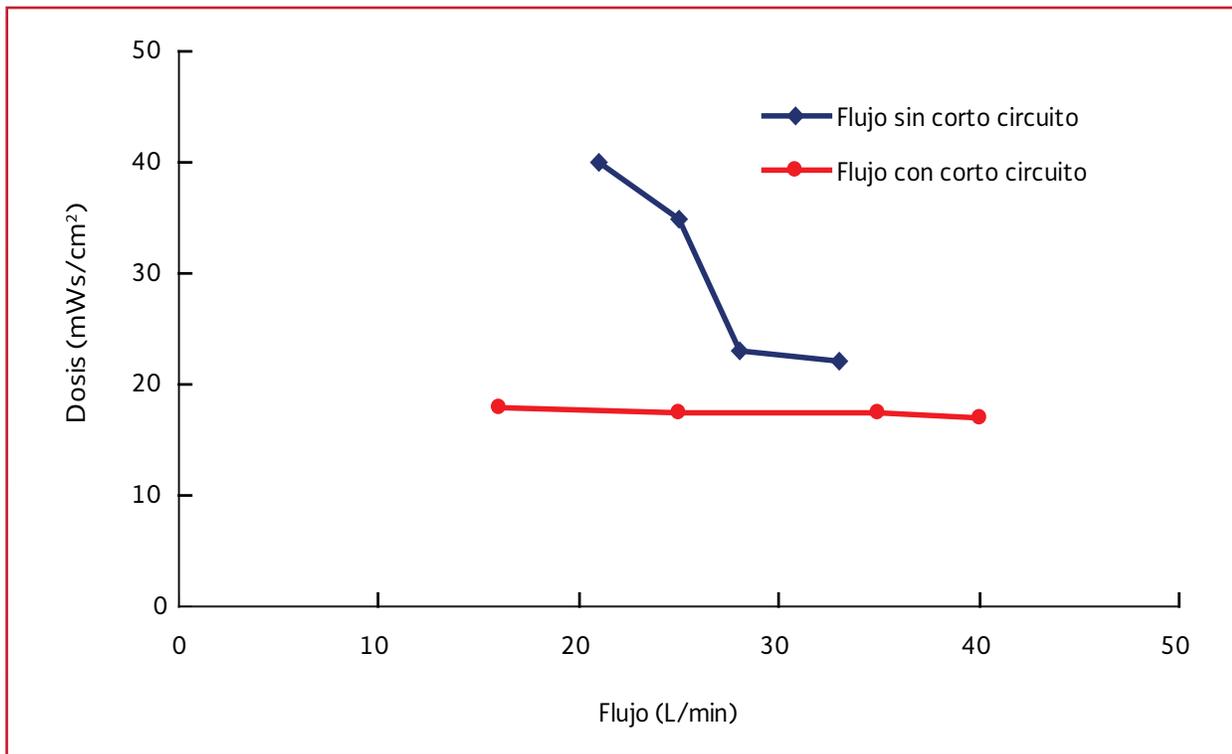
El caudal se debe conocer para determinar el tamaño de la unidad de luz ultravioleta. También determina el tiempo de residencia promedio en la unidad y debe ser tal que se alcance la dosis apropiada. La dosis de luz UV que alcanza el agua se ve afectada por el cambio en el flujo y por la hidráulica del reactor, tal como se muestra en la Ilustración 5.6 (Toft et al., 1988).

En los sistemas de varios canales (multicanales) las estructuras también deben facilitar una distribución de flujo uniforme entre canales.

5.2.2.1 Pérdida de carga

En términos de consumo de energía, la pérdida de carga es comparable con las comúnmente encontradas en las plantas de tratamiento. Sin embargo, la disminución del área transversal de exposición puede inducir problemas al quedar al descubierto las lámparas. Para asegurarse de que el agua recibe la exposición suficiente, la distancia entre las lámparas debe ser inferior a 7.5 cm (3 pulgadas). Un sistema con flujo uniforme tiene menores pérdidas de carga, ya que los tubos están totalmente sumergidos y existe un mejor enfriamiento ello ocurre con lámparas horizontales y no con lámparas orientadas verticalmente.

Ilustración 5.6 Efecto del flujo en la dosis de luz UV



5.2.3 TIPOS DE EQUIPOS

En la actualidad, los equipos más comunes (80 por ciento de los que están en operación) son los modulares de canal abierto con lámparas de mercurio de baja presión. Una de las ventajas del uso de estas lámparas es el bajo costo y confiabilidad desde el punto de vista de operación. La desventaja en su aplicación es que se requieren un gran número de estas lámparas en bancos muy densos; es decir; una serie de módulos que pueden ser colocados uno junto a otro, o uno atrás de otro y cubren el ancho del canal. Debido a la naturaleza de los módulos, un banco puede contener cualquier número de módulos (WEF, 1996).

Por otro lado, hay muy poca experiencia con los equipos de lámparas de presión media. Hasta ahora, sólo ocho plantas de tratamiento de aguas residuales operan en Estados Unidos con

este tipo de sistema (una desde 1987). Sin embargo el número va en aumento.

Las ventajas de estos sistemas son:

- Bajo costo de instalación, alrededor del 10 al 20 por ciento menor que el de baja presión
- Pocos requerimientos de limpieza debido al reducido número de lámparas

Entre las desventajas se pueden mencionar:

- Altos costos de operación y mantenimiento
- Poca eficiencia desde el punto de vista energético
- Elevados costos de inversión por lámpara
- Costo elevado de operación por el cambio de lámparas

5.2.4 CLASIFICACIÓN DE ACUERDO AL TIPO DE INSTALACIÓN

La desinfección de grandes cantidades de agua (>20 L/s) se lleva a cabo en dos tipos de sistemas (Acher et al., 1997): Canales abiertos en los cuales el agua fluye gravitacionalmente y Líneas cerradas a presión, los cuales son usados principalmente para agua potable.

5.2.4.1 Canales abiertos

Los sistemas modulares en canal abierto son los más comunes para el tratamiento de aguas residuales. En estos, los módulos de UV (conjunto de lámparas colocadas dentro de una estructura de acero inoxidable), están inmersos en el agua. Son más fáciles para muestrear y dar mantenimiento que los cerrados pues el personal puede remover o colocar fácilmente las lámparas (generalmente de baja presión) sin necesidad de interrumpir el proceso. Además proveen una menor obstrucción al flujo.

El funcionamiento de este tipo de canales es complicado debido a los cambios en el nivel del agua. Si el nivel es muy alto, parte del agua pasa por la parte superior de los bulbos sin la suficiente exposición a la radiación. Si el nivel es muy bajo, en cambio, la línea de los bulbos superiores estará expuesta al aire, causando que éstos se sobrecalienten y se forme una capa que evite el paso de la luz ultravioleta. Por esta razón, el monitoreo de las lámparas y del nivel del agua es crucial.

Los canales abiertos están disponibles principalmente en dos configuraciones:

- Horizontal
- Vertical

5.2.4.2 Canales cerrados

Se emplean comúnmente en potabilización y el agua a presión es llevada a través de tuberías en cuyo interior se encuentran las lámparas. Todas las conexiones eléctricas se encuentran fuera del agua. Los sistemas pueden ser de un solo tubo o de un conjunto de ellos. Debido a que el agua fluye rápidamente (tiempo de irradiación muy corto), es necesario usar lámparas de alta intensidad para alcanzar la dosis.

Un tipo especial de sistema cerrado usa una red de tubos de teflón para llevar el flujo y las lámparas se sitúan entre los tubos, fuera del agua (Fahey, 1990).

5.2.5 CLASIFICACIÓN DE ACUERDO CON LA DISPOSICIÓN DE LAS LÁMPARAS

5.2.5.1 Sistemas horizontales

En 1990 más de la mitad de los sistemas en operación eran de este tipo, aunque se ha notado un incremento en sistemas alternados (horizontal - vertical), especialmente para plantas grandes. La relación de sistemas horizontales a verticales es de más de 10 a 1 (Ilustración 5.7).

En los sistemas horizontales pequeños, los módulos generalmente sostienen de 4 a 6 lámparas y los grandes de 8 a 16. La lámpara más usada es la de 1.6 m de longitud. El conjunto lámpara-camisa de cuarzo es asegurado a la estructura utilizando un conector y un anillo (Ilustración 5.8). Los sistemas recientes tienen lámparas individuales y aisladas con arreglo uniforme, lo cual hace que se mantenga el sistema en operación en caso de falla de alguna de ellas.

Ilustración 5.7 Esquema de un sistema horizontal de desinfección UV

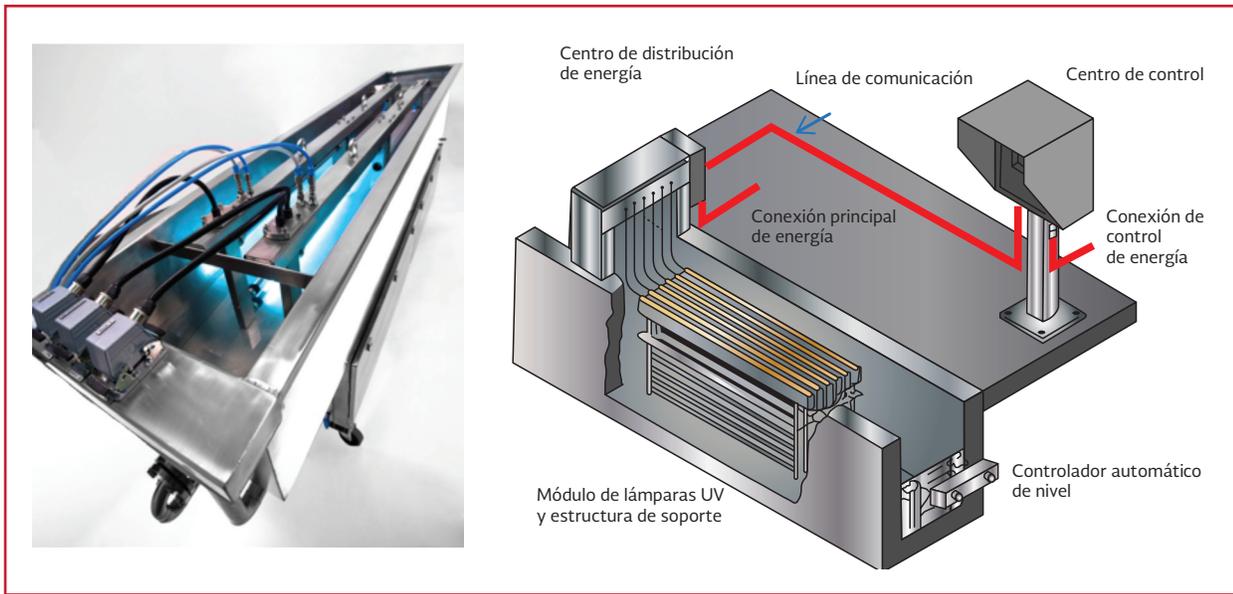
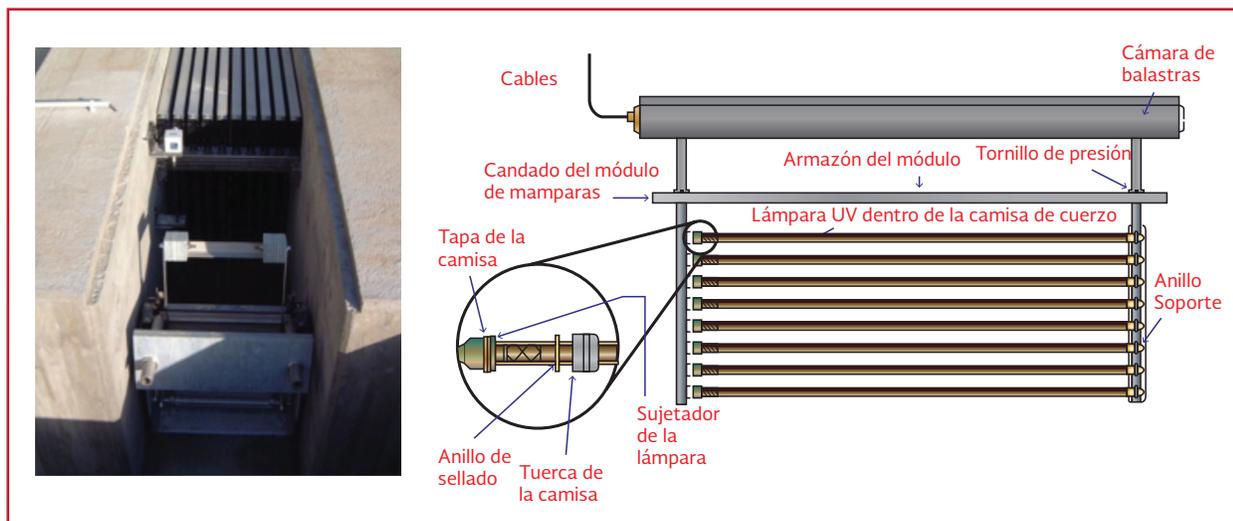


Ilustración 5.8 Módulo de lámparas UV (Detalle del conductor)



Los sistemas grandes se ofrecen en estructuras (Ilustración 5.9), para que todo el banco pueda ser removido del canal para limpieza u otro fin. Por el contrario, en la mayoría de los sistemas pequeños, los módulos son removidos individualmente para limpiarlos y darles mantenimiento. Los sistemas horizontales se diseñan generalmente para operarlos con varios bancos en diferentes canales.

Esto permite un control automático o semiautomático de la velocidad de flujo además de facilitar las tareas de limpieza y mantenimiento sin interrumpir el proceso. El control del nivel del líquido es importante en este tipo de sistemas por lo que cuentan con un dispositivo para mantener un nivel objetivo. El dispositivo consiste en una cortina con contrapeso (Ilustración 5.10) o vertederos fijos y móviles, siendo el primero el más común.

Ilustración 5.9 Estructura de un banco de lámparas de UV

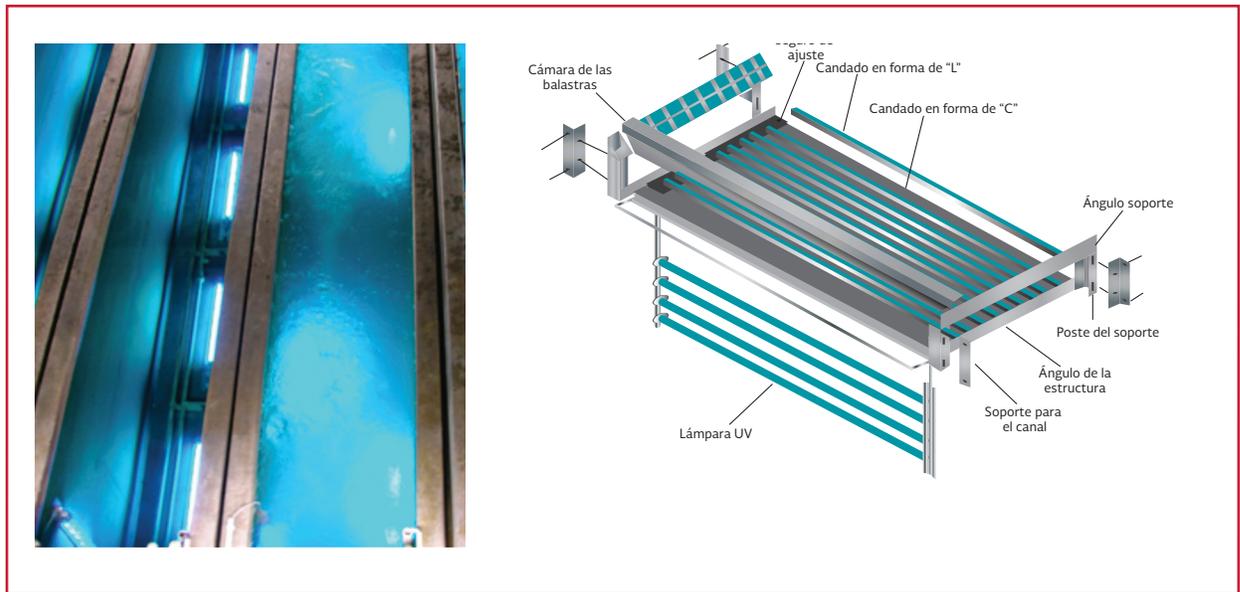
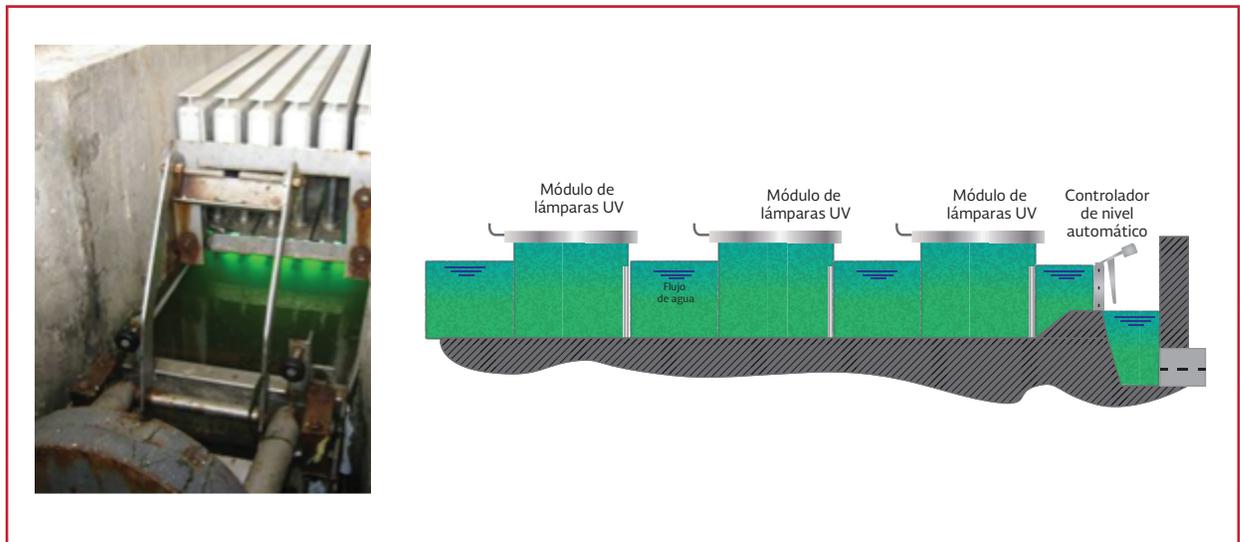


Ilustración 5.10 Control de nivel en un sistema horizontal



El nivel objetivo es de 25 mm por encima de las lámparas superiores, lo que conduce a obtener una distribución relativamente uniforme de la dosis en todo el fluido.

Los sistemas de automatización varían desde un mínimo hasta la automatización completa. Estos últimos permiten controlar en forma remota

desde un centro de operación. Se regula la energía suministrada al sistema, se lleva la contabilidad de las horas de operación y se registra el estado de las lámparas. Los sistemas totalmente automáticos, controlan además la velocidad del flujo y llevan un registro de la calidad del agua para regular la dosis de desinfección mediante el apagado o encendido de lámparas o de bancos.

5.2.5.2 Sistemas verticales

Los sistemas modulares verticales de canal abierto han sido empleados para aguas residuales municipales desde 1987. Estos sistemas fueron comercializados como alternativa a los sistemas horizontales. Consisten de un conjunto de lámparas aseguradas a una estructura rectangular que descansa en el fondo del canal, de manera perpendicular al piso. Los módulos requieren una grúa para ser removidos del canal (Ilustración 5.11).

El sistema típico tiene 40 lámparas montadas en arreglo de 8 por 5, con módulos escalonados en los cuales las filas de lámparas son paralelas pero están “fuera de fase” con una distancia de una y media lámpara (Ilustración 5.12a). Debido a que este diseño resulta en un incremento de la turbulencia radial con una mínima turbulencia axial no se favorece la hidráulica del reactor, por lo que los fabricantes han optado por introducir un arreglo uniforme (Ilustración 5.12b). Los sistemas verticales generalmente usan las

Ilustración 5.11 Esquema de un sistema vertical

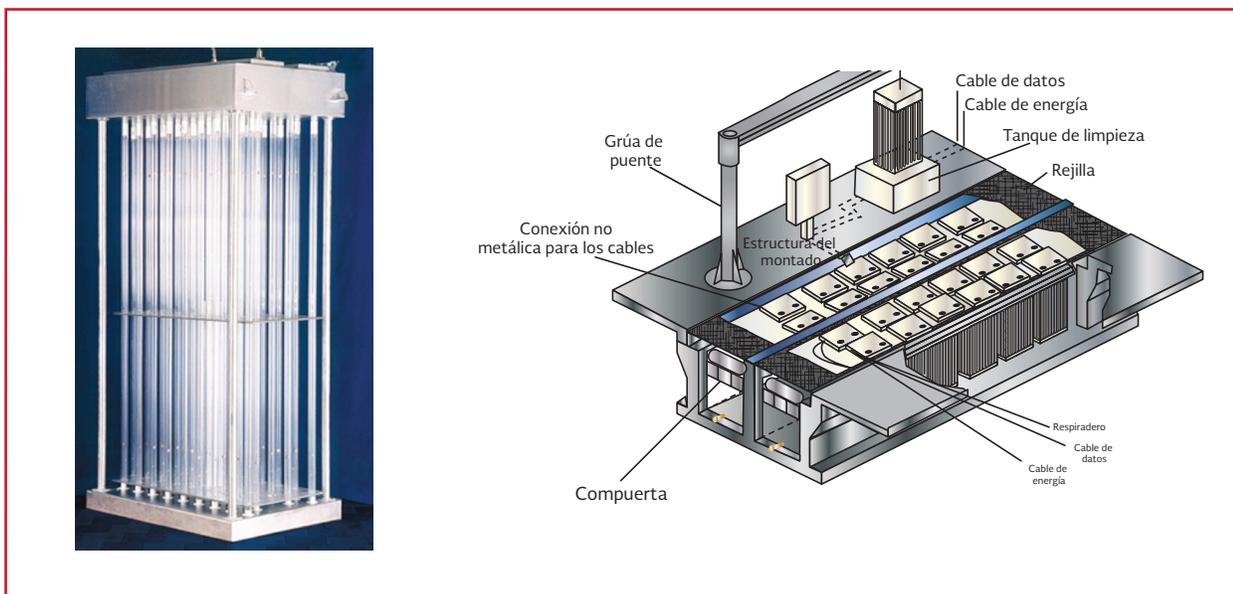
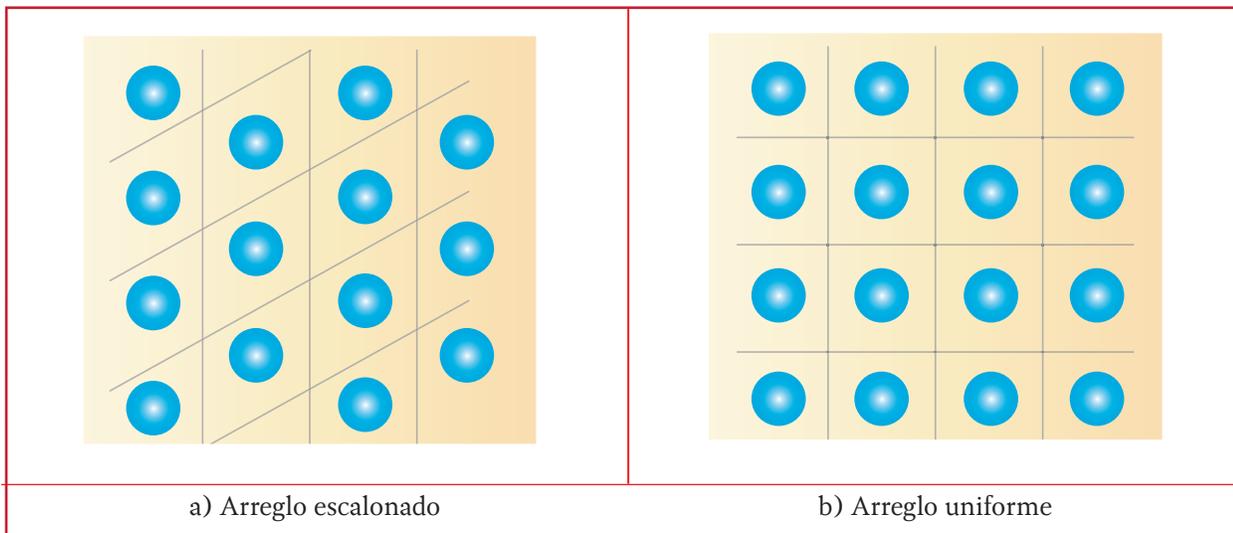


Ilustración 5.12 Arreglos típicos



lámparas más cortas (0.9 m), aunque lámparas de 1.5 m han sido usadas en plantas grandes. La longitud de la lámpara establece la profundidad requerida del líquido, la cual es mayor que la usada en los sistemas horizontales.

Los primeros sistemas verticales presentaban un mejor paso del flujo debido a que las filas de lámparas podían ser apagadas sin reducir la dosis de radiación UV. Para maximizar esta ventaja, se crearon lámparas que permiten mayor número de ciclos de encendido-apagado.

Una característica importante de este tipo de sistemas es que las lámparas pueden ser cambiadas permaneciendo el módulo en su lugar, a diferencia de los sistemas horizontales. Sin embargo, el módulo entero necesita ser apagado para permitir un servicio seguro.

El control del nivel, el sistema de monitoreo y el de automatización son similares a los utilizados en los sistemas horizontales. Las compuertas fijas o móviles son esencialmente las mismas, aunque para canales más angostos y profundos se requieren compuertas más altas y móviles.

5.2.6 SELECCIÓN DE EQUIPOS DE LUZ ULTRAVIOLETA

La selección o diseño de un equipo de luz ultravioleta se hace con base en datos obtenidos en

pruebas de tratabilidad. Estas pruebas se realizan con el objeto de determinar la eficiencia de desinfección tomando en cuenta la caracterización cualitativa y cuantitativa del agua a tratar. Dicha caracterización se realiza principalmente con los parámetros que se muestran en la Tabla 5.4. Para seleccionar el equipo de desinfección adecuado a las características del efluente y las necesidades de la planta de tratamiento se realiza una serie de cálculos de tal manera que se conozca el número de lámparas. Con este dato, las compañías comerciales asesoran en cuanto a la elección de un determinado equipo que puede variar en cuanto a:

- Orientación de las lámparas
- Diseño de las lámparas
- Diseño de balastros electrónicos
- Procedimientos de limpieza
- Costo de instalación

Las pruebas se realizan a nivel laboratorio o en planta piloto. A continuación se presenta una descripción general de los métodos analíticos empleados para determinar los parámetros de la Tabla 5.4.

5.2.6.1 Pruebas de tratabilidad

Los parámetros a determinar son:

- Sólidos Suspendidos Totales
- Transmitancia filtrada y no filtrada. Es

Tabla 5.4 Parámetros medidos en las pruebas de tratabilidad

Parámetro	Unidad
Flujo	L/s
Sólidos suspendidos	mg/L
Transmitancia filtrada a 254 nm	%
Transmitancia no filtrada a 254 nm	%
Turbiedad	UTN
Concentración de coliformes en influente y efluente de la unidad UV	UFC/100 mL
Distribución y tamaño de partícula	µm

medida en un espectrofotómetro a 254 nm, comparando con el 100 por ciento de transmitancia del agua destilada. El espectrofotómetro está equipado con una celda rectangular de 1 cm. La transmitancia filtrada se determina después de filtrar la muestra a través de una membrana de tamaño de poro nominal de 1 mm.

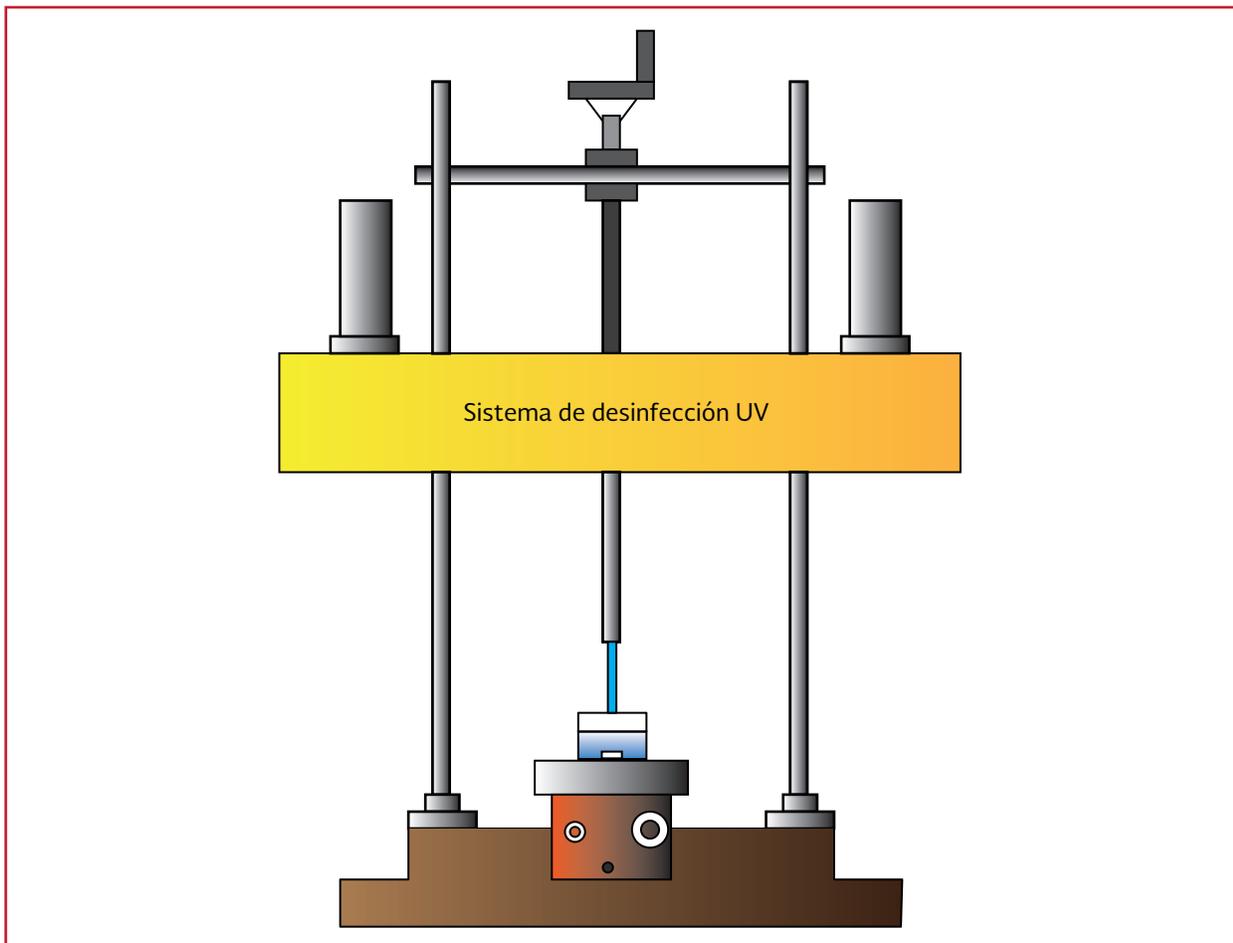
- Turbiedad
- Coliformes fecales
- Distribución de tamaño de partícula. Se emplea un contador de partículas con rayo láser. El rayo incide sobre un volumen determinado de muestra y registra el tamaño de partícula que pasa a través del punto focal de mayor intensidad.

La distribución de tamaños se determina estadísticamente, clasificándose en varios tamaños de canales que van desde 2 hasta 1000 μm . Los tamaños son registrados como diámetro y cada tamaño de canal o diámetro de partícula representa un porcentaje del número total de partículas medidas en determinado tiempo

Prueba de desinfección con el equipo de luz colimada

El diagrama del equipo se muestra en la Ilustración 5.13. La fuente de luz UV es una lámpara de baja presión (instalada de forma horizontal) que ha sido usada por 100 h, lo cual resulta en

Ilustración 5.13 Equipo de luz colimada



la estabilidad de la luz emitida. Deben usarse lentes de seguridad antes de encender el equipo y debe estar en una superficie suficientemente alta para evitar que las aberturas superiores queden a la altura de los ojos.

Prueba de radiación

La unidad se debe prender de 10 a 20 minutos antes de empezar a trabajar, asegurando con esto que se caliente la lámpara y la luz irradiada se estabilice. La intensidad de la luz se mide en el centro del tubo de irradiación por medio de un radiómetro. La intensidad medida es la que se aplica a la superficie de la muestra. Cuando la lámpara está estable y la intensidad medida es de 200 mW se siguen los siguientes pasos:

1. Homogeneizar la muestra y medir 50 mL; colocarla en la cuba estéril para ser irradiada
2. Colocar la muestra en un agitador, mientras el tubo de irradiación está cubierto
3. Remover la cubierta y controlar el tiempo de exposición con un cronómetro. Los tiempos de exposición pueden ir desde 0 hasta 1 000 segundos
4. Pasado el tiempo remover la cuba del agitador y colocarla en un segundo agitador para mantener homogénea la muestra
5. Realizar el cultivo de la muestra irradiada

Todos los tiempos de exposición se hacen por duplicado y por lo menos dos diluciones de cada muestra.

Los cultivos de las muestras irradiadas se deben hacer inmediatamente para prevenir errores debido a la sedimentación de las partículas, fotore-

paración o el crecimiento de los microorganismos sobrevivientes.

Los resultados de una prueba de este tipo son suficientes para predecir los mejores tiempos de exposición y las diluciones para las pruebas subsecuentes.

5.2.7 DISEÑO DE UN EQUIPO DE LUZ UV

El diseño se basa en un cálculo no probabilístico usado por la mayoría de los fabricantes de equipos de luz UV. Los resultados obtenidos del estudio con el equipo de luz colimada son utilizados para determinar la dosis mínima necesaria para alcanzar los valores requeridos por la planta de tratamiento. Los pasos a seguir se muestran a continuación.

1. Graficar el logaritmo de la concentración de coliformes fecales del efluente de la unidad UV en función de la dosis obtenida del estudio realizado con el equipo de luz colimada, tal como se muestra en la Ilustración 5.14
2. De la gráfica obtenida, determinar la dosis de UV que corresponda a la concentración de coliformes fecales máxima permitida por la legislación para cada uso del agua (Ilustración 5.15)
3. Ajustar la dosis requerida (generalmente un 30 por ciento) tomando en cuenta tanto el envejecimiento de las lámparas como la formación de incrustaciones
4. Usando algún método para determinar la intensidad de la radiación determinar la intensidad promedio de luz UV en el sistema como se muestra en la Ilustración 5.16

Ilustración 5.14 Curva de respuesta de coliformes fecales a diferentes dosis

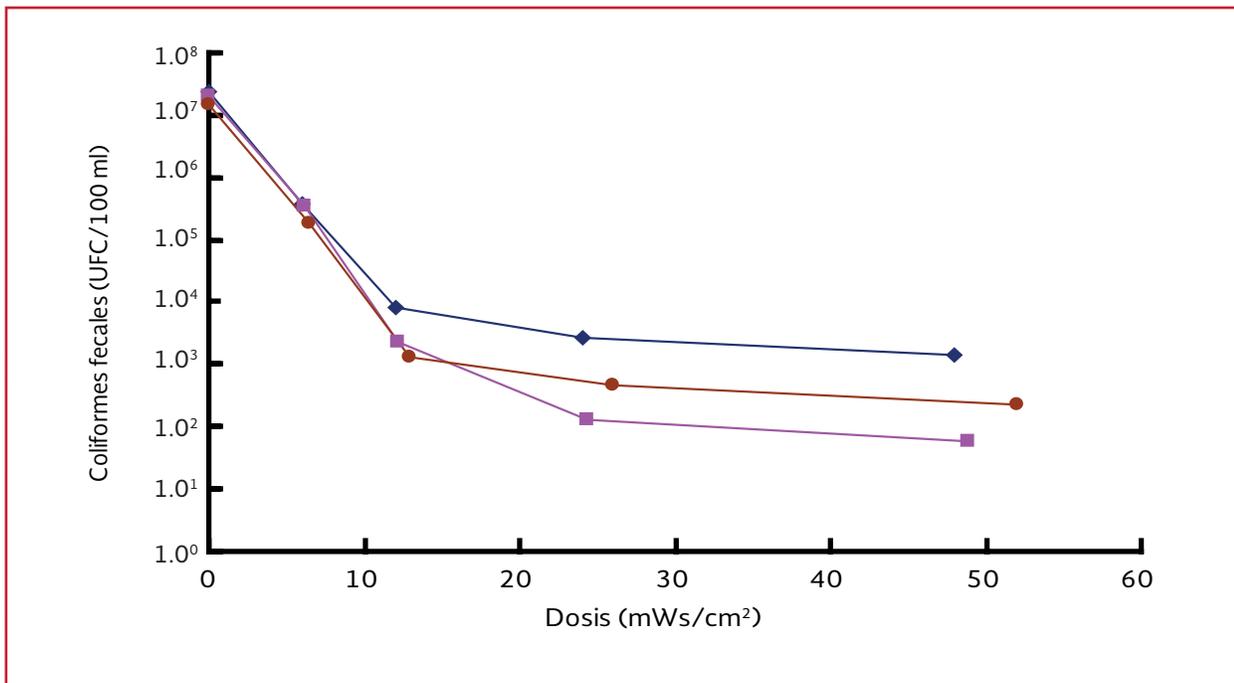


Ilustración 5.15 Selección de la dosis de desinfección

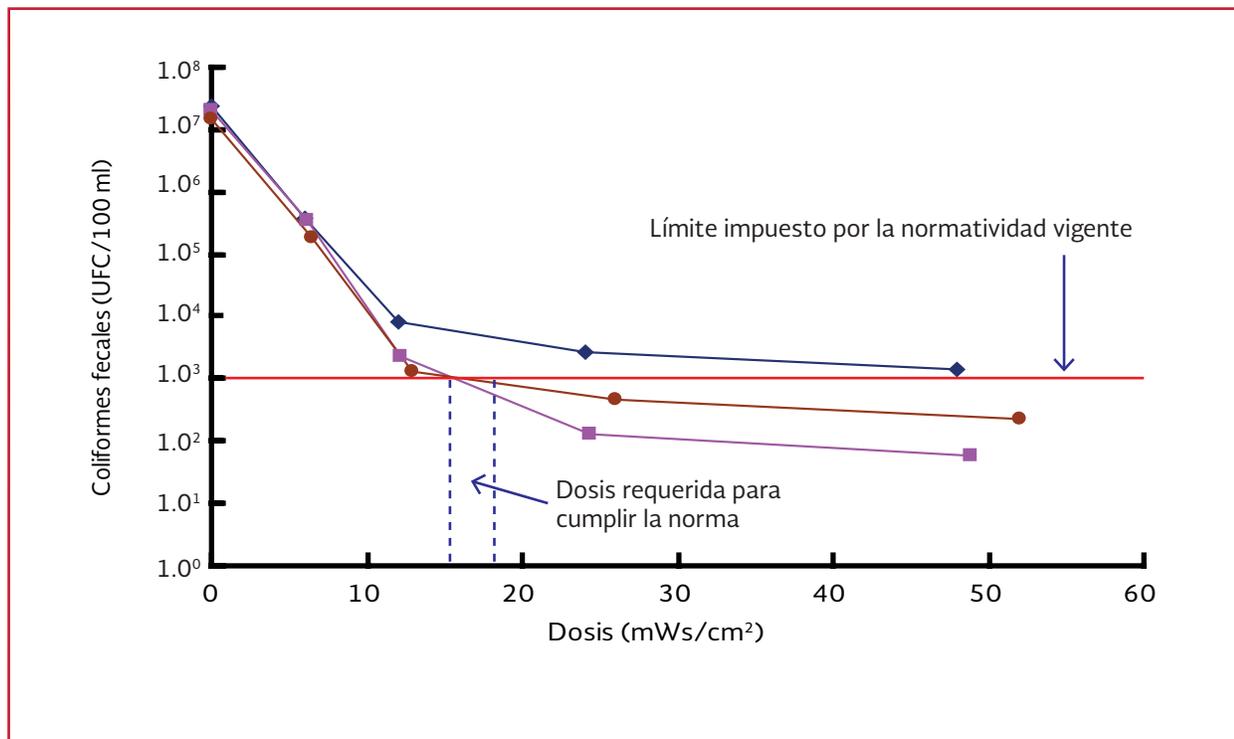
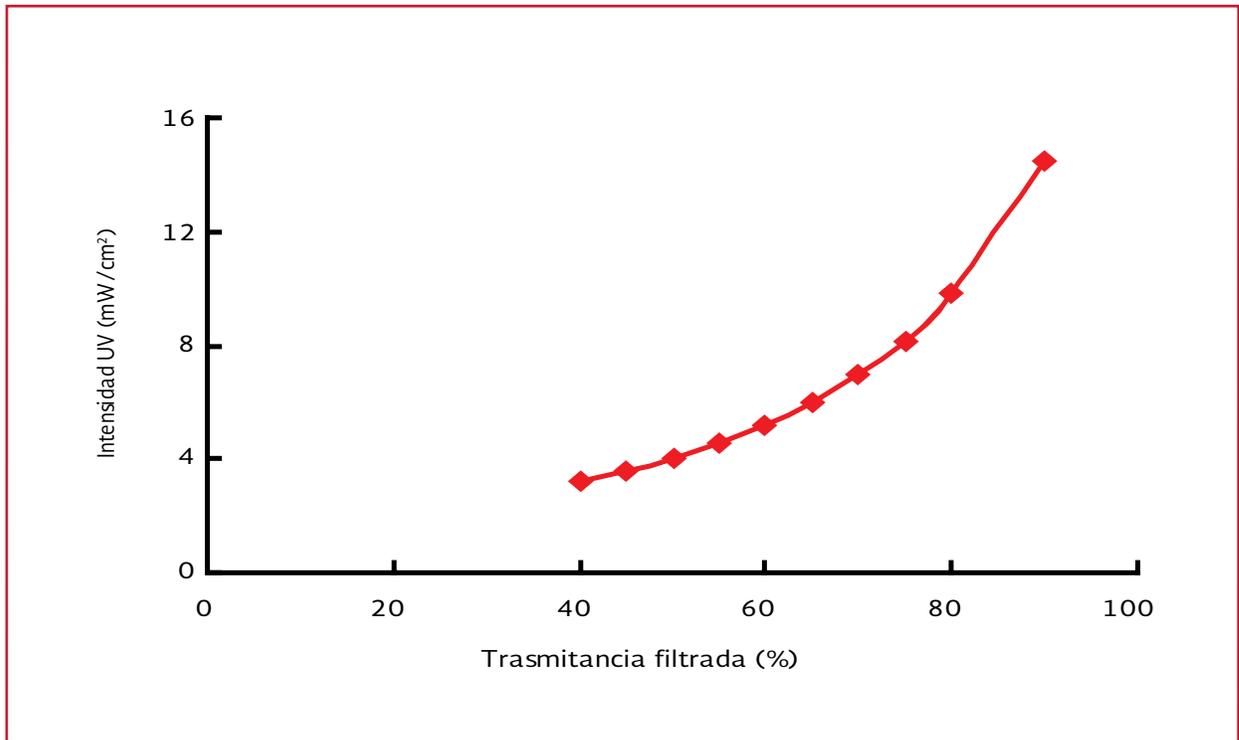


Ilustración 5.16 Curva que relaciona la intensidad promedio con la transmitancia filtrada del agua



5. Dada la intensidad promedio, determinar el tiempo de contacto requerido para lograr la dosis anteriormente establecida

$$T = \frac{D_{UV}}{I_{Prom}} \quad \text{Ecuación 5.2}$$

donde:

T = Tiempo de contacto (s)

D_{UV} = Dosis de UV (mWs/cm^2)

I_{prom} = Intensidad promedio (mW/cm^2)

Tomar el valor del flujo a ser tratado y determinar el volumen que debe ser retenido para lograr el tiempo de contacto requerido

$$V_T = TQ_d \quad \text{Ecuación 5.3}$$

donde:

V_T = Volumen total a ser tratado (l)

Q_d = Flujo de diseño (L/s)

Determinar el número de lámparas requeridas para la desinfección, dividiendo el volumen a ser desinfectado determinado en el paso 6 entre el volumen de agua que puede ser tratado por lámpara.

$$N_L = \frac{V_T}{V_{Lámpara}} \quad \text{Ecuación 5.4}$$

donde:

N_L = Número de lámparas requeridas para la desinfección

$V_{Lámpara}$ = Volumen por lámpara (l)

5.2.8 EJEMPLO DE DISEÑO

Como es sabido, el agua residual requiere un tratamiento de desinfección para cumplir los límites máximos permisibles en lo que se refiere a la calidad microbiológica antes de ser descargadas a un cuerpo receptor. En este aspecto, la norma oficial vigente establece el límite máximo permisible para lo siguiente (datos exclusivos para ejemplo):

5.2.8.1 Contaminación por patógenos

Para las descargas de aguas residuales vertidas a agua y bienes nacionales, así como las descargas vertidas al suelo (uso en riego agrícola) será de mil y 2 mil como número más probable (NMP) de coliformes fecales por cada 100 mL.

5.2.8.2 Contaminación por parásitos

Para las descargas vertidas al suelo (uso en riego agrícola), es de un huevo de helminto por litro para riego no restringido, y de cinco huevos por litro para riego restringido.

El agua generada por la comunidad se estima en 40 m³/s durante la época de secas y de 80 m³/s en la de lluvias. Esta cantidad de agua se conduce por medio de tres salidas. El agua residual es empleada principalmente para riego agrícola, por lo que es importante evaluar un sistema de

desinfección que genere un efluente que cumpla con las especificaciones correspondientes.

La evaluación del sistema de desinfección se llevó a cabo en una planta piloto. El proceso de la planta incluía rejillas, floculación química con alúmina y un polímero, tratamiento primario con un clarificador seguido de filtración usando un filtro de arena o medio sintético. La desinfección fue evaluada y se dimensionó el sistema.

La aplicación de la luz UV se requiere para controlar los coliformes fecales y no los huevos de helminto quienes son removidos por el tratamiento primario avanzado.

5.2.8.3 Métodos

Los parámetros analizados en este estudio se muestran en la Tabla 5.5. La desinfección se realizó con el equipo de luz colimada, el cual cuenta con una lámpara de baja presión. La caracterización del agua para la desinfección se hizo con base en la determinación de porcentaje de transmitancia, sólidos suspendidos totales y distribución de tamaño de partícula.

El efecto del cambio de los SST y la distribución de tamaño de partícula en la concentración de los coliformes fecales fue estudiado aplicando dosis similares para cada experiencia. Los resultados demuestran que la combinación del efecto del au-

Tabla 5.5 Parámetros analizados en el estudio de desinfección

Efluente	Transmitancia de la muestra	Sólidos suspendidos totales	Distribución de tamaño de partícula
	%T	SST (mg/L)	DTP (µm)
Influyente	2.9	102	16.9
Influyente filtrado	4.8	66.8	11.8
Primario	7.6	43.3	16.5
Primario filtrado	9.7	32.3	11
Filtro con medio sintético	8.1	15.6	11.6
Filtro con arena	9.1	29.2	13.3

mento en los SST y las partículas grandes incrementa la supervivencia de los coliformes fecales (Tabla 5.6). La calidad del efluente de cada etapa de proceso fue muy variable durante el tiempo de pruebas. Los efluentes primarios con concentraciones de sólidos suspendidos de 37 a 43 mg/L y 16.4 por ciento de partículas >31 µm requirieron dosis de luz UV mayores a 40 mWs/cm² para alcanzar los límites permisibles (1 000 UFC/100 mL). Aquellos efluentes con concentraciones de SST entre 25 y 34 y 4 por ciento de partículas > 31 µm alcanzaron los límites permisibles con sólo 20 mWs/cm² (Ilustración 5.17).

5.2.8.4 Análisis de costos

El análisis de costos se basó en suposiciones que se derivaron de los datos obtenidos en la planta piloto.

Los criterios de diseño que se tomaron fueron los siguientes:

- a) Flujo máximo: 43 m³/s
- b) Sólidos suspendidos totales: 20 mg/L

- c) Transmitancia a 254 nm: 30 por ciento
- d) Valores a ser alcanzados en el efluente: 1000 CF/100 mL

El sistema propuesto para cubrir estos requerimientos es el sistema UV4000. El costo proyectado del sistema fue de \$30 000 000 US, considerando un interés anual del 8 por ciento a un término de 20 años.

En la Tabla 5.7 se presentan todos los conceptos considerados para el cálculo de costos del sistema de desinfección propuesto sí como el porcentaje asignado a cada uno de ellos. Así, el costo anual de operación y mantenimiento es de \$6 351 US/m³ de agua tratada.

Los resultados mostraron que la luz UV es adecuada para la desinfección de efluentes primarios con diferentes niveles de tratamiento así como para efluentes filtrados.

Para el caso de la calidad del efluente filtrado, se alcanzaron valores menores a 1000 UFC/100 mL con una dosis de 20 mWs/cm².

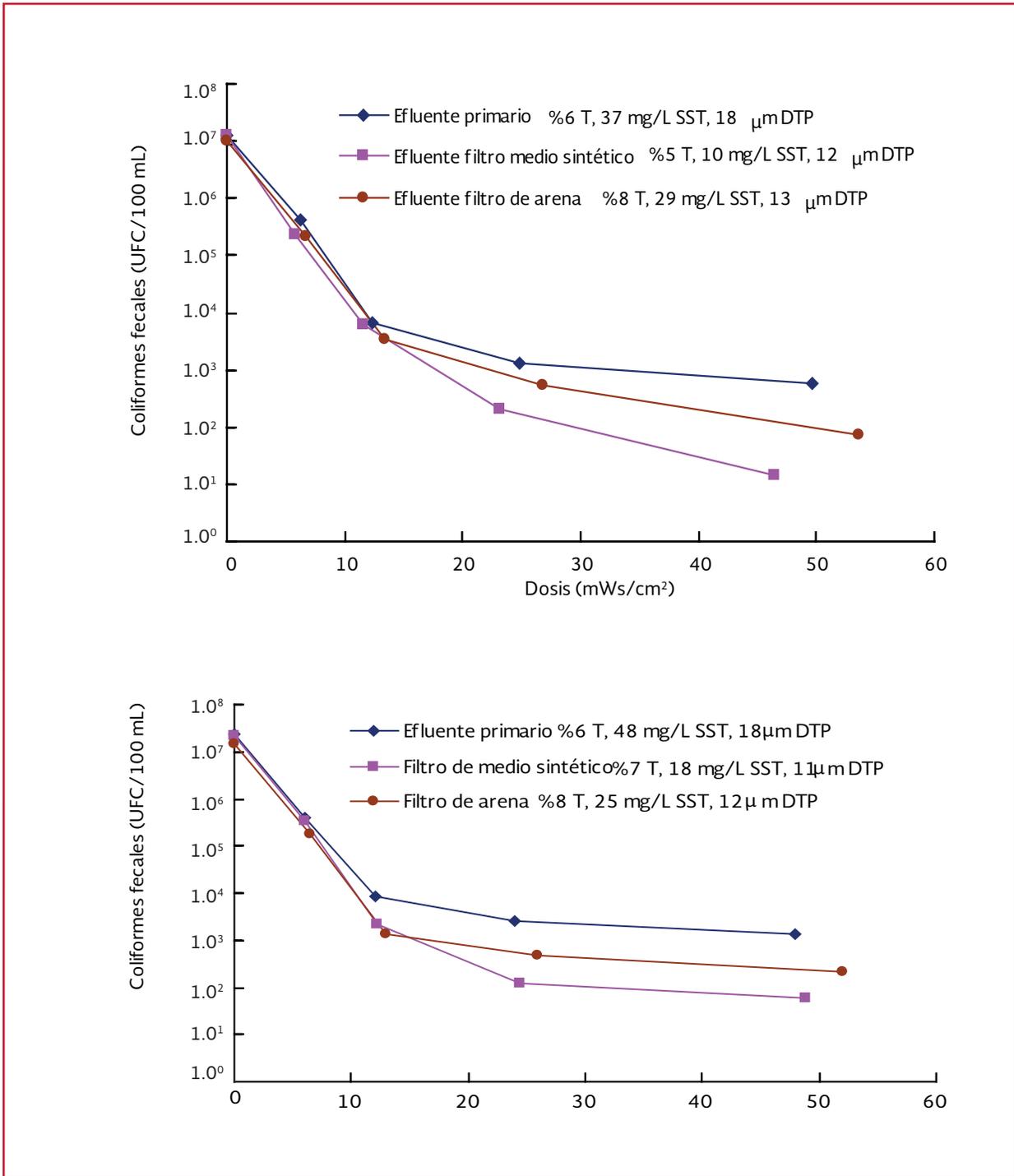
Tabla 5.6 Comparación del efecto de aumento en SST y DTP en la concentración de CF aplicando una dosis de 22 mW s/cm²

Efluente	SST (mg/L)	DTP(µm)	% > 31 µm	Coliformes fecales UFC/100 mL
Primario	37	19	13	2800
Filtro de arena	29	13	6.6	1300
Filtro medio sintético	10	12	3.6	500

Tabla 5.7 Conceptos considerados para el cálculo de costos

Propuesta de costos de capital	Propuesta de costos de operación
Equipo de UV 99.7%	Costo anual por energía 83%
Obra civil, limpieza y otros 0.05%	Costo total de las partes de repuesto 16.6%
Instrumentación(3%) 0.07%	Costo anual por químicos 0.08%
Electricidad (7%) 0.17%	Costo total por el trabajo 0.3%

Ilustración 5.17 Efecto del tamaño de partículas en el grado de desinfección



5.3. OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO

El personal requerido así como la capacitación para la operación y mantenimiento de un siste-

ma de desinfección por luz ultravioleta es mucho menor al requerido para cloración. La sencillez de operación y mantenimiento, deriva en una disminución de las horas de trabajo invertidas en estas actividades. Una planta que cuenta con

desinfección UV requiere de 7.5 días del tiempo del personal por mes comparando con 12.5 días que se requiere para una planta con cloración (Fahey, 1990).

5.3.1 REEMPLAZO DE LÁMPARAS

Las lámparas pierden del 30 a 40 por ciento de su intensidad con el paso del tiempo y la mayor parte de los costos del mantenimiento son debido a su reemplazo.

Las lámparas son la única parte de un sistema de UV que necesita un cambio programado para mantener la radiación relativamente uniforme. Generalmente se reemplazan después de 7 000 u 8,000 horas de operación, aunque ello depende de las condiciones de operación de cada planta. Para asegurar que las lámparas son reemplazadas en el tiempo apropiado, es mejor cambiar todas en una sola operación programada y mantener un registro de la fecha y tiempo de vida de los bancos.

Para evitar el paro total del sistema UV, las lámparas deben ser cambiadas por módulo. El módulo debe ser desconectado antes de removerlo del soporte. Para evitar que las huellas digitales queden impresas en las lámparas, se deben emplear guantes.

Se recomienda mantener un respaldo de lámparas equivalente a por lo menos 5 por ciento del número total de lámparas en el sistema.

5.3.2 LIMPIEZA

Para asegurar una máxima desinfección es esencial que las camisas de cuarzo se mantengan limpias (Trojan Engineering, 1994). La frecuencia de limpieza depende de:

- El proceso de tratamiento previo, en especial los reactivos empleados
- La calidad del efluente
- La velocidad del efluente a través del sistema de desinfección

Generalmente, las lámparas se limpian una o dos veces al mes dependiendo de la naturaleza de las aguas residuales (Ilustración 5.18) (Fahey, 1990).

5.3.2.1 Métodos de limpieza

La complejidad de la limpieza puede variar desde un área equipada con sólo una estructura para sostén y solución de limpieza, hasta un tanque con inyección de aire automática o dispositivo de ultrasonido para los bancos grandes. La limpieza se puede realizar química o físicamente. La limpieza de los sistemas de lámparas horizontales se realiza removiendo los módulos o los bancos y llevándolos a un lugar específico.

Limpieza química

Se realiza aplicando ácido diluido (pH de aproximadamente 1 a 2) a la superficie con incrustaciones. El ácido se pone individualmente a cada lámpara con ayuda de una esponja o introduciendo los módulos en la solución. La inmersión probablemente es la técnica más eficiente. Se emplea una gran variedad de soluciones como el ácido cítrico, el ácido fosfórico, la cal y las soluciones comerciales (para limpieza de baños). La selección depende de los requerimientos de cada planta y debe además considerarse el método de disposición del reactivo usado. Las plantas de tratamiento de aguas residuales deben usar un agente para la limpieza de las lámparas que sea barato, comercialmente disponible y fácil de manejar y de disponer.

Ilustración 5.18 Lámpara con incrustaciones



Limpieza física

Algunos procesos físicos pueden también ser incorporados para eliminar las incrustaciones. El uso de burbujas de aire provenientes del fondo del canal por periodos cortos pero con frecuencia (10 minutos por día) es un método efectivo. Esta opción no elimina la necesidad de limpieza química, pero incrementa el intervalo entre los mismos (WEF, 1996).

Como operación se distinguen tres opciones que se definen en la Tabla 5.8 y se indica cuando se deben usar cada uno.

a) **Estructura de Limpieza Portátil.** Es para sistemas pequeños donde se limpia cada

módulo en forma directa. Una vez que el módulo es desconectado, se saca manualmente del canal y se coloca dentro de un estante de limpieza. Una vez en ella, cada camisa de cuarzo se limpia con una solución eliminadora de incrustaciones o depósitos. Una vez limpio, el módulo o la lámpara es enjuagada y colocada nuevamente en el canal, se conecta y se enciende

b) **Tanque de Limpieza Portátil.** Para sistemas de UV de tamaño intermedio se usa un tanque de limpieza con capacidad para tres módulos, en el cual hay un mezclado turbulento inducido por medio de un soplador y difusores. El procedimiento es similar al del estante de lim-

Tabla 5.8 Sistemas de limpieza de lámparas UV

Sistema de limpieza	Número de lámparas de UV
Estante de limpieza portátil	0-20
Tanque de limpieza portátil	200-600
Fuera del canal	>600

pieza portátil. Después de que el módulo ha sido desconectado, se remueve manualmente del canal y se coloca en el tanque de limpieza. Se aplican 5 minutos de agitación en una solución comercial o de ácidos inorgánicos al 5 por ciento (de ácido fosfórico, por ejemplo). Después de emplear la solución para 100 a 200 módulos se requiere cambiarla. Este cambio debe ser programado y normalmente ocurre de cada 4 a 6 meses

Limpieza Fuera del Canal

Se recomienda para los sistemas de desinfección más grandes pues es menos laboriosa que los otros métodos. Su ventaja es que permite limpiar todo un banco de UV y no módulo por módulo (Trojan Engineering, 1994)

Medidas de seguridad

El uso y manejo inapropiado de los equipos de luz ultravioleta puede producir daños en ojos y piel. La responsabilidad del manejo depende tanto de los supervisores como de los empleados quienes deben estar apropiadamente capacitados y efectuar procedimientos preestablecidos y conocidos. En la Tabla 5.9 se presentan las responsabilidades de cada uno. Con respecto a la exposición a la radiación ultravioleta se deben seguir las siguientes medidas de seguridad:

- Evitar que los ojos y la piel sean expuestos a radiación directa de la luz UV o a su reflejo; el efecto de la sobreexposición está determinado por la dosis, la longitud de onda, la parte del cuerpo expuesta y la sensibilidad de la persona
- Evitar sobreexposición de los ojos pues produce la inflamación dolorosa de la conjuntiva, cornea e iris (fotoqueratitis); los síntomas se desarrollan cuando el tiempo de exposición va de 3 a 12 horas continuas
- Existe una sensación extraña en el cuerpo acompañado de lagrimeo; los síntomas desaparecen generalmente en uno o dos días; la exposición prolongada puede producir daño permanente a la vista
- Evitar la exposición de la piel, pues después de una exposición de 1 a 8 horas produce eritema (enrojecimiento); la exposición repetida puede llevar a un cáncer de piel
- Reportar la sobreexposición de la radiación de luz UV al supervisor
- Mantener siempre las lámparas encendidas sumergidas en el canal
- Apagar las lámparas antes de darles servicio
- En caso de que ocurra alguna exposición accidental, consultar al médico y colocar agua fría sobre las áreas de la piel afectada
- Para realizar la limpieza deben usarse guantes y lentes con protección lateral. La piel expuesta debe cubrirse para evitar quemaduras

Tabla 5.9 Listado de responsabilidades del supervisor y empleado

Supervisor	Empleado
Asegurarse de que el personal esté entrenado adecuadamente sobre el uso, mantenimiento y peligros que representa el uso de fuentes de luz UV. Asegurarse de que la protección requerida está disponible y se use en el trabajo.	Seguir las prácticas de seguridad. Usar protección adecuada para piel y ojos. Reportar el mal funcionamiento del equipo de luz UV. Limpiar las lámparas.



6

OZONACIÓN

6.1. FUNDAMENTOS

Debido a su alto poder oxidante, el ozono es un excelente agente desinfectante utilizado en la eliminación o desactivación de bacterias, virus y protozoos, su principal limitación es su inestabilidad en el agua, por lo que no puede usarse como desinfectante residual en la red de distribución, sin embargo, es muy efectivo como desinfectante primario.

La palabra ozono proviene del griego ozein, que significa oler. El ozono se produce cuando las moléculas de oxígeno (O_2) son disociadas por medio de una fuente de energía produciendo átomos de oxígeno que posteriormente chocan con una molécula de oxígeno para formar un gas inestable de color azul y olor picante característico. El ozono (O_3), que se utiliza para desinfección, es uno de los oxidantes más fuertes que es usado como desinfectante.

El proceso de Ozonación sigue dos etapas, la primera es suministrar el ozono en una mezcla con aire u oxígeno al agua a tratar, dispersados de tal manera que el área de contacto con el agua donde se inyecte sea lo máximo posible. La segunda etapa del proceso se lleva a cabo en el contacto del Ozono con los compuestos orgánicos e inorgánicos del agua para su oxidación. El ozono

remanente en el agua, permanece como Ozono residual y el ozono no utilizado se libera del reactor. La desinfección ocurre en el momento en que daña y destruye componentes críticos de los microorganismos aún los recalcitrantes como la Giardia, virus y ciertas formas de algas. La efectividad de la desinfección es directamente proporcional a la Concentración del Ozono (C) y al tiempo de contacto (t). En este capítulo se resumen los aspectos principales para el empleo del ozono como desinfectante.

6.1.1 ESTADO DEL ARTE

El ozono fue descubierto en 1785 por Van Maarten y fue en 1857 cuando Werner von Siemens diseñó un generador de ozono. En 1893 se usó por primera vez para desinfección del agua en Holanda, y en 1906 se aplica en una planta de tratamiento en Niza por la Compagnie Générale des Eaux de Bon Voyage. En los últimos 25 años, los mayores avances y desarrollos en este campo, han propiciado una importante mejora en los equipos productores y un mayor empleo en la desinfección del agua.

A partir de las regulaciones de la USEPA para el control de los trihalometanos (THM) en la década de los ochenta, las plantas potabilizadoras que emplean ozono aumentaron en EUA a más

de 300 plantas (Rice, 1999). En Los Ángeles se encuentra la mayor potabilizadora del mundo y fue la primera en emplear oxígeno criogénico (Duane y Georgeson 1987); recientemente se publicaron aspectos relacionados con su funcionamiento y desarrollo exitoso durante veinte años (Stolarik, 2007).

Un comportamiento similar se aprecia en Canadá, donde destaca la planta potabilizadora de Montreal. En Europa se ha observado la misma tendencia; sin embargo, hay que destacar que, a diferencia de Norteamérica, en Europa cuentan con un mayor número de plantas que emplean la ozonización desde principios del siglo pasado, fundamentalmente Francia, que en 1961 ya contaba con 500 instalaciones (Larocque, 1999; Rice, 1999). En países en vías de desarrollo, el incremento ha sido más discreto: México y Argentina ya disponen de plantas potabilizadoras con empleo del ozono (León, 2002).

Teniendo en cuenta las potencialidades de la aplicación de la ozonización, ésta ha sido introducida en diferentes etapas del proceso de potabilización, según el objetivo que se persiga o el problema que presente el agua de abasto en cuestión.

La preozonización se ubica al inicio del proceso. El ozono, como agente oxidante, garantiza el control de la formación de THM. En las etapas de coagulación-floculación, el ozono tiene un efecto especial, ya que actúa sobre la superficie de los coloides en suspensión.

La interozonización, por otra parte, se ubica antes de la filtración y permite mejorar su operación con la consiguiente reducción del tamaño de los filtros y el aumento de la velocidad de filtrado; esto se traduce en una disminución del costo de

construcción civil. Dada su incidencia en el incremento de la biodegradabilidad, se favorece la etapa de filtración biológica. La posozonización se sitúa generalmente después de la filtración; garantiza la desinfección y la eliminación del olor, sabor y color, por lo que incide en la calidad organoléptica del agua. Además, se reduce en 25 % la poscloración antes de la distribución del agua por la red (Bohme, 1999; Rice, 1999).

La tendencia actual es que la posozonización se incorpore a la interozonización, seguida de la filtración por carbón activado granular o biofiltración, con el objetivo de remover pesticidas, carbono orgánico disuelto biodegradable y subproductos de la ozonización. Además, como se ha planteado, el empleo de los procesos de oxidación avanzada (POA) ha aumentado, especialmente los procesos que emplean ozono en combinación con peróxido de hidrógeno (Le Pauloue & Langlais, 1999; Rice, 1999; Von Gunten, 2003; Beltrán, 2004).

La aplicación del ozono en agua residual se inició a partir de los años 70, como complemento de procesos tanto físicoquímicos como biológicos. En Estados Unidos, el ozono ha desplazado al cloro en proyectos de reuso de aguas negras para recarga de acuíferos, llenado de lagos y presas que implican contacto humano, acuicultura y suministro de agua potable.

En México, el ozono se aplica como oxidante en plantas pequeñas de potabilización con problemas de alta contaminación orgánica y de color.

Actualmente, el aspecto de acción del ozono se ha extendido mucho, abarcando procesos de desinfección en el tratamiento de agua potable, aguas residuales, aguas industriales (de proceso, de limpieza, etc.), y aguas marinas entre otras.

6.1.2 USOS DEL OZONO

El ozono se puede usar en el tratamiento del agua para diversos fines, entre los que destacan los siguientes:

6.1.2.1 Desinfección

En cuanto al poder desinfectante del ozono existe un consenso general de su amplio espectro de aplicación. Respecto a las cinéticas de inactivación, se dispone de un gran número de trabajos que refieren algunas discrepancias debido al procedimiento empleado en la determinación de las constantes y las condiciones experimentales utilizadas (Bataller, 2010), tales como el medio acuoso, la dosis de ozono aplicada, la concentración de ozono disuelto, y el tiempo de inactivación entre otras, (Langlais, 1991; Zhou & Smith, 1994; Finch *et. al.*, 2001). En la Tabla 6.1 se presentan valores de parámetros cinéticos para diferentes microorganismos (Von Gunten, 2003). La energía de activación del proceso de inactivación de las bacterias con ozono es similar al intervalo de energía de activación correspondiente a las reacciones químicas con ozono,

en el orden de 35-50 kJ/mol; el proceso de inactivación de los protozoos arroja valores mayores, en el orden de 80 kJ/mol (Bataller, 2010).

Como la energía de activación de la descomposición de ozono en diferentes matrices está en el intervalo de 60 a 70 kJ/mol, para una misma dosis de ozono la inactivación de las bacterias y esporas bacterianas será mayor a menor temperatura, mientras que para los protozoos la efectividad de la inactivación será menor (Finch, 2001; Von Gunten, 2003). Finch (2001) observó que para *Cryptosporidium* este efecto es más marcado en aguas naturales. Asimismo, el pH entre 6 y 8 no afecta la inactivación en estudios de laboratorio, mientras que en aguas naturales la inactivación incrementa a pH 6 (Finch, 2001).

Se reconoce la existencia de una relación entre las características morfológicas de los microorganismos y su resistencia al ozono (Finch, 2001). Se plantea el siguiente orden descendente de resistencia:

Hongos > bacterias esporuladas > bacterias no esporuladas > virus (Pérez-Rey *et al.* 1995).

Tabla 6.1 Parámetros cinéticos de inactivación de microorganismos con ozono (pH 7)

Microorganismo	KO ³ L/(mg min)	Energía de activación KJ/min	Referencia
Bacterias			
<i>Escherichia coli</i>	130	37	Hunt & Mariñas, 1997
<i>Bacillus subtilis</i> (esporas)	2.9	42	Drieger <i>et al.</i> , 2001
Virus			
Rotavirus	76	-	Langlais <i>et al.</i> , 1991
Protozoos			
<i>Cryptosporidium parvum</i> (quistes)	0.84	80	Rennecker, 1999
<i>Giardia muris</i> (quistes)	15	81	Wickramanayane, 1984
<i>Giardia lamblia</i> (quistes)	29	-	

Los estudios realizados por Lezcano et al. (1999, 2001) en bacterias Gram positivas revelaron que presenta mayor resistencia *Staphylococcus aureus* respecto a *Candida albicans* y *Streptococcus faecali*; en el caso de las bacterias Gram negativas presenta mayor resistencia *Pseudomonas aeruginosa* respecto a *Shigella sonnei*, *Samonella thyphimurium* y *Escherichia coli*. Ambos estudios demostraron que la inactivación de las bacterias cumple con una ley cinética de segundo orden dependiendo de la concentración de ozono disuelto y de microorganismos.

Los mecanismos de inactivación de los microorganismos por el ozono se han reportado pocos estudios. Existe evidencia de que el gas reacciona con los constituyentes de la membrana (Chevrier & Sarhan, 1992; Finch 2001). Chevier et al. (1992) plantean la ocurrencia de un desbalance energético en el microorganismo que acelera su muerte. Aunque los mecanismos de acción del ozono sobre los microorganismos no están aun completamente dilucidados, se reconoce que entre las ventajas con respecto al cloro destaca su acción rápida. Se plantea que en las bacterias inactivadas con ozono se produce la lisis celular y por lo tanto su muerte inmediata, mientras que el cloro y otros desinfectantes necesitan difundirse a través de la membrana para llevar a cabo la inactivación (Bataller, 2010).

6.1.3 OXIDACIÓN

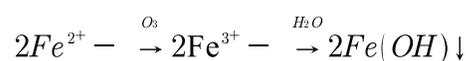
6.1.3.1 Oxidación de hierro y manganeso

Antes de que el hierro y el manganeso puedan ser filtrados, necesitan ser oxidados al estado en el cual puedan formar complejos insolubles. La oxidación comprende la transferencia de electrones del hierro, manganeso y otros químicos tratados por el agente oxidante. El hierro ferroso

(Fe²⁺) es oxidado a óxido férrico (Fe³⁺), el cual forma fácilmente el complejo insoluble hidróxido de hierro Fe(OH)₃. El Manganeseo reducido (Mn²⁺) es oxidado a (Mn⁴⁺), el cual forma (MnO₂) insoluble.

El ozono puede ser utilizado para la oxidación del hierro y el manganeso, sin embargo, puede no ser efectivo para la oxidación en presencia de materiales húmicos y fúlvicos. Si no se dosifica cuidadosamente, el ozono puede oxidar el manganeso reducido a permanganato y resultar también en formación de agua rosada. Las partículas de dióxido de manganeso, formadas también por oxidación del manganeso reducido, deben ser coaguladas cuidadosamente para asegurar su retiro.

El hierro (Fe) y manganeso (Mn) son eliminados del agua por oxidación con ozono de acuerdo con las siguientes ecuaciones:



Ecuación 6.1



Ecuación 6.2

Se requieren 0.43 mg O₃/mg de Fe²⁺ y 0.87 mg de O₃ por mg de Mn²⁺, siendo la reacción con el hierro mucho más rápida. Además, el manganeso es más difícil de eliminar en presencia de materia orgánica, pues ésta se oxida primero.

6.1.3.2 Eliminación de olor y sabor

El sabor y olor en el agua de consumo (junto con la turbidez y el color constituye los parámetros que definen la calidad organoléptica del agua), pueden ser originados por distintas causas que pueden encontrarse ya sean en su origen, en su

tratamiento o en la propia red de distribución, generalmente las causas están en el origen, El agua de consumo que presenta un sabor u olor anormal provoca alarma al consumidor y son las que más quejas originan al asociar estas anomalías con problemas sanitarios aunque sanitariamente sea apta para el consumo, por lo tanto el agua deberá reunir condiciones organolépticas adecuadas.

El ozono destruye malos olores y sabores al atacar directamente la causa que los provoca, la cual suele ser la materia orgánica en suspensión y la acción de los distintos microorganismos sobre ella. Se consiguen resultados satisfactorios con dosis máximas de 2 gr/m³.

6.1.3.3 Precusores de trihalometanos (THM)

La preozonización se ubica al inicio del proceso; el ozono, como agente oxidante, garantiza el control de la formación de THM, dada su eficiencia en la remoción de la materia orgánica y los precusores de los THM. Asimismo, oxida contaminantes orgánicos (fenoles, detergentes, pesticidas), cianuros, sulfuros y nitritos, así como el carbono orgánico disuelto.

6.2. DISEÑO DEL PROCESO DE OXIDACIÓN

6.2.1 PRETRATAMIENTO

6.2.1.1 Mejora de la coagulación

En las etapas de coagulación-floculación, el ozono tiene un efecto especial, ya que actúa sobre la superficie de los coloides en suspensión (que están estabilizados), cambiando la carga de la superficie. Por lo tanto, favorece la atracción en-

tre los coloides y el incremento del volumen de los flóculos, lo que permite que sean separados por filtración, acción que a su vez disminuye la turbidez y los sólidos en suspensión. Se consideran diferentes mecanismos de acción del ozono, entre los que se destaca la microfloculación (Jeckel, 1994). En este sentido, se reporta un ahorro de 25 por ciento de coagulante y la reducción del tamaño de los floculadores (Bohme, 1999; Rice, 1999).

6.2.1.2 Incremento de la biodegradabilidad

El ozono, por otro lado, incrementa la biodegradabilidad de la materia orgánica al posibilitar la conversión de los compuestos de alto peso molecular en otros de menor peso, más polares y oxigenados, a la vez que inocuos y biodegradables. También permite la remoción de hierro y manganeso. En este sentido, facilita el desacomplejamiento de estos metales con sus matrices respectivas. En las aguas residuales domésticas, el ozono se utiliza antes del tratamiento biológico con el fin de aumentar la biodegradabilidad de cianuros, nitritos, sulfuros, fenoles, hidrazinas, plaguicidas y materia orgánica recalcitrante, como son los ácidos húmicos y fúlvicos. En especial, estos últimos, ya que:

- Causan color
- Son precusores de trihalometanos
- Se absorben sobre carbón activado y coloides, modificando el funcionamiento de la floculación
- Taponan resinas, membranas y equipo
- Interfieren con el tratamiento del agua
- Acomplejan microcontaminantes orgánicos e inorgánicos, haciéndolos menos fáciles de eliminar; por ejemplo, solubilizan metales
- No son biodegradables

El ozono modifica la estructura química de los ácidos húmicos, lo cual se nota por la eliminación del color al romper las dobles ligaduras de los compuestos aromáticos y por la disminución de la absorción a 254 nm. En la Tabla 6.2 se presentan las dosis para diversas aplicaciones del ozono.

6.2.2 REACCIONES DURANTE LA OZONIZACIÓN

6.2.2.1 Reacciones con compuestos inorgánicos

El ozono es una especie muy efectiva para especies inorgánicas reducidas como Fe^{2+} , Mn^{2+} , S^{2-} ,

NH_3 , etcétera. En la Tabla 6.3 se muestran las reacciones con los principales compuestos inorgánicos (AWWA, 1991), así como la dosis estequiométrica de ozono para su oxidación.

6.2.2.2 Reacciones con microcontaminantes orgánicos

Se denominan microcontaminantes orgánicos a una gran variedad de compuestos químicos, generalmente sintetizados por el hombre, que están presentes en el agua en pequeñas cantidades (del orden de ng/L a g/L) y que suelen presentar un cierto grado de toxicidad (Rodríguez, 2003), a grandes rasgos se pueden clasificar en los siguientes grupos: hidrocarburos alifáticos y

Tabla 6.2 Dosis de ozono para diversos contaminantes presentes en el agua

Aplicación	Dosis teórica de ozono (ppm)	Dosis real de ozono (ppm)	Referencia
Fe^{2+}	0.43	0.14-0.5	Bryant et al.,1992
Mn^{2+}	0.88	0.5-1	Langlais et al, 1991
S^{2-}	0.6	0.6-1.5	Garay & Cohn, 1992
Bacteriófagos f2	0.033		Garay & Cohn, 1992
Carbón orgánico total	0.3-0.4 mg/mg C		Chang & Singer,1988
Carbón orgánico disuelto	1-2 O_3 / carbón orgánico disuelto		Hoigné, 1998
Coliformes fecales		3-5	Rakness et al., 1993
Color	1-3		Watts,1985 y Killops, 1986
Escherichia coli	0.53		Garay & Cohn, 1992
Escherichia coli	0.239		Garay & Cohn, 1992
Virus Coxsackie	0.51		Garay & Cohn, 1992
Virus polio	0.012		Garay & Cohn, 1992
Virus polio	0.015		Garay & Cohn, 1992
Virus Porcine Pigina	0.024		Garay & Cohn, 1992

Tabla 6.3 Reacción del ozono con compuestos inorgánicos (Rodríguez, 2003)

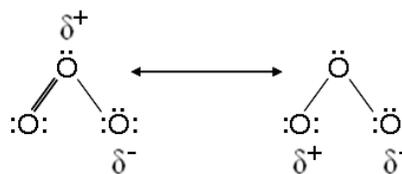
Compuesto	Reacción	Demanda de O_3
Fe(II)	$2\text{Fe}^{2+} + \text{O}_3 + 5\text{H}_2\text{O} \rightarrow 2\text{Fe(OH)}_3 \downarrow + \text{O}_2 + 4\text{H}^+$	0.44 g O_3 /g Fe
Mn(II)	$\text{Mn}^{2+} + \text{O}_3 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{MnO}_2 \downarrow + \text{O}_2 + 2\text{H}^+$	0.88 g O_3 /g Mg
	$2\text{Mn}^{2+} + 5\text{O}_3 + 3\text{H}_2\text{O} \rightarrow 2\text{MnO}_4^- \downarrow + \text{O}_2 + 6\text{H}^+$	2.22 g O_3 /g Mg
NH_3	$\text{NH}_3 + 4\text{O}_3 \rightarrow \text{NO}_3^- + 4\text{O}_2 + \text{H}_3\text{O}^+$	Según el pH
NO_2^-	$\text{NO}_2^- + \text{O}_3 \rightarrow \text{NO}_3^- + \text{O}_2$	1.04 g O_3 /g NO_2^-
S_2	$\text{S}^{2-} + 4\text{O}_3 \rightarrow \text{SO}_4^{2-} + 4\text{O}_2$	6.00 g O_3 /g NO_2^-
CN^-	$\text{CN}^- + \text{O}_3 \rightarrow \text{CNO}^- + \text{O}_2$	1-1.8 g O_3 /g CN^-
	$2\text{CCN}^- + 2\text{H}^+ + 3\text{O}_3 \rightarrow 2\text{CO}_2 + \text{N}_2 + 3\text{O}_2 + \text{H}_2\text{O}$	

aromáticos, disolventes clorados, fenoles y polifenoles, pesticidas y surfactantes.

Dependiendo de la estructura de cada compuesto, su degradación se ve favorecida por las reacciones:

- Por vía directa; como ozono molecular
- Por vía radicalaria; en diversos radicales libres que son más reactivos que el ozono molecular (Hoigné & Bader, 1977; Hoigné & Bader, 1978)

Por vía directa el ozono molecular tiene dos formas de resonancia (Ecuación 6.3) que hacen que actúe como dipolo, agente electrófilo o agente nucleófilo.



Ecuación 6.3

Por vía directa reaccionan los compuestos que tengan en su estructura centros nucleófilos (átomos de O, N, S, P, carbonos nucleófilos) y compuestos insaturados. Destacan por su gran reactividad con el ozono molecular los compuestos aromáticos activados en orto por sustituyentes electrón-donadores (OH, OCH₃, CH₃, NH₂), (Rodríguez, 2013), que se muestran en la Tabla 6.4. En la forma indirecta, los radicales que el ozono genera en el agua son varios. El principal

Tabla 6.4 Reacciones directas del ozono molecular

Mecanismos de oxidación	Compuestos que atacan	Productos obtenidos
Dipolar	Cicloadición dipolar 1-3 a 1-2 sobre ligaduras insaturadas	Aldehidos R1 > C=O R2 Cetonas HOO R3 > C < HO R4
Electrofilico	Aromáticos (fenol), aminas y mercaptanos.	Ácidos: H HOOC – C – COOH, COOH ↓ O O Otros: Cl, NH ⁴⁺ , NO ₃ , CO ₂ , H ₂ O
Nucleofílico	Dobles ligaduras entre carbono-nitrógeno (> C = N –) en disolventes inertes.	NH=CHO

es el OH que es muy reactivo por tener un electrón desapareado. Las condiciones que favorecen la formación de OH son:

- a) pH > 9
- b) Presencia de iones metálicos que forman una pareja óxido-reductora, como
$$\text{Fe}^{2+} \quad \text{Fe}^{3+}$$
$$\text{Mn}^{2+} \quad \text{Mn}^{3+}$$
- c) Adición de peróxido de hidrógeno (agua oxigenada)
- d) Aplicación de radiación UV que favorece la fotólisis y la formación no sólo de radicales OH sino también de O₂

6.2.3 VENTAJAS Y DESVENTAJAS DEL USO DE OZONO

El ozono tiene una serie de características que lo hacen atractivo, como son:

- Facilidad de producción de ozono desde aire u oxígeno por descargas eléctricas
- Ser un fuerte oxidante que reacciona rápidamente con la mayoría de los compuestos inorgánicos, orgánicos y microorganismos (incluyendo esporas, quistes y algas) presentes en las aguas naturales y residuales
- No imparte sabor ni olor al agua
- Reduce el TOC, color, olor y turbidez del agua tratada
- Posee mayor poder desinfectante que el cloro y sus derivados

Sus desventajas se refieren a:

- El ozono es altamente corrosivo y tóxico
- El costo inicial del equipamiento es alto, y los generadores requieren mucha energía
- El ozono debe ser generado *in situ*

- La vida media del ozono en el sistema de distribución es de 25 minutos a temperatura ambiente, con lo que la ozonización no garantiza un residual
- Son necesarios filtros activados para la eliminación de carbono orgánico biodegradable
- El rendimiento del equipo generador de ozono
- La calidad de los métodos de inyección del gas

Para remediar los dos últimos factores tecnológicos, las plantas convencionales están diseñadas para aplicar el ozono a presión (0.7 kg/cm²) justo después de generarlo con el fin de evitar pérdidas. Por lo anterior, es importante conocer los criterios de selección para el generador de ozono y sus métodos de inyección.

6.2.4 GENERADORES DE OZONO

El ozono producido no puede ser almacenado ni transportado como otros gases industriales, ya que es mucho menos estable que el oxígeno, el motivo es que rápidamente se vuelve a convertir en oxígeno, y por ello debe ser creado en el lugar en donde será utilizado

El ozono puede ser producido por tres métodos:

- Fotoquímico
- Electrólisis del ácido sulfúrico
- Corona de descarga

6.2.4.1 Fotoquímico

Se basa en la ionización del aire o del oxígeno con luz ultravioleta. Es muy económico y se aplica para tratar pequeñas cantidades de agua

que no demanden mucho ozono con el fin de desinfectar y evitar malos olores. Consume gran cantidad de energía y su eficiencia depende de la humedad del aire y la durabilidad de la lámpara. Su desventaja más importante es la baja concentración de ozono que produce (0.5 por ciento en peso), pues éste se forma a una longitud de onda de 185 nm y se destruye a 254 nm; longitudes de onda que, desafortunadamente, coexisten en el sistema.

6.2.4.2 Electrólisis del ácido sulfúrico

El principio es muy simple y tiene muchas ventajas, como son el uso de corriente directa de bajo voltaje, el no necesitar gas de alimentación, el reducido tamaño del equipo y el generar altas concentraciones de ozono.

Sin embargo, presenta corrosión, erosión e incrustaciones en los electrodos, requiere electrolitos especiales o agua con baja conductividad y, si existen iones de cloruro en el agua, genera cloro libre, lo que afecta significativamente la formación del ozono y disminuye el rendimiento. Se emplea únicamente en plantas pequeñas.

6.2.4.3 Corona de descarga

Consiste en hacer pasar una corriente de aire u oxígeno, libre de humedad a través de una descarga eléctrica producida al aplicar un alto voltaje entre dos electrodos con un dieléctrico para distribuir la carga.

Tiene la desventaja de que sólo el 10% de la energía suministrada es usada, y el resto se pierde como luz, calor y sonido. Actualmente, es el método más utilizado para producir ozono en grandes cantidades, por ello describiremos a detalle dicho proceso.

6.2.5 GENERACIÓN DE OZONO POR CORONA DE DESCARGA

En la mayoría de las instalaciones, el ozono es producido eléctricamente a partir de aire o de aire enriquecido con oxígeno. En ambos casos el gas debe estar libre de partículas y humedad. A partir de aire, que es el gas más común, se genera de 18 a 53 g O₃/h (Doré, 1989). Un sistema de ozonización del agua comprende fundamentalmente las siguientes instalaciones o equipos:

- Sistema para preparar el gas de alimentación
- Generador de ozono
- Cámara de contacto del ozono con el agua el cual suele realizarse por difusores de burbuja o mediante inyectores del tipo Venturi
- Sistema para destruir el ozono residual liberado o desprendido de las cámaras de mezcla los más comúnmente utilizados son por eliminación térmica o bien por eliminación catalítica con catalizadores de paladio, óxido de níquel o manganeso

6.2.5.1 Preparación de gas de alimentación

Esta actividad es fundamental pues afecta el rendimiento de producción. Durante la descarga eléctrica, el N₂ del aire se oxida y forma N₂O₅ el cual, si hay agua en el ambiente, se hidroliza y forma ácido nítrico.



Este último es altamente corrosivo, por lo que el aire debe ser previamente secado (Doré, 1989). La calidad y la concentración del ozono produ-

cido dependen directamente del secado del aire de alimentación. Los proveedores recomiendan que esta operación se realice por lo menos a -60°C para evitar que el agua se condense (Vázquez, 1996).

El sistema de secado consiste, generalmente, de dos columnas en paralelo que operan en forma alternada, pues cada una se regenera cada 96 horas. Se recomienda, que las columnas estén aisladas para conservar la energía, y rellenas, preferentemente con cualquiera de los materiales de la Tabla 6.5. La sílica gel es el mejor de ellos.

En la Tabla 6.6 se presentan los aspectos de diseño relacionados con el sistema de secado. Por ello, los sistemas de preparación incluyen compresor, enfriador, secador y filtro de partículas. El sistema de compresión está relacionado con la producción diaria de ozono, la presión de descarga y el tipo de operación (de volumen constante o variable). El intervalo de capacidad como la presión de descarga para varios tipos de compresores se muestra en la Tabla 6.7.

La cantidad de ozono producido en kg/h depende del gasto del aire alimentado y su calidad (seco y libre de impurezas). Estos parámetros

Tabla 6.5 Medios desecantes

Medio	Características				
	Densidad (kg/m ³)	Temperatura de regeneración (° C)	Área superficial (m ² /g)	Gravedad específica aparente	Forma
Silica gel	609 a 721	149-232	650	1.2	Granular
Alúmina activada	721 a 801	177-260	325	1.6	Cuentas
Silicato de aluminio	480 a 721	480-721	-	1.1	Píldoras metálicas cristalinas

Tabla 6.6 Consideraciones de diseño y selección para el secado de gas (Masschelein, 1996)

Sistema de secado
Tamaño y grado de secado requerido
Consumo energético y mantenimiento del sistema
Condiciones aceptables de operación (temperatura interior y exterior, presión, flujo y punto de rocío)
Alarmas de paro (temperatura de rocío y presión)
Uso de refrigerantes desecadores
Desecantes
Tipo y capacidad de adsorción
Peligro de formación de polvos (filtración)
Método de regeneración
Flujo del gas usado en la regeneración
Control y duración del ciclo
Posibilidad de inspección visual
Producción requerida de ozono para cierto tiempo de operación
Características del agua
Agua con alta demanda de ozono
Presencia de compuestos altamente oxidables o de difícil oxidación
Residual de ozono disuelto que se debe de mantener en un período específico para asegurar la desinfección
Capacidad inicial y crecimiento proyectado de la planta
Complejidad de la operación y el mantenimiento
Filosofía financiera de operación

son de mayor importancia que la variación de voltaje o amperaje. En especial, la pureza del aire es muy importante, pues la presencia de hidrocarburos en concentraciones mayores a 1 por ciento en volumen inhibe la formación del ozono. En la Tabla 6.8 se presentan las consideraciones y parámetros de diseño para alimentar el aire a un generador de ozono.

6.2.5.2 Selección y diseño

El sistema eléctrico varía considerablemente de un fabricante a otro. En cuanto al sistema de enfriamiento, es recomendable que la temperatura del agua de entrada se encuentre entre 15 a 20°

C. Los generadores de corona operan con aire que pasa por un compresor, filtros y secadores. La presión de alimentación no debe variar en 0.14 kg/cm² para una presión normal de 0.7 kg/cm².

El consumo y la capacidad de los generadores de ozono son directamente proporcionales al voltaje y a la frecuencia. En la Tabla 6.9 se clasifican los generadores de acuerdo con el voltaje que manejan. Generalmente, en las plantas de tratamiento de agua se usan frecuencias bajas (50 – 60 Hz) o medias (700 a 800 Hz). Los voltajes que se aplican dependen de las especificaciones del fabricante. Como ejemplo, un generador que opere a 60 Hz requerirá de 27 kV.

Tabla 6.7 Características de los compresores utilizados para la alimentación de aire (Langlais et al., 1991)

Tipo de compresor	Intervalo de capacidad (L/s)	Presión de descarga (kg/cm ²)
Anillos líquidos	47-297	0.3-2.5
Aspas	0-53	7.0-10.2
Rotatorio	47-236	0.6-0.8
Centrífuga	472-583	0.6-1.0
Cilindro rotatorio	472-611	1.4-3.2

Tabla 6.8 Factores por definir para la alimentación del generador con aire comprimido (Langlais et al., 1991)

Sistema de compresión
Tipo (lubricado con o sin aceite)
Modelo (pistón, pistón rotatorio, tornillo o anillos en líquido)
Consumo de energía y requerimientos de mantenimiento del sistema
Tamaño (consideraciones para disminuir flujo, presión y energía)
Monitoreo y control
Sistemas de filtración para partículas en el ambiente o remoción de otros polvos contaminantes
Sistemas de filtración para remoción de aceite, si se utilizan
Alarmas interruptoras (para temperatura y presión)
Niveles aceptables del ruido
Control de temperatura, sistemas de enfriamiento (tipo, materiales de construcción y criterios de rendimiento)
Consideraciones auxiliares o de reserva

Tabla 6.9 Clasificación de los generadores de ozono por corona de descarga de acuerdo al voltaje (Bryant et al., 1992)

Tipo de generador	Frecuencia (Hz)	voltaje (kV)
Baja frecuencia	50-60	10-20
Frecuencia media	700-800	8-14
Alta frecuencia	2000-3000	8-10

La Tabla 6.10 contiene los puntos que se deben definir para el diseño y selección de un generador de ozono.

En la Tabla 6.10 en los aspectos de seguridad de operación, el purgado se refiere a que cuando el generador se encuentra fuera de servicio, antes de arrancarlo se debe purgar con aire seco para eliminar cualquier residual de ozono y humedad. Así también, la prevención del reflujo se refiere a que el tubo que une el generador con la cámara de contacto, debe contar con una válvula check para prevenir cualquier reflujo de agua.

6.2.6 EJEMPLOS DE GENERADORES COMERCIALES DE OZONO

En el mercado se encuentran disponibles equipos con capacidad de producción de 3 g O₃/h a 30 kg O₃/h (Ilustración 6.1). Se aplican para plantas potabilizadoras con módulos de 0.3 a 110 L/s. El suministro eléctrico es de frecuencia media o alta.

Por otro lado, se encuentran equipos que incorporan avances como los tubos dieléctricos de tecnología avanzada (AT), ver Ilustración 6.2. Estos

Tabla 6.10 Diseño del generador de ozono por corona de descarga

Tipo de generador
Voltaje máximo de operación (picos de voltaje)
Frecuencia de operación, mínima y máxima
Temperatura del agua de enfriamiento máxima mantenida por varios días
Alarmas interruptoras (temperatura del gas y líquido, presión del gas y líquido, punto de rocío del gas, flujo del gas y líquido)
Capacidad mínima
Precauciones para la remoción del dieléctrico para su limpieza
Materiales de construcción (gabinete y tuberías)
Energía específica contra concentración de ozono
Presión de operación
Posibilidad de inspección visual (del lado de los dieléctricos y del lado del agua de enfriamiento)
Mediciones del flujo de gas (presión, temperatura y densidad)
Método de enfriamiento
Consideraciones del suministro de energía eléctrica
Requerimientos de voltaje y amperaje (consideraciones de alto y bajo voltaje)
Temperatura ambiente
Fluido de enfriamiento en los transformadores de voltaje (es recomendable que la temperatura del agua de entrada se encuentre entre 15 a 20 °C)
Consideraciones del gabinete electrónico de enfriamiento y contaminación por polvos
Calidad de los componentes electrónicos
Seguridad de operación
Alarmas interruptoras
Prevención del reflujo de agua (Ej: regreso de la humedad del sistema de contacto de ozono)
Protección de los dieléctricos
Precauciones para el purgado (Ej: secado con gas de alimentación)
Mantenimiento preventivo
Abastecimiento y disponibilidad de refacciones

Ilustración 6.1 Generador de ozono de 3 g O₃/h a 30 kg O₃/h



equipos son de construcción modular, muy compactos y capaces de producir ozono en concentraciones hasta de 10 kg O₃/h. Funcionan tanto con aire como con oxígeno. En el primer caso producen entre 30 g O₃/h y 5 kg O₃/h de ozono y en el segundo de 60 g O₃/h a 10 kg O₃/h.

Se ha desarrollado una nueva tecnología que reemplaza a los electrodos dieléctricos convencionales (utilizados por todos los generadores de ozono), que mejora la eficiencia operativa para reducir los costos a los niveles muy bajos, maneja concentraciones de 6 a 14 por ciento en peso, la capacidad de producción de ozono es de 24 kg O₃/h hasta 250 kg O₃/h a una concentración de 10 por ciento en peso a partir de gas de alimentación de oxígeno con una sola unidad de generador. Este avance tecnológico en conjunto con la unidad de poder conforma un buen generador de ozono.

Por otro lado, existen generadores de ozono para aplicaciones de gran capacidad con dos caracterís-

ticas clave: El uso exclusivo de electrodos de tecnología dieléctrica y la tecnología de frecuencia variable, que combinadas son la base de un generador de ozono con una fiabilidad, flexibilidad de la producción y los consumos de potencia específica baja, en un paquete compacto que minimiza los requisitos de espacio y los costos de construcción de instalaciones asociadas, sus capacidades van de 15,3 kg O₃/h, a más de 250 kg O₃/h.

En México, las empresas dedicadas a la distribución de estos equipos, hacen alianza con empresas europeas para ofrecer generadores de ozono industriales, sometidos a normas de calidad europea compatibles con las normas americanas.

6.2.7 CÁMARAS DE CONTACTO Y SISTEMAS DE DIFUSIÓN

El ozono producido debe ser transferido de la fase gas a la líquida para llevar a cabo el tratamiento de agua. Esta transferencia de masa es la principal limitante del proceso y se requiere transportar una cantidad máxima en el menor tiempo posible para minimizar la obra civil y reducir los costos. Para llevarla a cabo se emplea una unidad denominada cámara de contacto que varía en términos del diseño, las condiciones de operación y el punto de introducción del ozono. En algunos casos, el generador de ozono es el que determina el tipo de la cámara de contacto (Ilustración 6.3 e Ilustración 6.4). Por ejemplo, algunos deben ser usados con sistemas de contacto a presión sub-atmosférica. Sin embargo, es más lógico seleccionar primero el tipo de sistema de contacto y luego, como consecuencia, el generador de ozono y el gas de alimentación.

La concentración requerida de ozono determina el tamaño y la geometría del sistema de contacto (Langlais *et al.*, 1991). El diseño está fuertemen-

te influenciado por la baja solubilidad del ozono en las concentraciones en que comúnmente se encuentra el gas de alimentación (de 1 a 10 por ciento). Una parte clave es el difusor, el cual es función del objetivo del tratamiento como se señala en la Tabla 6.11. Los más usados son los difusores porosos de burbuja fina, debido a que no requiere energía adicional ya que se aprovecha la que se genera al comprimir el aire. Las cámaras de contacto se diseñan por etapas cuyo número puede ir de 1 hasta 6, en función del objetivo de la aplicación del ozono. Por ejemplo para desinfección secundaria se recomiendan tres etapas, aplicando en la primera el 67 por ciento de la dosis de ozono total (Rice, 1986).

Una desinfección adecuada ocurre cuando el tiempo de contacto y la concentración son apropiados. Es recomendable definir estos parámetros mediante pruebas de laboratorio para cada aplicación. Cuando se carece de este dato, se emplea el criterio de guardar un valor alto de $CT = 1.6$ min. Dicho criterio varía en cada país, por ejemplo en Francia, para asegurar la desinfección se debe mantener un residual de ozono en la última cámara de contacto de 0.4, durante 4 min. Por otra parte también se debe considerar en el diseño de la cámara los aspectos hidrodinámicos, es decir la afectación de este tiempo de contacto o retención hidráulica por el efecto de cortos circuitos.

Tabla 6.11 Tipo de difusor por aplicación (Vázquez, 1996)

Aplicación	Tipo de Difusor
Desinfección primaria y secundaria	De burbuja fina multietapas, o estático de turbina
Eliminación de hierro y manganeso	Poroso de burbuja fina
Eliminación de color	Tipo Inyector o de burbuja fina
Eliminación de olor y sabor	De burbuja fina multietapas
Eliminación de algas	Tipo Kerag
Remoción de partículas	Cualquiera

Ilustración 6.2 Generador de ozono de 60 g O₃/h a 10 kg O₃/h



Para ello, el tiempo de retención hidráulico se divide en un número de cámaras. Se asume un tiempo recomendable igual al valor de t_{10} , el cual corresponde al tiempo necesario para que el 10 por ciento del trazador salga de la cámara de contacto durante un estudio de trazado. Si no se cuenta con este valor se toman criterios establecidos como se presenta en el ejemplo de la sección 5.2.11. En la Tabla 6.12 se presentan los aspectos que deben considerarse para el diseño de la cámara de contacto de ozono. A continuación se describen las principales cámaras de contacto.

6.2.7.1 Cámara de contacto en multietapas con difusor poroso de burbujas finas

Es la más generalizada en plantas de tratamiento de agua. Son construidas de concreto con cemento resistente a la humedad y corrosión. Se diseñan de 1 a 6 etapas separadas por mamparas. El gas se aplica por el fondo, a contracorriente del flujo, a través de difusores porosos y se reciclan los gases de salida a la primera etapa. El gas ozonado normalmente es descargado desde el generador a una presión entre 0.7 kg/cm² a 1.05 kg/cm², la cual es suficiente para vencer la carga hidrostática y la pérdida debida al paso del gas por la tubería y los difusores (Ilustración 6.5).

6.2.7.2 Cámara de contacto tipo Kerag con mezclador de turbina con presión positiva o negativa

Utiliza un propulsor giratorio rápido con base perforada, a través del cual se introduce el ozono por el fondo (Vázquez, 1996). Este sistema es

común en cámaras de contacto múltiples (hasta 4) donde los gases de salida son transportados hacia la primera cámara, a partir de la segunda (Ilustración 6.6).

6.2.8 CÁMARA DE CONTACTO CON LECHO EMPACADO Y SISTEMA DE DIFUSIÓN POR INYECCIÓN

El gas ozonado se introduce a contracorriente de la solución. Este tipo de cámaras son poco usadas en los Estados Unidos, sin embargo en Alemania y Suiza se usan para facilitar la transferencia (Vázquez, 1996), observe Ilustración 6.7.

6.2.8.1 Sistema de contacto y difusión en tubo profundo en “U”

Consta de dos tubos concéntricos. El ozono se inyecta a través de un orificio ubicado en la parte superior del tubo interno. El agua fluye por éste y regresa en dirección ascendente por el tubo externo, describiendo una trayectoria en “U” (Ilustración 6.8).

6.2.8.2 Cámara de contacto con difusor de plato poroso

Este sistema se usa para combinar la ozonación y la flotación en una sola unidad. Originalmente se empleó para remover algas antes de la filtración. Consta de un tanque de contacto dividido en dos, una parte para la ozonación y, la otra, para la flotación. El agua fluye hacia abajo, por el centro de la cámara, y el ozono es introducido a través de un difusor de plato poroso localizado cerca del fondo (Ilustración 6.9).

Tabla 6.12 Aspectos para el diseño de la cámara de contacto (Langlais et al., 1991)

Difusor de burbuja
Tipo de difusores (de varilla o de disco)
Intervalo de velocidad de los difusores
Volumen del flujo de mezclado del gas (considerando las condiciones mínimas del flujo de gas)
Flujo del gas por unidad de área de la columna de contacto (considerando las condiciones mínimas de flujo de gas)
Materiales de construcción
Velocidad en tuberías
Tiempo de retención hidráulico
Grado de corto-circuito (t_{10} :10 % del tiempo de residencia hidráulica a través del reactor)
Consideraciones de operación y mantenimiento
Eficiencia de transferencia a diferentes condiciones y con relación a la calidad del agua
Otros sistemas de difusión
Tipo (turbina , inyector, eductor, columna)
Principios de operación

6.2.8.3 Cámara de contacto con difusor de turbina radial estático sumergido

Aun cuando este sistema tiene las mejores eficiencias, su uso no se ha generalizado por el costo. Consta de una turbina sumergida sin partes móviles. Aproximadamente el 4 por ciento del

agua de alimentación es presurizada y mezclada con el gas ozonado en un elemento estático localizado en la cabeza de la turbina. Esta mezcla gas/agua es inyectada a través de orificios y debido a la alta presión se forman pequeñas burbujas que ascienden a la superficie haciendo la transferencia a contracorriente (Ilustración 6.10).

Ilustración 6.3 Buque generador de ozono



Ilustración 6.4 Generador de ozono de gran capacidad



Ilustración 6.5 Cámara de contacto en tres etapas con difusor de burbujas

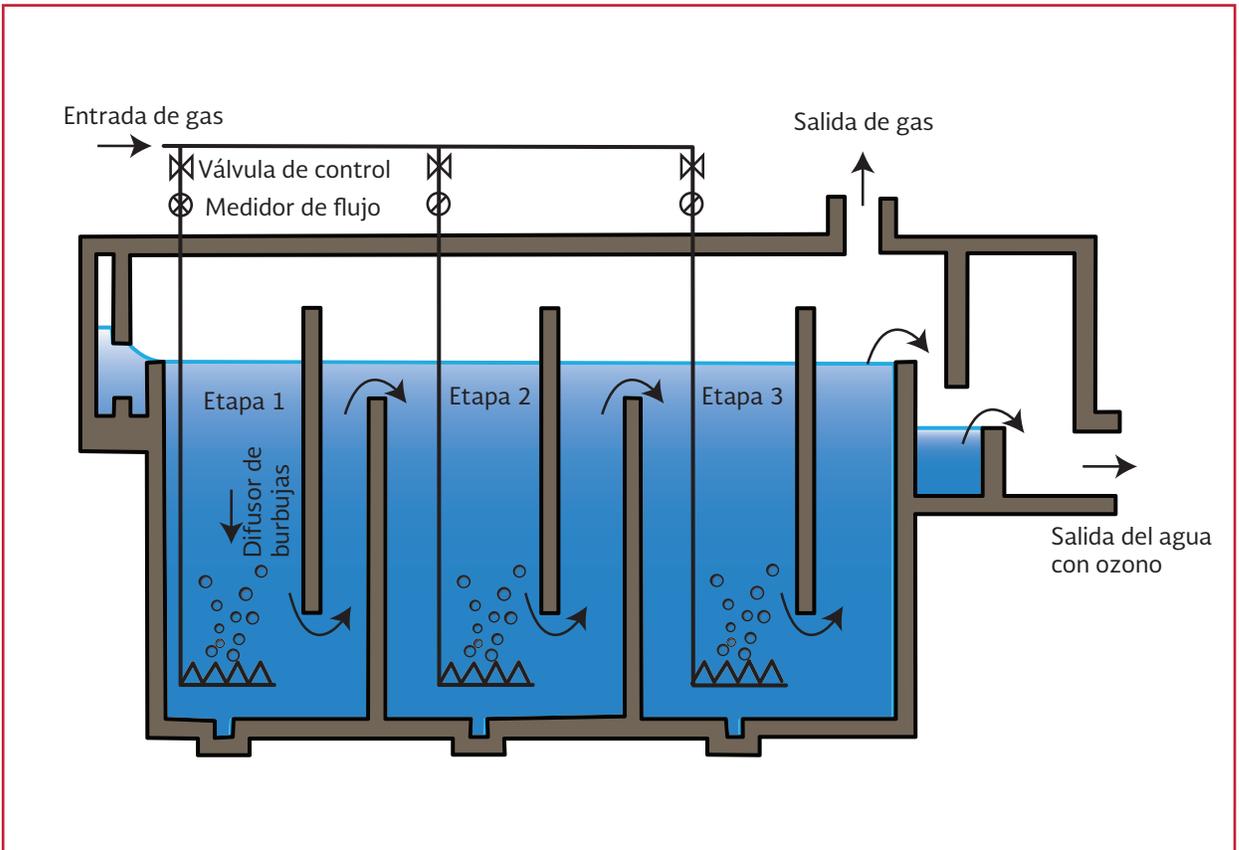


Ilustración 6.6 Cámara de contacto tipo Kerag

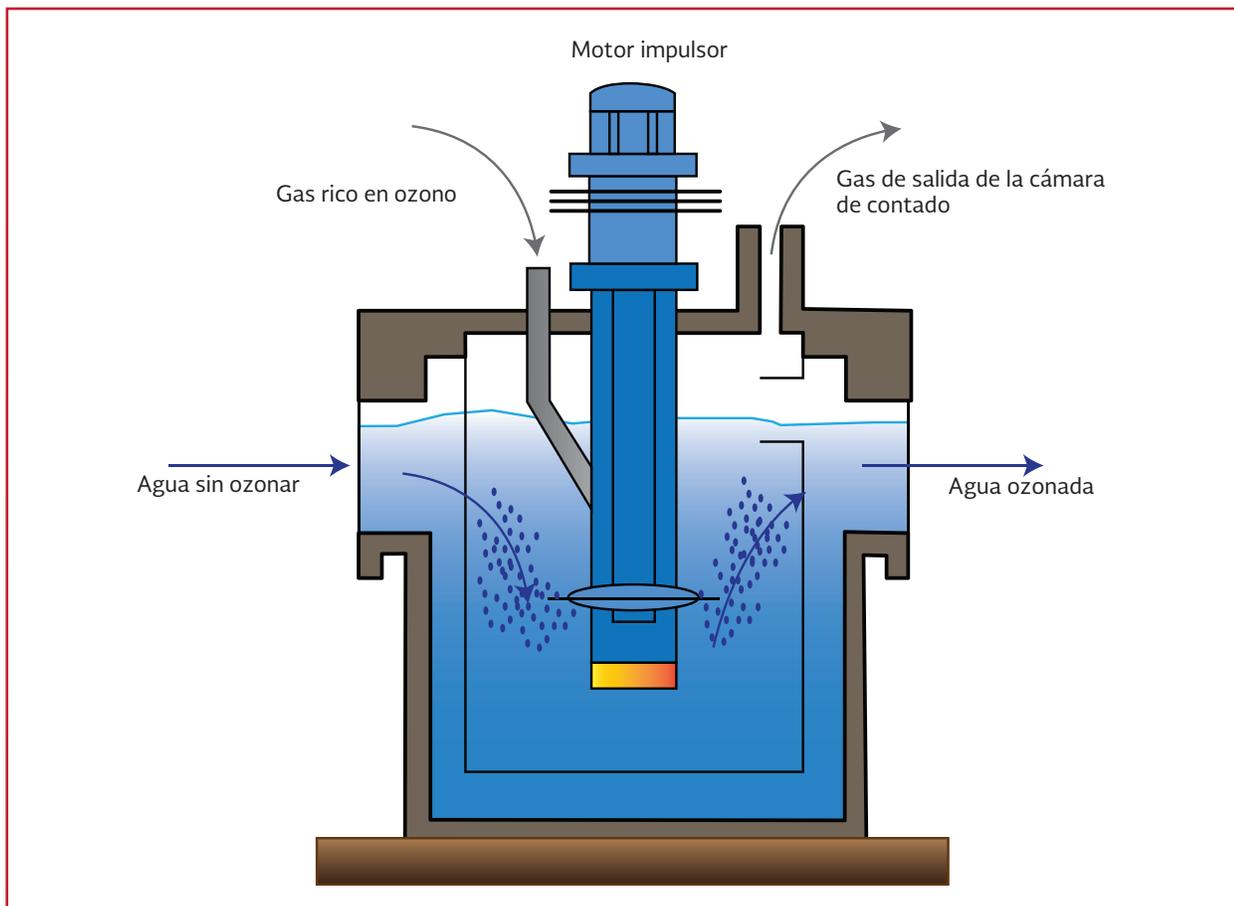


Ilustración 6.7 Cámara de contacto con lecho empacado usada en Sipplingen, Alemania

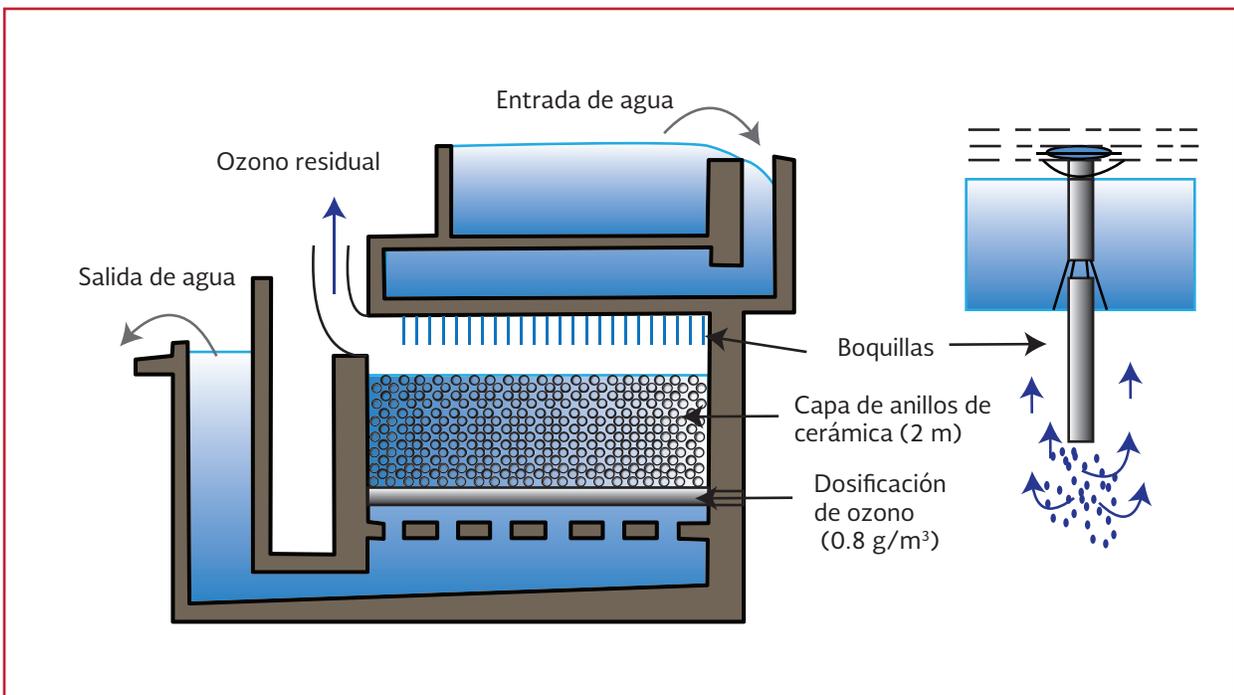


Ilustración 6.8 Cámara de contacto y difusión en tubo profundo "U"

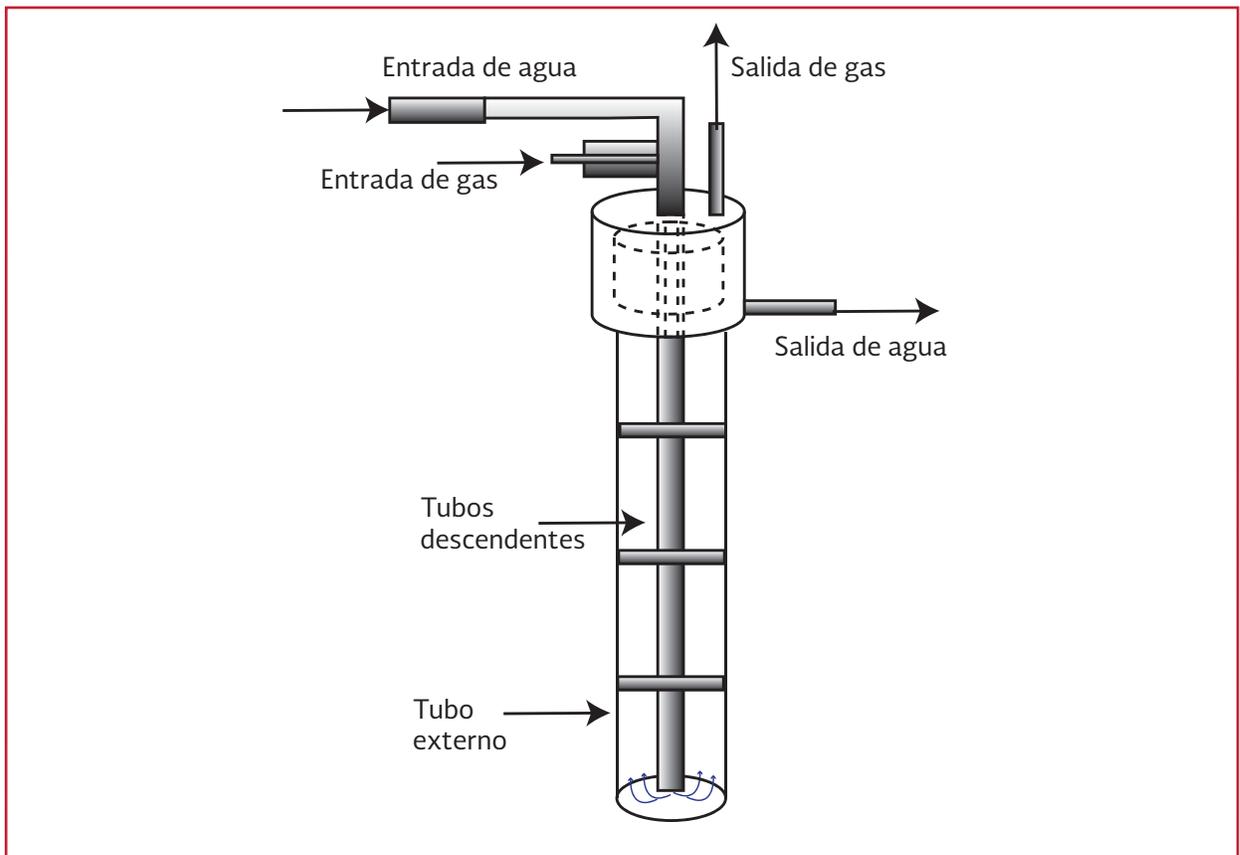


Ilustración 6.9 Cámara de contacto con difusor de plato poroso radial sumergida

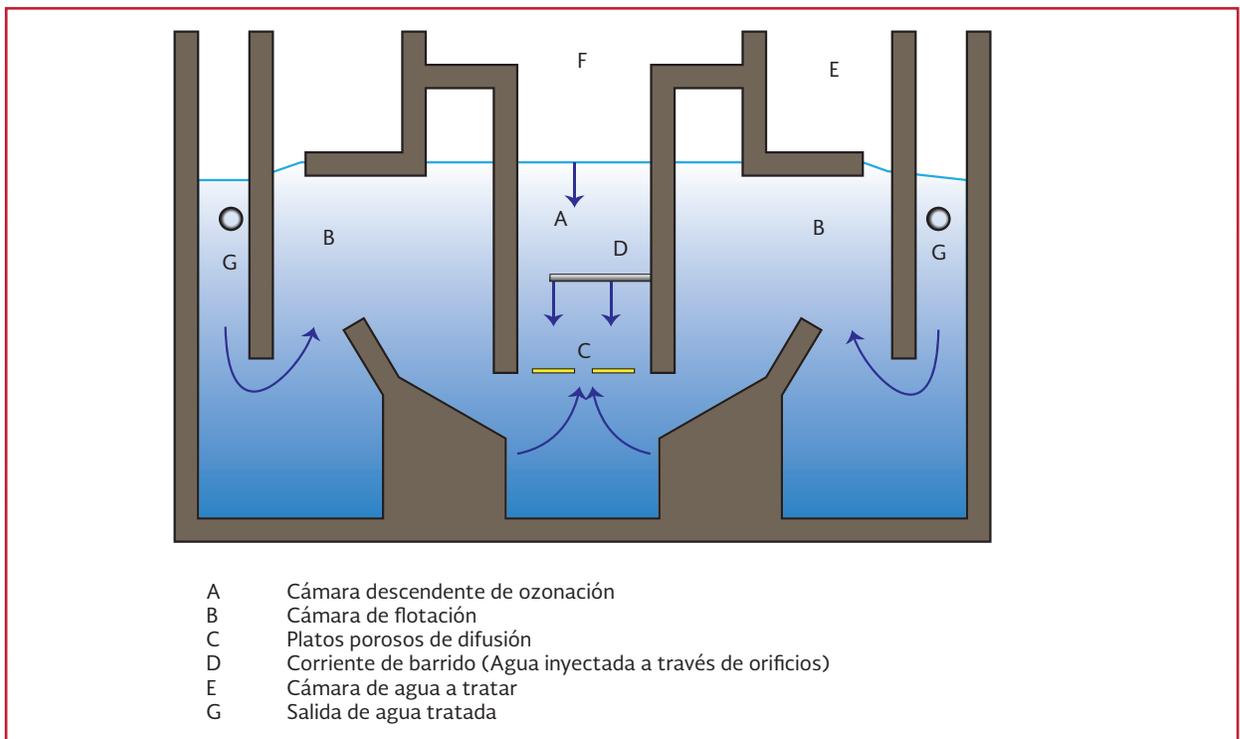
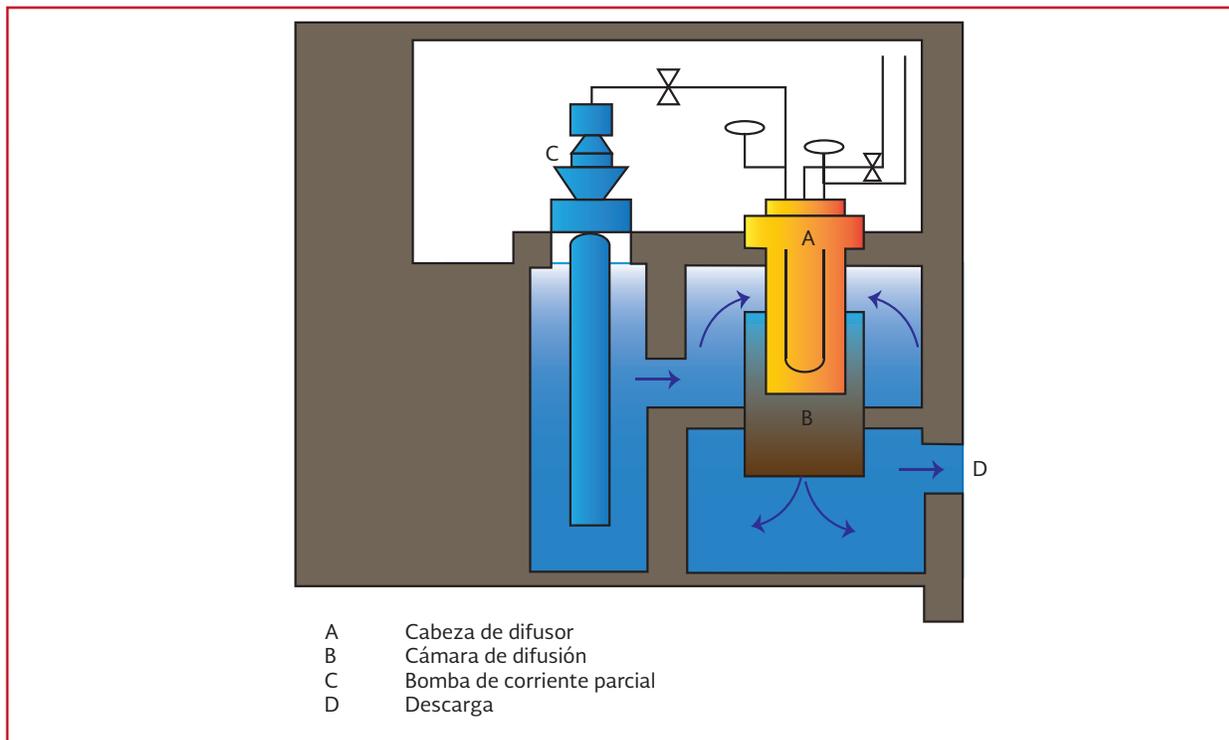


Ilustración 6.10 Cámara de contacto con difusor de turbina radial sumergida



6.2.8.4 Sistema tipo Venturi

Es muy económico pero su aplicación se limita a pequeñas instalaciones. Presenta inconvenientes por corrosión, sobresaturación por oxígeno y nitrógeno y necesidad de desgasamiento.

6.2.9 ELIMINACIÓN DEL GAS RESIDUAL

Debido a que la eficiencia de transferencia del ozono es menor al 100 por ciento y a que éste no puede ser descargado directamente a la atmósfera por ser contaminante, es necesario destruirlo (Bryant *et al.*, 1992).

El aire ozonado de la cámara de contacto, en condiciones normales de presión y temperatura puede contener de 0.2 a 0.5 g O₃/ m³ (Masschelein, 1982), concentración que excede el valor máximo permisible establecido por la OSHA (*Occupational Safety and Health Administration*)

para un período de 8 horas por día de jornada que es 0.1 ppm (0.1 mg/m³). Existen tres formas de eliminar el ozono (Geering, 1995):

- Térmica
- Catalítica
- Adsorción en carbón activado

6.2.9.1 Térmica

Ocurre en un intercambiador eléctrico de calor. Es el más seguro y fácil de operar. Consiste en incrementar la temperatura entre 300 y 350° C durante 5 segundos. A temperatura ambiente la vida media del ozono varía de 20 a 100 horas en aire seco mientras que a 250° C es de sólo 0.04 a 0.4 segundos (Manley & Niegowski, 1967).

6.2.9.2 Catalítica

Es el método más reciente y común en Estados Unidos. Emplea catalizadores de paladio, man-

ganeso u óxidos de níquel, colocados sobre un soporte. Por ejemplo, el de paladio se fija en gránulos de aluminio (Masschelein, 1982). Los catalizadores reversibles pueden ser reactivados cada cinco años con óxidos de nitrógeno, compuestos de cloro o sulfitos. La regeneración se hace calentando a la temperatura recomendada por el fabricante, generalmente de 500 °C de 6 a 7 horas (Orgler, 1982). Un problema que existe es la disposición de los catalizadores gastados ya que representan un problema ambiental.

6.2.9.3 Adsorción Sobre Carbón Activado

Este método es poco usado en plantas grandes por motivos de seguridad y por el intenso mantenimiento que requiere. Hoy en día, no es recomendado ni para pequeñas plantas. El ozono reacciona con el carbón activado seco generando una cantidad considerable de calor que destruye el ozono y se consume lentamente. Esta combustión resulta en la formación de partículas finas de carbón que son explosivas, por lo que el método es peligroso y difícil de monitorear (U.S. EPA, 1986).

6.2.10 CRITERIOS DE DISEÑO

Como primer paso, se debe establecer el objetivo principal del proceso el cual puede ser específico y único (como la desinfección) o múltiple (desinfección, oxidación y/o pretratamiento)

para definir la viabilidad del proyecto (Tabla 6.13). Posteriormente, una vez demostrada la viabilidad del proyecto, es necesario realizar el prediseño para determinar el número y tipo de generadores de ozono lo que depende de la tasa de producción requerida, expresada en kg/(h m³), ver Tabla 6.14. Puesto que el sistema de generación más utilizado es por corona de descarga el cual es normalmente enfriado con agua, hay que considerar la temperatura y la cantidad de agua disponible.

Para desarrollar la ingeniería básica se debe conocer la dosis de ozono y el tiempo de contacto. Para ello, se emplean estudios de tratabilidad con la misma agua o similar, la experiencia en plantas de tratamiento análogas, la literatura y la discusión con otros profesionales experimentados. En particular, puesto que el ozono no sólo destruye los microorganismos sino que ataca partículas y materia orgánica biodegradable, los estudios de tratabilidad son indispensables para definir la eficiencia de la desinfección y la demanda adicional de ozono para compuestos que actúan como interferencias.

6.2.10.1 Pruebas de tratabilidad

Las pruebas de tratabilidad pueden ser clasificadas por escala. A nivel laboratorio generalmente son reactores “batch” de 2 a 70 litros, o semi-batch con flujos de 0.1 a 1 L/min.

Tabla 6.13 Planeación preliminar para un proyecto de ozonación

Puntos por definir	Características
Desinfección primaria o secundaria o ubicación en el tren de tratamiento	Demanda inicial o inmediata de ozono Velocidad de la descomposición del ozono (cinética de consumo) Tiempo mínimo de contacto Dosis mínima de ozono transferido
Estimación preliminar de costos	Inversión Operación y mantenimiento

Tabla 6.14 Pre-diseño de un sistema de ozonación

Factores	Características a definir
Cantidad y tasa de ozono requerida en kg/h, de acuerdo con el gasto de agua en m ³ /h y las variaciones de las dosis de ozono en g O ₃ /m ³	Condiciones mínimas de arranque Condiciones normales o promedio Diseño de equipos auxiliares Condiciones máximas o condiciones pico Condiciones de proyección a futuro
Requerimientos	Área Carga hidráulica disponible Suministro de energía Características topográficas
Criterios de diseño para la cámara de contacto	Tipo Número y tamaño Configuración interna (desarmado) Tipo de flujo, a corriente o contracorriente con respecto al flujo del gas y líquido
Criterios de diseño para la generación de ozono	Concentración de ozono disponible (Ej. Flujo del gas); y su impacto en: - El diseño de la cámara de contacto. - Los equipos complementarios - La selección del gas alimentado, (Ej. Aire u oxígeno) - Costo - Número de unidades (incluyendo las auxiliares) - Costo energético en \$/kWh
Costo	Inversión Consumo energético Mantenimiento Consumibles Evaluación del valor presente Capacitación del personal de operación Operación

Los estudios a escala piloto generalmente son con flujo continuo de 0.08 a 1.7 L/s. La decisión sobre el tipo y la escala de un estudio de tratabilidad está determinada por los objetivos, la información de diseño y de operación requerida, y el tiempo en el cual se debe contar con los datos. En Francia y Alemania se emplean pruebas de tratabilidad muy sencillas para determinar la demanda de ozono que frecuentemente se realizan en frascos de vidrio de 0.5 a 1.0 litros, en donde se adicionan el agua y una concentración conocida de

gas ozono, se mezclan y se observa los efectos (Légeron, 1978).

A partir de las pruebas de tratabilidad se define:

- La relación de la dosis necesaria para alcanzar una eficiencia prefijada en condiciones promedio y pico
- El punto de aplicación de ozono
- La dosis
- El consumo de ozono
- El tiempo de contacto

Punto de Aplicación de Ozono

Una decisión fundamental es determinar el mejor sitio para aplicar el ozono, ya sea al inicio, en la desinfección primaria para el control de subproductos (*trihalometanos*) o al final. En ambos casos el objetivo es la eliminación total de microorganismos.

Dosis de Ozono Requerido

Depende del objetivo del tratamiento y es el dato más importante para diseñar el generador de ozono y el sistema de contacto. En agua potable se recomienda mantener un residual de 0.4 de O_3 durante 4 minutos. En agua residual tratada es suficiente con mantener un residual de 0.1.

La demanda total de ozono (desinfección + oxidación de interferencias) depende de la calidad específica del agua y puede variar ampliamente con las estaciones del año y la temperatura.

Consumo de Ozono

La velocidad con la cual el ozono es consumido indica el tipo de reacciones que compiten, antes de satisfacer la demanda de ozono. El agua tiene que ser ozonada lo suficiente para satisfacer la demanda y permitir un residual (dosis). La velocidad de decremento comúnmente puede ser representada como una reacción con cinética de pseudo primer orden (Ecuación 6.5).

$$[O_3] = [O_{30}]e^{-k't} \quad \text{Ecuación 6.5}$$

donde:

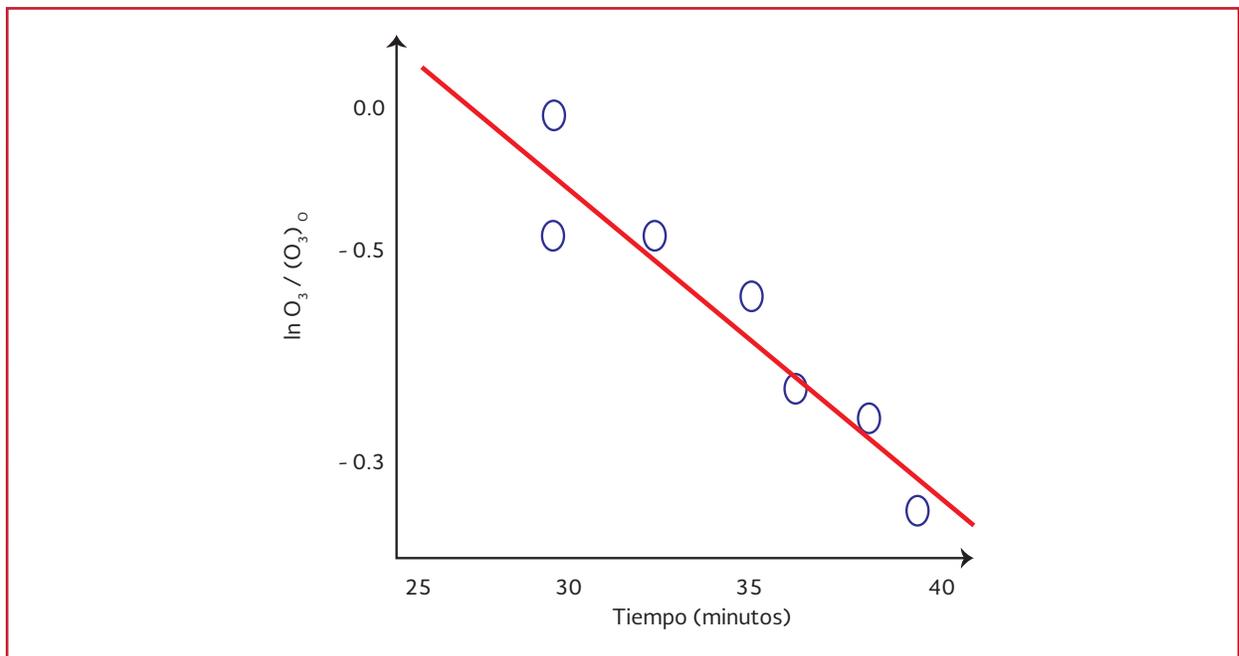
O_3 = Ozono residual en un tiempo, t , determinado

O_{30} = Ozono residual, en el tiempo cero

k' = Constante de velocidad, min^{-1}

La constante de velocidad, k' , es la pendiente de la relación lineal entre $\ln(O_3/O_{30})$ y el tiempo (Ilustración 6.11).

Ilustración 6.11 Representación de la velocidad de decremento de ozono



Tiempo de Contacto

En general, las reacciones con compuestos de fácil oxidación ocurren en menor tiempo que las de desinfección, consecuentemente, el tiempo de contacto está determinado por el último proceso y debe ser determinado para cada caso y no necesariamente es el mismo en diferentes reactores. La intensidad de mezclado, la hidrodinámica y la velocidad de transferencia asociados con un proceso pueden tener un efecto dramático. Como recapitulación, las consideraciones para el diseño de una prueba de tratabilidad se listan en la Tabla 6.15.

6.2.10.2 La eficiencia de transferencia de ozono

Se calcula a partir de la concentración de ozono en el gas de alimentación ($O_{3\text{ entrada}}$) y en el de salida ($O_{3\text{ salida}}$), como se muestra en las siguientes ecuaciones:

$$TE = \frac{O_{3\text{ Entrada}} - O_{3\text{ Salida}}}{O_{3\text{ Entrada}}} \times 100 \quad \text{Ecuación 6.6}$$

Con este dato se obtiene la masa transferida (TM)

$$TM = Te [O_{3\text{Entrada}}] V_f \quad \text{Ecuación 6.7}$$

la dosis en batch

$$Dosis(O_3)_{batch} = \frac{TM(T_{alimentac})}{V_r} \quad \text{Ecuación 6.8}$$

y en continuo

$$Dosis(O_3)_{continuo} = \frac{TM}{V_r} \quad \text{Ecuación 6.9}$$

dónde:

- TE = Eficiencia de transferencia, %
- TM = Masa transferida, mg O_3 /l
- $T_{alimentación}$ = Tiempo de alimentación
- $Dosis(O_3)_{batch}$ = Dosis de ozono para reactor tipo batch, mg /l

Tabla 6.15 Consideraciones para el diseño de pruebas de tratabilidad

Aspecto	Parámetros
Características de la prueba	<p>Evaluar los parámetros en diferentes estaciones del año. El mínimo de experimentación será de seis semanas para pruebas iniciales y de tres a cuatro semanas para pruebas subsecuentes durante otra estación del año</p> <p>La mayoría de las pruebas pueden ser conducidas en columnas de contacto de 0.1m de diámetro con flujos de 0.3 a 1.3 m³/h y una generación de ozono de 9.5 a 95 g O₃/h</p>
Datos a obtener	<p>Eficiencia de desinfección contra dosis de ozono transferido en función del tiempo de contacto, la concentración de ozono en el gas y el pH</p> <p>Ozono residual contra dosis transferida para varios tiempos de retención, tasas aplicadas y valores de pH</p> <p>Velocidad de consumo de ozono para un intervalo de dosis transferidas, a diferentes valores de pH</p> <p>Efecto de la aplicación del ozono sobre tratamientos posteriores (ejemplo: variación de dosis requerida de coagulante, generación de subproductos de desinfección)</p> <p>Características de contacto (ejemplo: t₁₀, t₅₀ y número de dispersión) para varios flujos y velocidades del gas de alimentación (estudio de trazado)</p> <p>Eficiencia de la ozonación (ejemplo: desinfección u oxidación) y conveniencia de diferentes localizaciones en el tren de tratamiento</p> <p>Consideraciones especiales de la cámara de contacto (ejemplo: disolución por burbuja fina o por turbinas (tamaño de burbujas))</p>
Personal	<p>Al menos un operador de tiempo completo para seguimiento. Algunas pueden llevarse a cabo con equipos automatizados</p> <p>Dos operadores durante el arranque y períodos de intensos de prueba</p> <p>Un técnico laboratorista para analizar parámetros específicos</p>

$Dosis (O_3)$ <i>continuo</i>	= Dosis para reactor tipo continuo,
$O_{3\text{ entrada}}$	= Concentración de ozono en el gas de alimentación a reactor
$O_{3\text{ salida}}$	= Concentración de ozono en el gas de salida
Vr	= Volumen del reactor, l
Vf	= Velocidad de flujo de gas, L/min

La demanda de ozono se determina y expresa de diferentes maneras. El método más simple consiste en graficar el ozono residual en el agua contra las dosis de ozono transferido; de esta manera la demanda es la diferencia entre la concentración transferida y la residual. Valor que para cada tipo de agua depende del tiempo de contacto y el tipo de difusor. Estas curvas pueden ser usadas para asignar los requerimientos de desinfección. Para cualquier otra aplicación de ozono, como el abatimiento del color, se generan gráficas semejantes.

6.2.11 CONTROL Y MEDIDAS DE SEGURIDAD EN LAS INSTALACIONES DE OZONO

Al trabajar con sistemas de dosificación de ozono los equipos deben estar protegidos con elementos de seguridad y se debe cuidar que el personal tenga una correcta protección que permita estar preparado en caso de alguna fuga. En la Tabla 6.16 y Tabla 6.17 se muestran los aspectos que deben ser tomados en cuenta.

6.2.11.1 Ejemplo del diseño de una cámara de contacto para desinfección

A continuación se presenta el diseño de una cámara para desinfección primaria y secundaria con cuatro etapas para remover Giardia (en todas las fases de desarrollo incluyendo quistes), este patógeno fue seleccionado por ser considerado actualmente por la EPA como un criterio para asegurar la desinfección al aplicar ozono. Lo anterior es equivalente al criterio francés de mantener durante 4 minutos un residual de ozono de 0.4 en la última cámara de contacto.

Datos:

Gasto	= 650 m ³ /h
Patógeno	= Giardia en todas sus fases del desarrollo incluyendo quistes
Temperatura	= 20 °C
pH	= en el intervalo de 6 a 9

Los demás parámetros de calidad de agua se encuentran dentro de las concentraciones establecidas por la Modificación año 2000, a la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994, "Salud ambiental. Agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización".

Solución

En la desinfección con ozono, el factor limitante es la velocidad de inactivación de microorganismos y no la transferencia de masa (como es el caso de la oxidación química), por lo que es necesario aproxi-

Tabla 6.16 Aspectos de seguridad en las instalaciones de dosificación de ozono

Consideraciones	Descripción
Materiales de construcción	Naturaleza del material Corrosividad Sistemas de gas Recubrimientos Condiciones de presión o vacío
Medidas de seguridad	Ventilación del sitio Protección contra incendios Prevención de percances eléctricos Protección contra riesgos de explosión (ejemplo: alimentación con oxígeno) Protección ante presión o vacío excesivo Destructor del gas en el punto de descarga Sistemas de seguridad y control en el cuarto del generador Medidas de seguridad para los sistemas de monitoreo y contacto del gas Mecanismos de control y manejo de los gases de salida para proteger al personal Tratamiento del gas de salida Control de la explosividad del sistema Presencia de gases diferentes al ozono, oxígeno y nitrógeno (ejemplo: gases venenosos de la catálisis) Potencial de inundación por agua Materiales de construcción adecuados

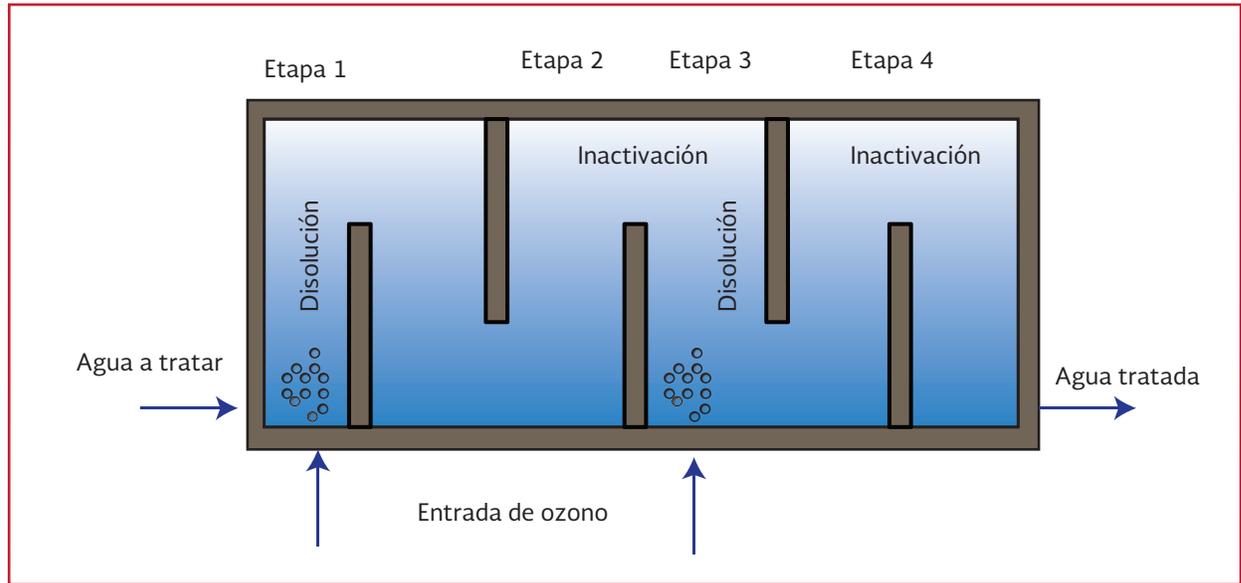
Tabla 6.17 Aspectos de control

Sistema de control	Descripción
De la presión de gas	Medidores del flujo de gas (equipo, unidades y precisión) Monitoreo de la concentración de ozono (en la entrada y salida del gas, así como el residual en el agua) Puntos de muestreo y manual para control Posibilidad de operación manual en todas las instancias
De la salida del gas y de control	Sistemas de monitoreo para controlar la concentración de ozono a la salida del gas Grado de automatización del sistema removedor de gas residual Control de temperatura y presión del gas de salida del sistema
Alarmas de procesos, control y automatización	Alarmas ambientales de ozono Alarmas para la protección del equipo (temperatura, presión y punto de rocío; equipos de seguridad eléctricos) Posibilidad de operación manual (para monitoreo y control) del ozono ambiental Puntos de muestreo Tipo y grado de automatización

mar el comportamiento del flujo de la cámara de contacto a un reactor tipo pistón para asegurar un tiempo de contacto adecuado. En la práctica ello implica que debe haber por lo menos dos etapas de disolución de ozono y otras dos para la reacción del mismo. Lo anterior se denomina cámara o reactor con cuatro etapas (Ilustración 6.12).

Con el objeto de mantener condiciones hidrodinámicas adecuadas se recomienda mantener una relación de 0.15 a 0.20 del gasto de alimentación de ozono con respecto al gasto del agua, en condiciones normales de presión y temperatura (Langlais et al., 1991), esto es:

Ilustración 6.12 Cámara de desinfección de cuatro etapas



$$\frac{Q_{GO_3}}{Q_{LH_2O}} = \text{de } 0.15 \text{ a } 0.20 \quad \text{Ecuación 6.10}$$

dónde:

Q_{GO_3} = Flujo de gas ozonado, m³/h

Q_{LH_2O} = Flujo de agua a tratar, m³/h

Primera etapa

Esta se calcula para satisfacer la demanda inicial de ozono y para que el residual actúe como desinfectante en la etapa siguiente. Dicho residual se puede fijar de dos maneras:

- A partir de la literatura
- A partir de la gráfica de dosis aplicada contra la concentración de ozono residual, obtenida mediante una prueba de tratabilidad

En este ejemplo, el valor residual se obtuvo de los datos proporcionados por la EPA quien esta-

blece que se requiere de 0.3 de ozono para inactivar 3 log de *Giardia*.

Posteriormente, a partir de la Tabla 6.18 se obtiene el producto de la ley de Chick *Ct* para 3 unidades log a 20° C. Donde *C* es la concentración residual del desinfectante expresado en e igual a 0.3 y *t* el tiempo de contacto expresado en minutos. Otra opción para obtener este valor es a partir de las gráficas del ozono aplicado para un tiempo de contacto específico contra la relación de sobrevivencia de *Giardia* ($\log N/N_0$), donde *N* es el número de organismos al tiempo *t* y *N*₀ es el número inicial de organismos, obtenidas en el laboratorio.

Procedimiento

Así el valor obtenido para *Ct* es de 0.72, con el cual se despeja el tiempo de contacto o de retención hidráulica ($t = TRH$).

Tabla 6.18 Valores de C*t propuestos por la EPA para la inactivación del quiste Giardia con ozono a diferentes valores de temperatura y un intervalo de pH entre 6 y 9 (EPA, 1989)

Inactivación unidades log	Temperatura (° C)					
	0.5	5	10	15	20	25
0.5	0.48	0.32	0.23	0.16	0.12	0.08
1	0.97	0.63	0.48	0.32	0.24	0.16
1.5	1.50	0.95	0.72	0.48	0.36	0.24
2	1.90	1.30	0.95	0.63	0.48	0.32
2.5	2.40	1.60	1.20	0.79	0.60	0.40
3	2.90	1.90	1.40	0.95	0.72	0.46

$$C(TRH) = 0.72 \quad \text{Ecuación 6.11}$$

Dónde:

$$TRH = \frac{0.72 \frac{mg}{l} min}{0.3 \frac{mg}{l}} = 2.4 min$$

Ecuación 6.12

Puesto que el tiempo de retención hidráulica es afectado por cortos circuitos, se debe obtener el valor de t10 mediante estudios de trazado. Si no se cuenta con este valor experimental entonces el TRH se estima multiplicando por 0.5 para disminuir los cortos circuitos que se aplica para el caso de cámaras de contacto por etapas con mezclado cuando se adiciona ozono.

$$TRH_{\text{corregido}} = 0.5(TRH) = 0.5(2.4 min) = 1.2 min$$

Ecuación 6.13

Con el TRH corregido se calcula el volumen de la primera cámara de contacto con la ecuación:

$$V = Q(TRH) \quad \text{Ecuación 6.14}$$

Por lo tanto se dimensiona la cámara de la siguiente manera:

$$V = A L H = S H \quad \text{Ecuación 6.15}$$

Dónde:

- V = Volumen de la cámara de contacto, (m³)
- A = Ancho de la cámara de contacto, (m)
- L = largo de la cámara de contacto, (m)
- H = Altura de la cámara de contacto, (m), generalmente entre 4 y 7 m
- S = Área de la cámara de contacto que resulta del producto del ancho y largo, (m²)

Para una altura de 4 m el área es de 3.2 m² y tomando como criterio el que el largo sea 1.5 veces el ancho se obtiene que:

$$S = 1.5A A \quad \text{Ecuación 6.16}$$

$$A = \sqrt{\frac{3.2 m^2}{1.5 m}} = 1.417 m \quad \text{Ecuación 6.17}$$

Entonces el largo L del tanque será:

$$L = \frac{V}{AH} = \frac{13 m^3}{1.417 m(4m)} = 2.20 m$$

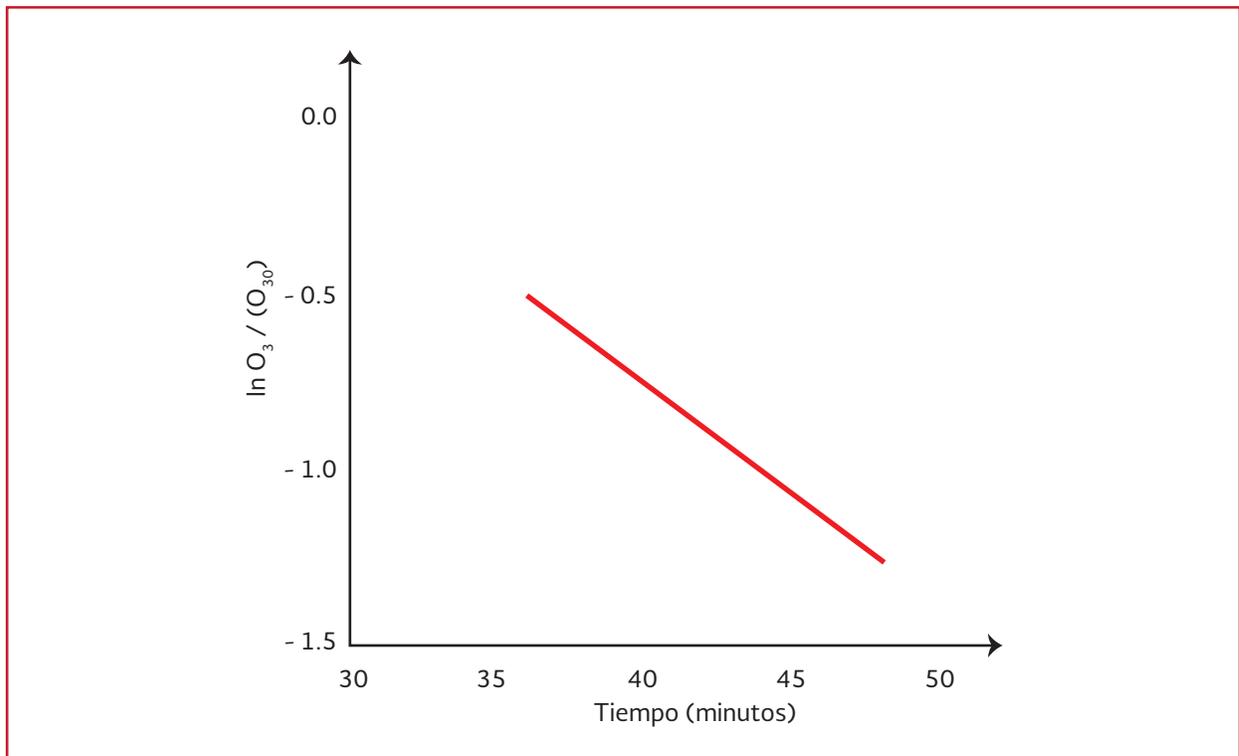
Ecuación 6.18

Cálculo de la segunda etapa

En ésta se lleva a cabo la inactivación de los quistes de Giardia con el residual fijado a la salida de la primera etapa (0.3), por lo tanto no hay adición

de ozono. Es indispensable realizar la prueba de tratabilidad para obtener el valor de la constante k' que representa la tasa de consumo de ozono del agua a tratar. Esto se hizo y de la Ilustración 6.13, k' resulta igual a 0.06 min^{-1} .

Ilustración 6.13 Representación del $\ln(O_3/O_{30})$ contra el tiempo, para obtener el coeficiente k'



dónde:

O_3 = Concentración de ozono al tiempo t

O_{30} = Concentración inicial de ozono

k' = Tasa de consumo de ozono, (min^{-1})

A partir de esta etapa hasta la cuarta, el tiempo de retención hidráulica se obtiene por iteración hasta seleccionar la opción más conveniente.

Como en esta etapa no se adiciona ozono se multiplica el tiempo de retención hidráulica por un factor de 0.4 para disminuir la formación de cortos circuitos. Comúnmente, el valor de Ct se determinará por medio de la Ecuación 6.19.

$$Ct = TRHt_{10} \frac{C_0}{k' t} (1 - e^{-k't}) \quad \text{Ecuación 6.19}$$

$$Ct = 2 \text{ min} (0.4) \frac{0.3 \frac{\text{mg}}{\text{l}}}{0.06 \text{ min}^{-1} (2 \text{ min})} (1 - e^{-0.06 * 2}) = 0.226 \frac{\text{mg}}{\text{l}} \text{ min}$$

El valor requerido de Ct será entonces la diferencia entre el valor de Ct fijado en la etapa 1 y el valor obtenido en la etapa 2:

$$Ct_{requerido} = 0.72 \frac{mg}{l} min - 0.226 \frac{mg}{l} min = 0.494 \frac{mg}{l} min$$

La concentración de ozono que abandona la etapa 2 se calcula con la Ecuación 6.20.

$$[C] = C_n e^{-kt} \quad \text{Ecuación 6.20}$$

$$[C] = 0.3e^{-0.06 \cdot 2} = 0.266 \frac{mg}{l}$$

Para obtener las dimensiones de la segunda etapa se procede de igual manera que en la etapa 1, fijando la altura de 4 m se obtiene:

$$\begin{aligned} V &= 8.66 \text{ m}^3 & S &= 2.166 \text{ m}^2 \\ A &= 1.2 \text{ m} & L &= 1.78 \text{ m} \end{aligned}$$

Cálculo de la tercera etapa

En esta etapa la adición de ozono es con mezclado. El valor de t_{10} es de 0.5 TRH y también se

$$Ct_{requerido} = 0.494 \frac{mg}{l} min - 0.150 \frac{mg}{l} min = 0.344 \frac{mg}{l} min$$

$$Ct_{requerido} = 0.494 \frac{mg}{l} min - 0.150 \frac{mg}{l} min = 0.344 \frac{mg}{l} min$$

Para obtener las dimensiones de la tercera etapa se procede de igual manera que en las etapas anteriores fijando la altura de 4 m y se obtiene:

$$\begin{aligned} V &= 10.83 \text{ m}^3 & S &= 2.70 \text{ m}^2 \\ A &= 1.34 \text{ m} & L &= 2.02 \text{ m} \end{aligned}$$

En esta etapa se debe de mantener un valor de Ct de 0.344 *min y el residual de ozono debe

fija un residual de 0.3. Para esto se supone que la concentración promedio del ozono en la etapa tres es la mitad de la concentración de ozono residual que sale de la cámara. Esta etapa es utilizada para restablecer el ozono residual, el cual se calcula con:

$$Ct = TRH(F)(C_0) \quad \text{Ecuación 6.21}$$

dónde:

- TRH= Tiempo de retención hidráulica teórico
- F = Factor de corrección para evitar los cortos circuitos
- C_0 = Concentración inicial de ozono para la tercera etapa y el residual de la segunda

$$Ct = 2 \text{ min}(0.5) \frac{0.3 \frac{mg}{l}}{2} = 0.15 \frac{mg}{l} min$$

Ecuación 6.22

El valor de Ct requerido es la diferencia entre los valores de Ct obtenidos en las etapas dos y tres:

ser de 0.3 . Es necesario calcular el TRH con la Ecuación 6.19:

$$t = -\frac{1}{k'} \ln \left(1 - \frac{k' Ct}{F C C_0} \right) \quad \text{Ecuación 6.23}$$

$$t = -\frac{1}{0.06} \ln \left(1 - \frac{0.06(0.344)}{0.4(0.3)} \right) = 3.14 \text{ min}$$

El valor de la constante k' es el obtenido para el consumo de ozono y el factor de corrección

puesto que no hay mezclado se considera un valor de 0.4.

Con la Ecuación 6.24 se verifica que el valor obtenido del tiempo de retención sea el correcto, para esto el valor de Ct debe ser igual a 0.344:

$$Ct = TRH(FC) \left(\frac{C_0(1 - e^{-k't})}{k't} \right)$$

Ecuación 6.24

$$Ct = 3.14(0.4) \left(\frac{0.3(1 - e^{-0.06(3.14)})}{0.06(3.14)} \right) = 0.344 \frac{mg}{l} min$$

Si el ozono se aplica para desinfectar al inicio del tren de tratamiento y se busca también un efecto benéfico sobre procesos subsecuentes, entonces el tiempo de retención de esta etapa debe ser suficiente para que el ozono sea aprovechado eficazmente antes de que el agua abandone la cámara de contacto. Para un residual a la salida menor de 0.1, el tiempo de retención se calcula con:

$$t = -\frac{1}{k} \ln \frac{C}{C_0} \quad \text{Ecuación 6.25}$$

Tabla 6.19 Características y dimensiones de la cámara de desinfección primaria

Dimensiones	Etapa 1	Etapa 2	Etapa 3	Etapa 4
Altura H, (m)	4.00	4.00	4.00	4.00
Ancho A, (m)	1.42	1.20	1.34	5.74
Largo L(m)	2.20	1.78	2.02	8.62
Volumen (m ³)	13	8.66	10.83	198.25
Características	Inactivación de quistes de Giardia: 99.9 % Constante de velocidad $k' = 0.06 \text{ min}^{-1}$ Flujo de agua a tratar = 650 m ³ /h			

Tabla 6.20 Características y dimensiones de la cámara de desinfección secundaria para un residual de 0.4 en la cuarta etapa

Dimensiones	Etapa 1	Etapa 2	Etapa 3	Etapa 4
Altura H, (m)	4.00	4.00	4.00	4.00
Ancho A, (m)	1.417	1.20	1.34	2.08
Largo L(m)	2.20	1.78	2.02	3.12
Volumen (m ³)	13	8.66	10.83	26
Características	Inactivación de quistes de Giardia: 99.9 % Constante de velocidad $k' = 0.06 \text{ min}^{-1}$ Flujo de agua a tratar = 650 m ³ /h			

$$t = -\frac{1}{0.06} \ln \frac{0.1}{0.3} = 18.3 \text{ min}$$

De igual forma que en las etapas anteriores se obtienen las dimensiones de la cuarta etapa:

$$V = 198.25 \text{ m}^3 \quad S = 49.56 \text{ m}^2$$

$$A = 5.74 \text{ m} \quad L = 8.62 \text{ m}$$

Finalmente, la cámara de desinfección queda dimensionada con las características de Tabla 6.19.

Si la desinfección está al final del tren de tratamiento, la cuarta etapa cambia y tiene dimensiones considerablemente menores ya que se debe mantener un residual de ozono de 0.4 (o el que se fije) durante 4 minutos. En este caso se usan las mismas ecuaciones y se obtiene la Tabla 6.20.

Cabe señalar que para la oxidación química el procedimiento de diseño es diferente ya que el factor limitante es la transferencia de masa.



CONCLUSIONES DEL LIBRO

El agua para consumo humano puede estar contaminada por diversos microorganismos parásitos patógenos de origen fecal (bacterias, protozoarios, helmintos y virus), que, incapaces de vivir de forma independiente, permanecen asociados a un huésped, del cual obtienen las condiciones adecuadas para su supervivencia (espacio, alimento y protección). Como consecuencia ocasionan una serie de enfermedades infecciosas principalmente del tracto gastrointestinal, que en la actualidad constituyen uno de los mayores problemas de salud pública, sobre todo, en la población infantil y preescolar de los países en desarrollo.

Llevar a cabo la desinfección del agua es muy importante así como la elección del tipo de proceso, la cual se hará con base en los costos, la eficiencia y posible automatización. La desinfección es el mecanismo esencial para proteger a los seres humanos de la posible exposición a focos infecciosos por este medio.

Con el presente documento se dan a los Organismos Operadores las recomendaciones para diseñar y seleccionar los componentes de un sistema de desinfección, que permitan disminuir los riesgos asociados a los microorganismos presentes en el agua.

Se han recopilado el material y las normas actualizadas, tanto nacionales como extranjeras, que rigen en la materia y que se consideran útiles para el diseño de estos sistemas, procurando reunirlos en una sola publicación, dando las recomendaciones que se consideran pertinentes para lograr un buen diseño; asimismo se incluyen tablas e ilustraciones como apoyo visual de diseño al proyectista. Además, se incluyen las referencias de la literatura consultada y que puede resultar de ayuda al usuario para lograr una mayor profundidad en algún tema en específico al aplicar sus conocimientos.

Recuerde que los procedimientos, datos y modelos matemáticos, presentados en este libro, obedecen a la experiencia vertida a lo largo

del tiempo por parte de los especialistas en la materia y de los proyectos en que se han trabajado. Sin embargo, en ningún caso debe considerarse esta información como reglamento o norma oficial, más bien debe ser considerada como una guía para el proceso de diseño de redes de distribución de agua potable.

A

METODOLOGÍA PARA PREPARACIÓN DE SOLUCIONES DE HIPOCLORITO

Cuando se trata de productos de cloro que se comercializan en forma de sólidos o se encuentran en concentraciones que no se adaptan a los requerimientos necesarios, se debe proceder a su disolución, de acuerdo con el mecanismo de dosificación del equipo que se va a emplear.

Las fórmulas que rigen la cantidad de agua de disolución requerida para obtener una solución de hipoclorito con una concentración de cloro activo que permita su fácil manejo y control por el dosificador, se presentan en la Tabla A.1.

Se debe recordar que la capacidad de los tanques de disolución (dos como mínimo) debe corres-

ponder a un período de 24 horas de tal manera que facilite su operación. Asimismo, se debe asegurar la completa disolución del producto en el agua. El empleo de un agitador eléctrico puede facilitar tal tarea. Por otro lado, es común encontrar partículas o impurezas por lo que el dosificador deberá contar con un filtro que las retenga para evitar su obstrucción. Asimismo, la alcalinidad del hipoclorito de sodio concentrado precipita la dureza del agua de dilución, lo cual también puede producir incrustaciones en los dosificadores y tuberías. Por ello se recomienda preparar la solución con 24 horas de anticipación, de tal manera que los precipitados tengan tiempo de sedimentar (Solsona y Méndez, 2002).

Tabla A.1 Formulas para la obtención de hipoclorito

A partir de:	Hipoclorito de sodio	Hipoclorito de calcio
Descripción	Es comercializado en forma líquida en concentraciones variables de cloro activo. La presentación más común es de 10%	Es comercializado en forma de sólido. El contenido de cloro activo es variable según su presentación. Siendo una de las más comunes la de 60%.
Agua de disolución requerida	<p>Definida la concentración final de cloro (Cf) a ser empleada por el dosificador, se aplica la siguiente ecuación para obtener el volumen del agua de disolución (Vd) que será agregada a la solución matriz</p> $Vd = (Co \cdot Vo / Cf) - Vo$ <p>Donde Co = Concentración inicial de la solución matriz (g/L) Vo = Volumen de la solución matriz (L) Cf = Concentración esperada de la solución diluida (g/L)</p>	<p>Definida la concentración final de cloro (Cf) a ser empleada por el dosificador, se aplica la siguiente ecuación para obtener el volumen del agua de disolución (Vd) que será agregada a la masa de hipoclorito de calcio sólido.</p> $Vd = \% \cdot P / Cf$ <p>Donde % = Porcentaje de cloro activo en el producto P = Peso del sólido de hipoclorito de calcio (Kg) Cf = Concentración esperada de la solución diluida (g/L)</p>
Ejemplo	<p>Se tienen 40 litros de una solución de hipoclorito de sodio al 10% (0.1) y se quiere preparar con ella otra solución de concentración 2% (0.02), ¿cuánta agua se debe agregar?</p> $Vd = (0.1 \times 40 / 0.02) - 40 = 160 \text{ L}$	<p>Si se dispone de 1.2 Kg de hipoclorito de calcio concentrado, 60% (0.6) y se desea obtener una solución para dosificar de concentración de 2% (0.02), ¿cuánta agua se debe usar?</p> $Vd = (0.6 \times 1.2 / 0.02) = 36 \text{ L}$

B

CLASIFICACIÓN DE LAS LÁMPARAS DE MERCURIO

Debido a que la presión dentro de una lámpara afecta la distribución espectral, es posible producir lámparas que emitan prácticamente toda su energía en una longitud de onda deseada (Tabla B.1).

Las lámparas de mercurio se clasifican con base en la presión del gas a la que trabajan como se muestra en la Tabla B.2, siendo las de baja presión las que emiten más radiación en la región ultravioleta, principalmente a 254 nm. Actualmente, se hace énfasis especial en el desarrollo de fuentes alternas de luz ultravioleta, sobre todo de aquellas con mayor intensidad: como son las lámparas de baja presión con alta intensidad y las de presión media. Estas mejoras se reflejan en una reducción del número de lámparas empleadas.

1.1.1.1 Lámparas de baja presión

Hoy en día, el principal método de generación empleado en la desinfección de agua es el de la lámpara de mercurio de baja presión (9.5×10^{-6} kg/cm²). En éstas la intensidad es de 0.18 W de luz UV por centímetro de longitud de arco que es la distancia entre los electrodos de la lámpara, lo que produce una intensidad estándar (a 254 nm) de 13.8 y 26.7 W para las lámparas de 0.9 y 1.6 m, respectivamente (WEF, 1996).

La vida de estas lámparas se estima en 7 500 horas, aunque los modelos recientes llegan a 13 000. Operan a temperaturas entre 40° y 60° C y su eficiencia disminuye a bajas temperaturas (10°-20° C) (Gehr, 1996). Las ventajas de las lámparas de baja presión son:

Tabla B.1 Distribución espectral relativa de radiadores ultravioleta

Tipo	Presión	Debajo de 254nm	254 nm	254-300 nm	300-334 nm	365 nm	Luz visible
T/M5/369	Baja	---	185	0.55	1.26	1.0	4.46
UA27A2 350V; 4 A	Baja	0.122	0.316	0.75	1.06	1.00	2.39
A.C. 150 W	Baja	0.123	0.313	0.79	1.10	1.00	2.35
H-5 250 W	0.4 atm	---	---	---	---	1.00	4.41
UA27A2; 220V;3.75 A	1.04 atm	0.475	0.332	0.91	1.08	1.00	2.44
A.C. 250 V 3.5 A	Alta	0.111	0.281	0.63	1.09	1.00	2.56
D.C. 230 V 3.5 A	Alta	0.094	0.348	0.83	1.04	1.00	2.48
AC Uviarc 600W; 183 V 3.92 A	---	0.338	0.348	0.92	1.07	1.00	2.61
UV 1 Lámpara de sol	---	---	---	0.24	0.99	1.00	

Tabla B.2 Clasificación de las lámparas de mercurio

Tipo de lámpara	Presión de trabajo (kg/cm ²)
Presión baja	9.5 x 10 ⁻⁶
Presión media	0.13-13.4

- Emitir el 85 por ciento de luz monocromática (Ilustración B.1) con una longitud de onda de 254 nm (Metcalf & Eddy, 1996)
- Tener eficiencia germicida de cinco a diez veces mayor que las de alta presión (Cheremisinoff & Cheremisinoff, 1993)

Características físicas

Existen dos longitudes estándar de lámparas de baja presión: 0.9 m (con 0.7 m de longitud de arco) y 1.6 m (con 1.5 m de longitud de arco). La introducción de balastros electrónicos para manejarlas es una gran mejora, pues anteriormente eran electromagnéticas, muy ineficientes, susceptibles al sobrecalentamiento y no permitían un paso controlado de la energía. Las electrónicas, en cambio, son sólidas, más ligeras, compactas, energéticamente eficientes y permiten controlar el paso de la energía (WEF, 1996).

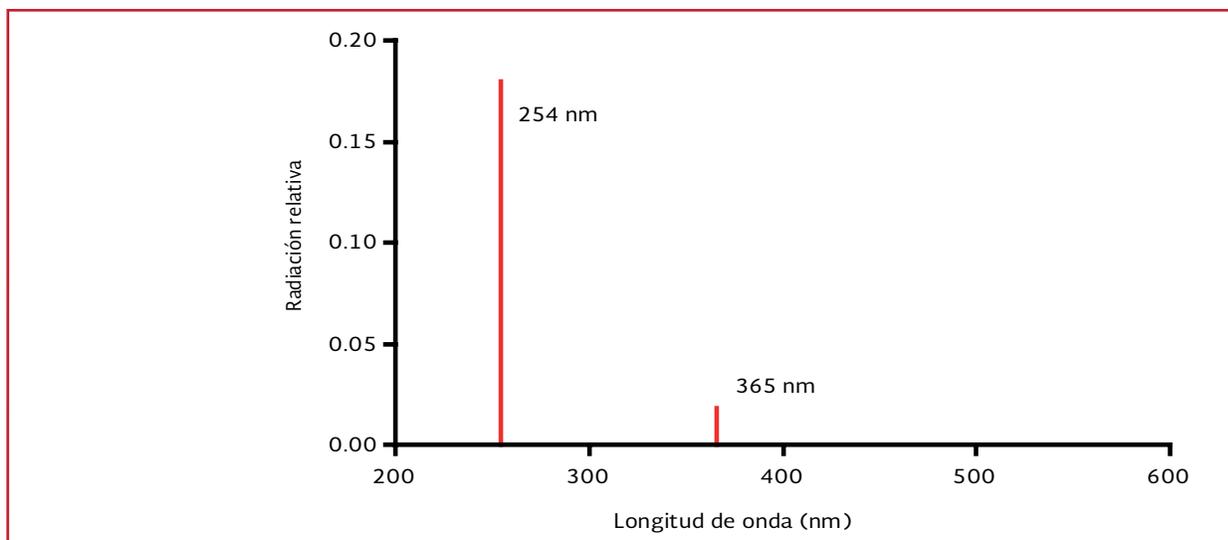
1.1.1.2 Lámparas de baja presión y alta intensidad

Este tipo de lámparas usa una corriente de descarga que permite operar a una presión del orden de 9.5 x 10⁻⁶ kg/cm² y a temperaturas de entre 180° y 200° C, que es de cuatro a cinco veces más grande que la de las lámparas de baja presión. La alta intensidad es producida por el empleo de corrientes de 5 amperes, que son 10 o 15 veces más grande que las de las lámparas de baja presión.

1.1.1.3 Lámparas de presión media

Las lámparas de presión media emplean el mismo principio que las de baja presión. La diferencia principal radica en que la emisión del vapor de mercurio se realiza a mayor presión y temperatura. Operan entre 0.13 kg/cm² y 13.4 kg/cm², y de 600° a 800° C. Debido a esto, y a diferencia de las lámparas de baja presión, la tempe-

Ilustración B.1 Radiación emitida por una lámpara de UV de baja presión



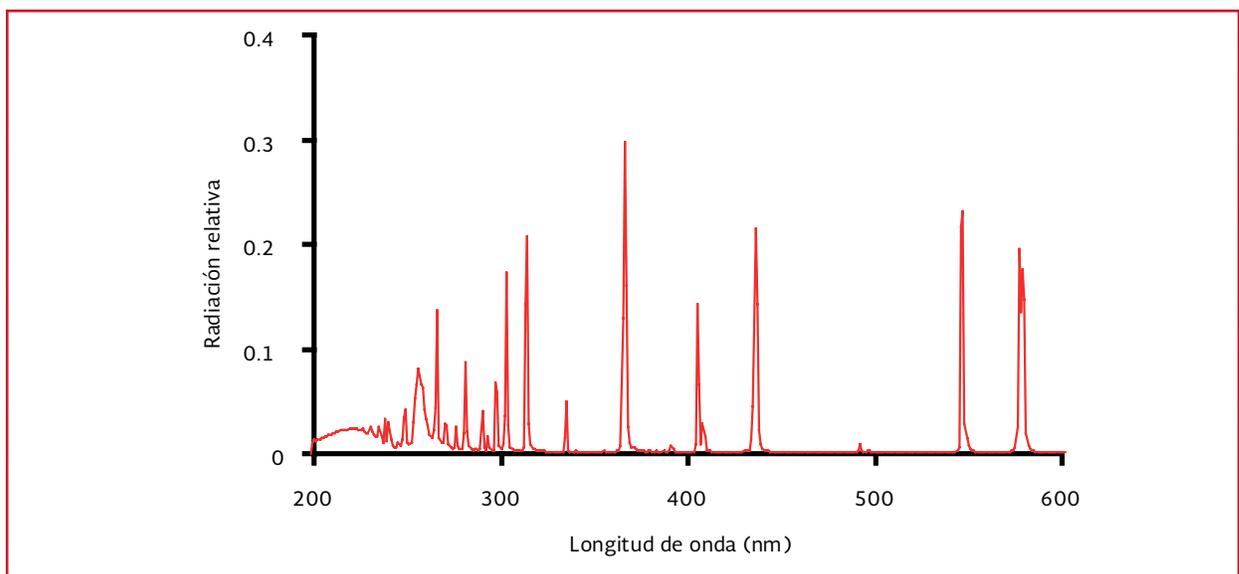
ratura del agua residual no tiene impacto en la temperatura de operación. Las diferencias físicas incluyen la presencia de un alambre de molibdeno que conecta los electrodos, conexiones externas, un recubrimiento y un reflector resistente al calor. El recubrimiento se encuentra en el exterior y es usado para mantener la temperatura y evitar que el mercurio se condense. Así, a diferencia de las lámparas de baja presión en las que se evapora sólo parte del mercurio, en las de presión media se evapora la totalidad. La presión se mantiene constante por la cantidad de mercurio contenido en la lámpara. La radiación ultravioleta de una lámpara de presión media es de 50 a 80 veces más grande que las de baja presión (de 9 a 14.4 W por centímetro de longitud de arco). Sin embargo, es una radiación policromática (Ilustración B.2) que varía desde el valor más bajo de acción germicida (200 nm) hasta el de la luz visible (aproximadamente 700 nm). Así, de la energía aplicada, el 30 a 40 por ciento es convertida en radiación (como ocurre en las lámparas de baja presión), pero solamente el 25 por ciento de ella es de acción germicida. El

efecto resultante es que de la energía de entrada sólo se transforma a radiación desinfectante del 5 a 7 por ciento en comparación con un 30 a 35 por ciento que ocurre en las lámparas de baja presión.

La longitud de las lámparas de presión media es de 1.6 m con longitud de arco de 1.5 m. Tienen una vida garantizada de 5 000 horas, aunque la experiencia demuestra que funcionan hasta 8 000 horas. La vida real depende de la energía con que se operen. Una energía muy alta resulta en mayores temperaturas y una menor duración.

La experiencia con lámparas de presión media es muy limitada. Tan sólo el 0.1 por ciento de las plantas de tratamiento en operación o construcción utilizan este tipo de sistema. Debido a su escaso mercado, estas lámparas son mucho más caras y su disponibilidad es limitada, siendo posible adquirirlas únicamente en forma directa de los fabricantes. Sin embargo su demanda está creciendo.

Ilustración B.2 Radiación relativa de una lámpara de presión media



1.1.1.4 Factores que afectan la intensidad de las lámparas

Tiempo de operación

La intensidad de la emisión de una lámpara de mercurio es función del tiempo. En general, las lámparas empiezan con una radiación muy alta que disminuye en forma muy lenta durante las primeras 1 000 a 2 000 horas de operación, sigue entonces un declive gradualmente mayor hasta el punto de falla (Ilustración B.3). La vida de operación para una lámpara de mercurio varía de 5 000 a 8 000 horas como se muestra en la Tabla B.3; sin embargo, algunas son operadas hasta por más tiempo (10 000 horas).

Temperatura

La eficiencia de las lámparas depende de la temperatura. La máxima emisión se presenta cuando es de 40° C en la superficie. Fluctuaciones en la temperatura causan una disminución de hasta el 40 por ciento (Ilustración B.4). Es por esto, que se recomienda usar una camisa de cuarzo

como aislante, la cual además protege las lámparas de roturas.

El control de la variación de temperatura se logra por el espesor de la camisa (espacio entre la pared de cuarzo y la de la lámpara), la temperatura del líquido y la energía con que se opera. Cuando la temperatura del líquido oscila entre 15° y 25° C, la lámpara se encuentra cerca de las condiciones óptimas (85 por ciento de la radiación máxima) pero la intensidad disminuye significativamente por arriba o debajo de este intervalo.

La temperatura de operación es afectada por la energía suministrada por las balastras. A temperatura constante del líquido, altas corrientes aumentan la temperatura y viceversa. En consecuencia, el impacto de la temperatura del líquido puede ser contrarrestado al variar la corriente en la balastra, para así mantener la radiación cerca del óptimo.

Existe una gran diversidad de balastras por lo que es posible diseñar la aplicación de UV para intervalos de temperaturas de operación del

Ilustración B.3 Intensidad de una lámpara de baja presión en función del tiempo

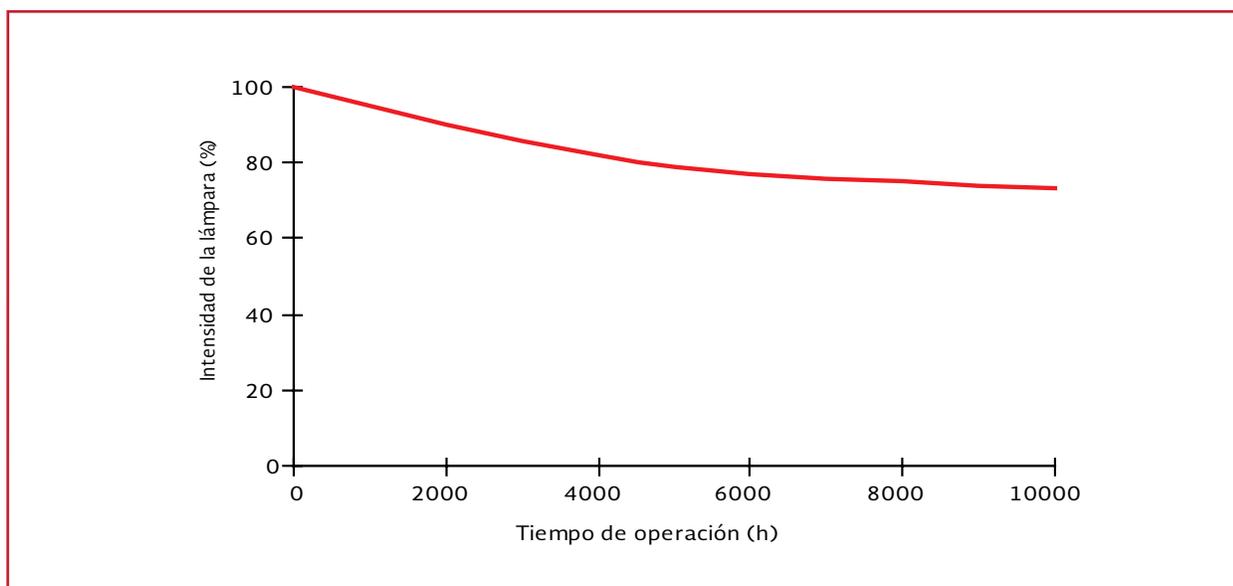


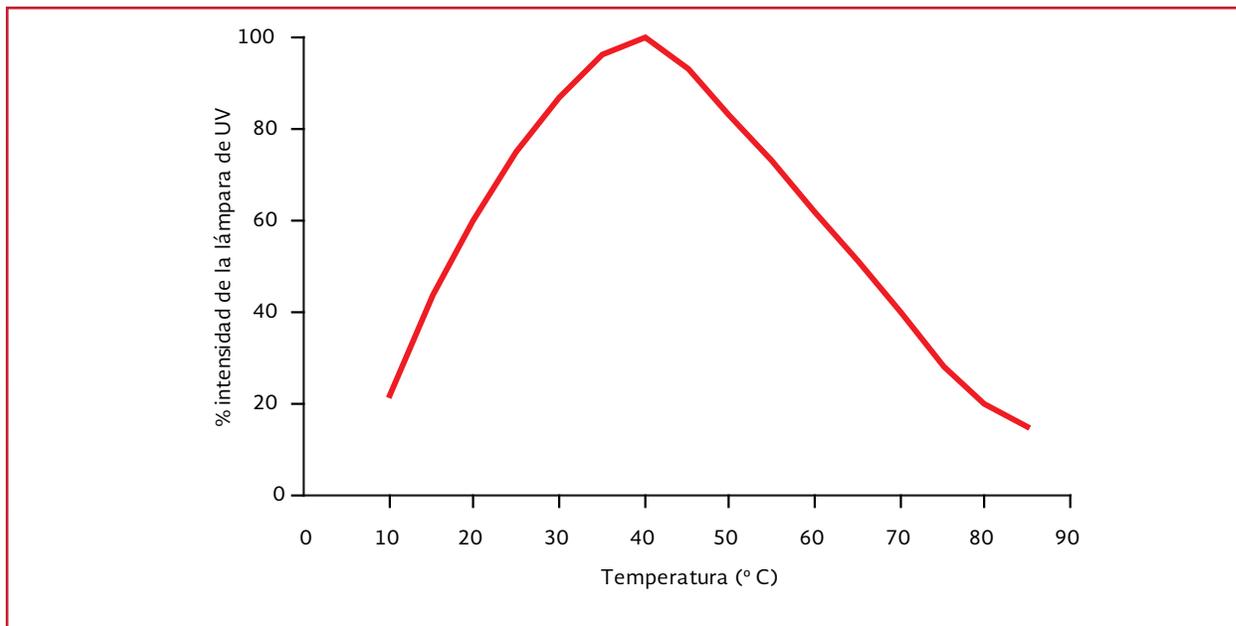
Tabla B.3 Características de los diferentes tipos de lámparas

Tipo de lámpara	Baja presión	Baja presión y alta intensidad	Presión media
Característica particular	Lámpara de vapor de mercurio	Lámpara de mercurio combinado con indio para reducir la presión de vapor	Lámpara de vapor de mercurio
Temperatura de operación (° C)	40	180 a 200	600 a 800
Presión de vapor óptima para la producción de radiación más eficiente (kg/cm ²)	9.3×10^{-6}	9.3×10^{-6}	0.13 – 13.4
Tipo de radiación	Luz monocromática con 90% de longitud de onda de 254nm.	Luz monocromática con 90% de longitud de onda de 254nm.	Luz policromática
Radiación UVC (200 a 280nm) en W/cm de longitud de arco	0.2	0.5	10
Vida media (h)	De 5 000 a 8 000	N.R.	5 000 8 000

líquido muy amplios. Así, en plantas de tratamiento de clima cálido, las consideraciones de diseño deben incluir el espesor de la camisa de

cuarzo y el tipo de balastra que mantendrán la radiación óptima para una temperatura del líquido de 20° a 30° C.

Ilustración B.4 Variación de la intensidad en función de la temperatura





BIBLIOGRAFÍA

- (NOM-001-SEMARNAT-1996, N. O. (enero 6, 1997). "Límites Máximos Permisibles de Contaminantes en las Descargas Residuales y Bienes Nacionales". Diario Oficial de la Federación, pp 67-81.
- (NOM-127-SSA1-1994), N. O. (noviembre 30,1995). "Salud Ambiental, Agua para Uso y Consumo Humano- Límites Permisibles de Calidad y Tratamientos a que Debe Someterse el Agua para su Potabilización". Diario Oficial de la Federación.
- A., B. (1999). "Ozone Technology of German Industrial Enterprises". *Ozone Science and Engineering*. 21(2): 163-176.
- Acher A., E. F. (1997). "Ecologically Friendly Wastewater Disinfection Techniques". *Water Research* 31(6): 1398-1404.
- Acra A., Raffoul Z. and Karahagopian Y. (1984). Solar disinfection of drinking water and oral rehydration solutions. Guidelines for household application in developing countries. New York: UNICEF.
- Aguilar P. (2006). "La plata como desinfectante de lodos provenientes del tratamiento de aguas residuales domésticas mediante un proceso de coagulación-floculación". Tesis. UNAM.
- American Water Works Association. (2012). *Water Treatment Plant Design*. Fifth edition. New York: McGraw-Hill.
- American Waters Works Association & Research Foundation and Compagnie Generale des Eaux. (1991), *Ozone in water treatment: Application and engineering*, Chelsea, MI: Lewis Publisher.
- APHA-AWWA-WPCF. (1992). *Métodos Normalizados para Análisis de Aguas Potables y Residuales*. Madrid: Ediciones Díaz Santos, S.A.
- APHA, A. a. (1995). "Standard Methods for the Examination Water and Wastewater", Washington D.C.: American Public Health Association.
- Asiimwe J., Quilty B., Muyanja K and McGuigan G. (2013). Field comparison of solar water disinfection (SODIS) efficacy between glass and polyethylene terephthalate (PET) plastic bottles under sub-Saharan weather conditions. *Journal of water and health* 11.4 pp 729-737.
- B., E. A.; F., G. P. & B., G. C. (1992). *Disinfection Alternatives for Safe Drinking Water*. New York: Van Nostrand Rinehold.
- B., J. (1995). "Filtración del Agua". México: Serie Azul del Instituto de Ingeniería, UNAM. No. 572.
- B., L., & D.R., R. D. (1991). "Ozone in Water Treatment". *Application and Engineering*. Cooperative Research Report. Chelsea, MI: Lewis Publisher.
- Bank, W. (1992). *World Development Report 1992*. New York: Oxford University Press.
- Beltrán F. (2004). *Ozone reaction kinetics for water and wastewater systems*. Chelsea, MI: Lewis Publisher.
- Bhalchandra P. (2013). *Drinking Water Disinfection Techniques*.
- Bohme A. (1999). "Ozone technology of German industrial enterprises". *Ozone-science & Engineering*, vol. 21, no. 2, pp. 163-176.

- Bolton J. R. y Cotton C. A. (2008). *The ultraviolet disinfection Handbook*. Denver: American Water Association.
- C. J. M., A. (1997). *Mejoramiento Mediante Ozono del Proceso de Coagulación-Floculación en un Tratamiento Fisicoquímico para Aguas Residuales*. México: Tesis de Maestría, Fac. Ingeniería, DEPEFI, UNAM.
- C. Y. D. S. A., M. C. G. (1987). *Manual de tratamiento de aguas*. Departamento de Sanidad del Estado de Nueva York. México: Editorial Limusa.
- C., J. B. (1995). *Tratabilidad del Agua Residual del Valle de México*. México: Informe para la CNA.
- Caceres L. (1990) "Desinfección del Agua". Ministerio de Salud; Perú, pp 19-340.
- Carnimeo D., C. E. (1994). "Wastewater Disinfection by UV at Trani Municipal Plant". *Water Science and Technology* 30 (4): 125-132.
- CEPIS-OPS. 2002. *Desinfección del agua*. Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente. División de Salud y Ambiente. Organización Panamericana de la Salud. Oficina Sanitaria Panamericana, Oficina Regional de la Organización Mundial de la Salud. Lima Perú. pp 15-31.
- Chang, S. & Singer, P. C. (1991). "The Impact of Ozonation on the Removal of Particles, TC, and THM Precursors". *Orlando: AWWA Ann. Conf.* pp. 1325-1342.
- Chevrier N. y Sarhan F. (1992). "Effect of ozone on energy metabolism and its relation to carbon dioxide fixation" in *Euglena gracilis*. *J. Plant. Physiol.* 140, 521-527.
- Cleasby J. (1991). *Source water quality and pre-treatment options for slow sand filters*. In *slow sand filtration*. Edited By G.S. Logsdon. New York ACE.
- Coleman H., Marquis C., Scott J., Chin S., Amal R. (2005). "Bactericidal effects of titanium dioxide-based photocatalysts," *Chemical Engineering Journal*, vol. 113, no. 1, pp. 55-63
- Conagua. (2013). *Situación del Subsector Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento*. México: Semarnat.
- Conroy R., Elmore M., Joyce T., McGuigan K. and Barnes J. (1996). *Solar disinfection of drinking water and diarrhoea in Maasai children. A controlled field trial*. *Lancet* 348: pp 1695-1697.
- Cotton C. y Passantino L. (2005). "Regulations in the United States: requirements and guidance for ultraviolet disinfection of drinking water." *Journal Environmental Engineering Science*. Vol 4(1). pp 57-63.
- D., K. S. (1986). "Volatile Ozonation Products of Aqueous Humic Material". *Water Research* 20(2):153.
- Darby J., M. H. (1995). "Comparison of UV Radiation to Chlorination: Guidance for Achieving Optimal UV Performance". *Water Environment Research Foundation*.
- Davies M. and Evison L. (1991). *Sunlight and the survival of enteric bacteria in natural waters*. *J. Appl. Bacteriol.* 70. pp 265-274.
- Development, W. C. (1982). *Our Common Future*. Oxford: Oxford University Press.
- Duane, L. y Georgeson K. (1987). "Preozonation effect on THMs and turbidity at the Los Angeles water treatment plant." *Memorias. 8th Ozone World Congress*. Zurich, agosto 27-30. Vol. 1, 28-32.
- E., B. I. (1997). "Numerical Modelling of UV Intensity: Application to Collimated-Beam Reactors and Continuous-Flow Systems". *Water Science and Technology* 31(9): 2205-2218.

- Eddy, M., G. T., F. & L. M. (1991). *Wastewater Engineering: Treatment Disposal Reuse*. 3rd edition. New York: Ed. Mc GrawHill.
- Eddy, M., G. T., F. L. B. & L. M. (2000). "Ingeniería de Aguas Residuales. Tratamiento, Vertido y Reutilización". Madrid: Ed. Mc-GrawHill. 3ª edición, Cap.9, pp. 343-407.
- Engineering, T. (1994). "Ultraviolet Disinfection System. Design Manual for Consulting Engineers." Trojan Technologies: 2-15.
- EPA, U. E. (1986). *Design Manual: Municipal Wastewater Disinfection*. Cincinnati: EPA-625/1-86/021.
- EPA, U. E. (1989). *Guidance Manual of Compliance with the Filtration and Disinfection Requirements for Public Water Systems Using Surface Water Supplies*. Cincinnati.
- EPA., U. E. (1986). *Design Manual: Municipal Wastewater Disinfection*. Cincinnati: EPA-625/1-86/021.
- F. M., G. P. (1992). *High- Quality Industrial Water Management Manual*. Georgia: The Fairmont Press.
- Fernández A. (2001). "Agua Potable para comunidades rurales, reuso y Tratamiento Avanzado de Aguas residuales Domésticas", Capítulo 13 CYTEC XIVII.
- Finch G. R., Haas C. N., Oppenheimer J. A., Gordon G., Trussell R. R. (2001). "Design criteria for inactivation of *Cryptosporidium* by ozone in drinking water", *Ozone Sci. Eng.* 23, 259-284.
- G., B. (1994). *Wastewater Microbiology*. New York: Wiley-Liss.
- G., R. (1999). "Ozone in the United States of America- State of The Art". *Ozone Science and Engineering*, 21(2): 99-118.
- G., S. (1996). "Mexico City UV Disinfection Study". Trojan Technologies: 1-5.
- G., S. (23 Febrero, 1999). "UV Disinfection of Wastewater". *Apuntes de Conferencia*. México: Instituto de Ingeniería, UNAM.
- G., W. (s.f.). "Electrochemical Treatment of Industrial Wastewater", 25 (7) : 34-37.
- Geering, F. (1995). "Optimization of Ozono Plants for Water Works in Switzerland". *Ozone Science and Engineering*, 17(1).
- Gourmelon M., Cillard J., Pommepuy M. (1994). "Visible light damage to *Escherichia coli* in seawater: oxidative stress hypothesis," *J Appl Bacteriol*, vol. 77, no. 1, pp. 105-112.
- H., H. J. (1977). "Rate Constants for Reactions of Ozone with Organic Pollutants and Amonia in Water". Toronto: IOA Symp.
- H., H. J. (1978). "Ozone Initiated Oxidations of Solutes in Wastewater: A Reaction Kinetic Approach". *Prog. Water Technology*. 10:657.
- H., H. J. (1979). *Ozonation of Water: Selectivity and Rate of Oxidation of Solutes*. París: 3rd IOA Congress.
- H., J. B. (1998). "Physico-Chemical and Bacteriological Characterization of Wastewater from Mexico City". *Water Science and Technology* 37(1): 1-8.
- H., R. (1993). *El Uso de Aguas Residuales del Área Metropolitana de la Ciudad de México en el Riego Agrícola del Valle del Mezquital*. México: CNA.
- Hendricks D. (2011). *Foundamental of Water Treatment Unit Processes*. Florida: Editorial Taylor Francis.
- Hijnen W., Beerendok E. y Medema G. (2006). "Inactivation credit of UV for viruses, bacteria and protozoan (oo)cysts in wáter: A review" *Water Research* 40: 3-22.
- Hijnen, W., Dullemont, Y., Schijven, J., Hanzens-Brouwer, A., Rosielle, M. and Me-

- dema, G. (2007). Removal and fate of *Cryptosporidium parvum*, *Clostridium perfringens* and small-sized centric diatoms (*Stephanodiscus hantzschii*) in slow sand filters. *Water Research* 41, pp 2151-2162.
- Hinkebein T., Price .M, (2005). "Progress with the desalination and water purification technologies US roadmap". *Desalination*, 182: 19-28.
- Holt P., Bartón G., Mitchell C. (2005). "The future for electrocoagulation as a localized water treatment technology", *Chemosphere*, 59,3: 355-367.
- Hoyer O. (2004). "Water disinfection with UV radiation-requirements and realization." In: *Proceedings of the European Conference UV Karlsruhe, UV radiatiion. Effects and Technologies*. Karlsruhe, september: 22-24.
- Huebner, W. (1996). "Desinfección de Aguas de Desecho Humano". Seminario, Agua de México: Abril. pp. 29- 35.
- Ibañez, R. K. (1997). *Environmental Electrochemistry: Fundamentals and Applications in Pollution Abatement*. San Diego: Ed. Academic Press.
- INEGI. (2014). Potabilización y desinfección de agua. Disponible en: <http://www.inegi.org.mx/inegi/contenidos/espanol/prensa/contenidos/estadisticas/2010/agua10.asp?s=inegi&c=2754&ep=30>.
- J., F. R. (1990). "The UV Effect on Wastewater". *Water/Engineering and Management*. December: 15-18.
- J., H. (1998). "Chemistry of Aqueous Ozone and Transformation of Pollutants by Ozonation and Advanced Oxidation Processes". *The handbook of Environmental Chemistry*. Vol. 5 Part C Quality and Treatment of Drinking Water II. Edited by J. Hrubec. Springer- Veriag Berlin Heidelberg.
- J., K. J. (1999). "State of the Art of the Application of Ozonation in BENELUX Drinking Water Treatment". *Ozone Science and Engineering*. 21(2): 139-152.
- J., M. J. (1975). "Aspects of the Quantitative Assessment of Germicidal Efficiency". *Disinfection: Water and Wastewater*, Edited by J. D. Johnson. Ann Arbor, MI.: Ann Arbor Science Publishers, Inc.
- J., W. K. (1955). "The Bactericidal Action of Ozone Solution Schwietz". *J. Allgen. Pathol. Bakteriol.* 18:1060.
- J.L., L. K. (1994). "Ultraviolet Disinfection of Wastewater: Effect of Dose on Subsequent Photoreactivation". *Water Research*. 28:805.
- J.P., L. (1978). "Chemical Ozone Demand of a Water Sample by Laboratory Evaluation". *Ozonews*, International Ozone Institute, August, 5:8, Part 2.
- J.P., R. A. (s.f.). "Disinfection of Amebic Cysts in Water with Free Chlorine". *Journal of Water Pollution, Control Federation*. 55:1174-1182.
- Jeckel M.R. (1994). "Flocculation Effects of Ozone". *Ozone Sci. Eng.* 16, 55-59.
- Jiménez B. (1995). *Filtración de Agua Series del Instituto de Ingeniería UNAM*, No. 572.- Octubre. pag. 35 49
- K., O. (1982). "Methods and Operating Costs of Ozone Destruction in Offgas" *Ozonation Manual of Water and Wastewater Treatment*. New York: edited by W. J. Masschelein. John Wiley and sons, Inc.
- Kehoe S., Joyce T., Ibrahim P., Gillespie J., Shahr R. and McGuigan K. (2001). Effect of agitation, turbidity, aluminium foil re-

- flectors and container volumen on the inactivation efficiency of batch-process solar disinfectors. *Water Res.* 35: pp 1061-1065.
- Kendricks M., Davis J., Sisco T. and Surbeck C. (2013). Solar disinfection water treatment for a community-scale sistem. An analysis of design parameters for humanitarian engineering projects. *International journal for service learning in engineering* 8. pp 88-101.
- Klipstein, G. S. (1998). "Gas Discharge Lamps, Ballasts and Fixtures". Version 1.29.
- L., C. W. (1991). "Ultraviolet Disinfection: An Alternative to Chemical Disinfection". Trojan Technologies, 1-22.
- Langlais B., Reckhow D.A. y Brind D.R. (1991). *Ozone in water treatment: application and engineering*. Chelsea MI.: Lewis Publishers.
- Larocque R. (1999). "Ozone applications in Canada: A state of the art review". *Ozone Sci. Eng.* 21, 119-126.
- Le Pauloue J. y Langlais B. (1999) "State of the art of ozonation in France". *Ozone Sci. Eng.* 21, 153-162.
- León E. (2002). "Autosuficiencia en abasto y saneamiento de agua con ozono". International Ozone Association. Regional Conference, C. de México: CD-ROM, E-19.
- Lezcano I., Pérez Rey, R., Baluja C. y Sánchez E. (1999). "Ozone inactivation of *Pseudomonas aeruginosa*, *Escherichia coli*, *Shigella sonnei* and *Salmonella thyphimurium* in water". *Ozone Sci. Eng.* 21, 293-299.
- Lezcano I., Pérez Rey, R., Baluja C. y Sánchez E. (2001). "Ozone inactivation of microorganisms in water. Gram positive bacteria and yeast". *Ozone Sci. Eng.* 23, 183-187.
- Loge F., J. D. (1996b). "UV Disinfection of Wastewater: Probabilistic Approach to Design". *Journal of Environmental Engineering*. December : 1078-1084.
- Loge F., R. E. (1996a). "Ultraviolet Disinfection of Secondary Wastewater Effluents. Prediction of Performance and Design" *Water Environment Research* (68) 5: 900-916.
- Logsdon G. (2008). *Water Filtration Practices*. Denver, Colorado, American Water Works Association. pp 211- 218.
- Lorch, W. (1987) *Handbook of water purification*. London: John Wiley and Sons. pp. 531-595.
- M. O. Bataller, L. A. Fernández and E. Véliz. (2010) "Efficiency and sustainability of the ozone use in the water sources Management", *Rev. Int. Contam. Ambient.* 26 (1) 85-95.
- M., D. (1989). "Chimie des Oxydants et Traitement des Eaux". *Technique et Documentation-Lavoisier*, París: Lavoisier TEC and DOC.
- Manley, T. y. (1967). *Kirk Othmer Encyclopedia of Chemical Technology* Vol. 14. Segunda edición. New York: John Wiley and Sons, Inc.
- Manual, E. G. (1999). *Alternative Disinfectants and oxidants*. Cincinnati: U. S. Environmental Protection Agency. EPA 815-R-99-014
- Marín A. (2009) "Generación electroquímica in situ de coagulantes y desinfectantes para tratamiento de aguas", Universidad de Los Andes. Merida, Venezuela. Trabajo especial de grado.
- Martín A., Alarcón T., Martín I. and González A. (2005). Efficiency in the disinfection of water for human consumption in rural communities using solar radiation. *Solar energy* 78 pp 31-40.
- Masschelein, W. (1982). "Contacting of Ozone with Water and Contactor Offgas Treat-

- ment.” Handbook of Ozone Technology and Applications, Vol. 1. Edited by R.G. Rice and A. Netzer. Ann Arbor, MI: Ann Arbor Science Publishers. Inc.
- Metcalf & Eddy (2003). Wastewater Engineering Treatment and Resource Recovery. Fourth edition. New York: McGraw Hill.
- Metcalf & Eddy (2014). Wastewater Engineering Treatment and Resource Recovery. Fifth edition. New York: McGraw Hill.
- O., C. L. (1990). Desinfección del Agua. Lima: Ministerio de Salud.
- Oates P., Shanahan P. and Polz M. (2003). Solar disinfection (SOLDIS): Simulation of solar radiation for global assesment and application for point-of-use wáter treatment in Haiti. Water Res. 37. pp 47-54.
- OMS (1979). Serie de informes técnicos. No.639. “Virus en el suelo, aguas, servicios y suelo”
- OPS – COSUDE (2007) Guía para la selección de sistemas de desinfección, OMS.
- Organización Panamericana de la Salud- Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria. (2002). Desinfección del agua. Lima Perú. 2002. pp 15- 23. Disponible en <http://www.cepis.ops-oms.org>.
- Orta de Velásquez M. T., A. C. (1998). “Improvement of Wastewater Coagulation Using Ozone”. Ozone, Science and Engineering, 20(2): 151-162.
- P.N., C. N. (1993). Water Treatment and Waste Recovery. Advanced Technology and Applications. New Jersey: Prentice Hall.
- Pandit B. and Kumar J. (2013). Drinking water disinfection techniques. Editorial Taylor Francis. EUA. pp 71-90.
- Pérez Rey R., Sánchez H. y Baluja C. (1995). “Ozone inactivation of biologically-risky wastewaters”. Ozone Sci. Eng. 17, 409-512.
- R., D. (1997). “Theory and Practice of Water and Wastewater Treatment”. New York: John Wiley and Sons, Inc.
- R., G. (1996). “Desinfección con UV y Desinfección con Ozono”. Conferencia del Instituto de Ingeniería. México: UNAM.
- R.P., R. (1986). Analytical Aspects of Ozone Treatment of Water and Wastewater. Chelsea, MI: Lewis Publishers.
- Rakness K. L., C. K. (1993). “Wastewater Disinfection with Ozone Process Control and Operation Results”. Ozone Science and Engineering, 15(6): 497-514.
- Redd R. (1997). Solarinactivation of faecal bacteria in wáter. The critical role of oxygen. Lett. Appl. Microbiol. 24: pp 247-280.
- Reed R., Mani S. and Meyer V. (2000). Solar photo-oxidativereliminary field obervations. Lett. Appl. Microbiol. 30: pp 432-436.
- Rice R.G. (1999). “Ozone in the United States of America-State of the art. Ozone”, Sci. Eng. 21, 99-118.
- Rincon A., Pulgarin C. (2004). “Effect of pH, inorganic ions, organic matter and H₂O₂ on E-coli K12 photocatalytic inactivation by TiO₂ - Implications in solar water disinfection,” Applied Catalysis B: Environmental, vol. 51, no. 4, pp. 283–302.
- Rodríguez J.,(2010) Estudio comparativo de diferentes tecnologías de higienización de depuración con fines para su reutilización, Tesis doctoral. Universidad Politécnica de Madrid.-Madrid, España. Capítulo 2, pag. 24.
- Rodríguez Vidal, F. J. (2003), Procesos de potabilización del agua e influencia del tratamiento de ozonización, Madrid: Ed. Díaz de Santos, S.A.
- Sarmiento A., Gómez D., Guerra L. (2003). Aplicación de la energía solar y la luz ul-

- travioleta en la potabilización del agua en escuelas primarias. *Energética*, Vol. XXIV, No. 1/2003.
- Shaban A.M., E.-T. G. (1997). "UV Ability to Inactivate Microorganisms Combined With Factors Affecting Radiation." *Water Science and Technology*. 35(11/12): 107-112.
- Sharpless, C.M. y Linden K.G. (2001). "UV photolysis of nitrate. Effects of natural organic matter and dissolved inorganic carbon, and implications for water disinfection." *Environmental Science and Technology*. Vol 35 (14):2949-2955.
- Sobsey M., Linden K, Shin G. and Faubert G. (2002). UV disinfection of *Giardia lamblia* cysts in water. *Environmental Science Technology*. 36 (11). pp 19-22.
- Sobsey, M. D. (1989). "Inactivation of health-related microorganism in water by disinfection process". *Water Science and Technology*. 21:179-195.
- SODIS. (2003). *Desinfección solar del agua. Guía de aplicación*. Lima Perú. pp 19-26.
- Solsona F., Méndez J. (2002). "Desinfección del Agua". CEPIS-/OPS/OMS.
- Spellman, Frank R. (2014) *Water and wastewater treatment operations*, London: CRC Press.
- Storer, E. (1986). *Design manual. Municipal wastewater disinfection*. Ohio: U.S. Environmental Agency. EPA/65/Editorial Wiley1-86-021.
- Summer, W. (1957). *Photosensitizers. A Treatise on Photo-Electric Devices and their Application to Industry*. London:Chapman & Hall Ltd.
- Tchobanoglous G., Trusell R., Hand D., Crittenden J. and Howe K. (2012). *Principles of water treatment*. London:Wiley.
- Teresa, A. H. (1982). "Desinfección de Agua Residual Municipal por Medio de Radiación Gamma". XVIII Congreso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental. Panamá.
- Toft P., R. T. (1988). "Drinking Water Treatment Small System Alternatives" *Proceedings of the Third National Conference on Drinking Water*. Newfoundland, Canada. June 12-14: pp. 159-174.
- Tortora G., Funke B. and Case C. (1997). *Microbiology. An introduction 3ª edición*. The Benjamin/Cumming publishing Co. USA. pp 167-194.
- Trojan Technologies, I. (1997). "Saneamiento del Valle de México. Propuesta de Desinfección de Aguas Residuales por un Sistema Avanzado de Ultravioleta".
- U. S. Environmental Protection Agency, (1986). (U.S. EPA) *Design Manual: Municipal Wastewater Disinfection*. Cincinnati: EPA-625/1-86/021.
- U. S. Environmental Protection Agency, (1989). (U.S. EPA) *Guidance Manual of Compliance with the Filtration and Disinfection Requirements for Public Water Systems Using Surface Water Supplies*. Cincinnati
- Valencia V., Sancjes L. y Aponte A. (2009). *Evaluación de la filtración lenta de arena como tratamiento terciario de agua residual doméstica con fines de reuso agropecuario y piscícola*. *Ingeniería de Recursos Naturales y del Ambiente*, núm. 8, enero-diciembre, 2009, pp. 39-49. Universidad del Valle. Colombia.
- Vázquez S. (2009). *Cinética de inactivación del recrecimiento de bacteria de la familia enterobacteriaceae y vibionaceae en agua desinfectada con radiación solar*. Tesis de maestría. Programa de Maestría y Docto-

- rado. Universidad Nacional Autónoma de México. Jiutepec, Morelos. pp 26-41.
- Vázquez, R. P. (1996). "¿Problemas con el Tratamiento de Aguas?: Prueba con el ozono." Tesis, Fac. Química, UNAM.
- Vicars S. (1999). Factors effecting the survival of enteric bacteria in slaine waters. PhD. Thesis, Northumbria University, Newcastle upon Tyne.
- Von Gunten U. (2003). "Ozonation of drinking water: Part II. Disinfection and by-product formation in presence of bromide, iodide or chlorine". *Water Res.* 37, pp.1469-1484.
- Von Sonntag C., Kolch A., Gebel J., Oguma K. y Sommer R (2004). "The photochemical basis of UV disinfection. In Proceedings of the European Conference UV Karlsruhe, UV radiatiion." *Effects and Technologies*, september 22-24. Karlsruhe.
- W., P. (1976). "La Calidad de las Aguas y su Tratamiento". Tomo 3. Madrid: Ed. Urmo, 85-89 p.
- Ward, N. R., Wolfe, R. L., & Olson, B. H. (1984). "Effect of pH, application technique, and chlorine-to-nitrogen ratio on disinfectant activity of inorganic chloramines with pure culture bacteria." *Applied and Environmental Microbiology*, 48(3), 508-514.
- Water Environment Federation. (1996). *Wastewater Disinfection: Manual of Practice Fd-10 (Manual of Practice: Facilities Development)*, pp. 227-291.
- Watts, C. (1985). "Organic By-Products of Ozonation of Humic and Fulvic Acids". *Proc. Intl. Conf. on the Role of Ozone in Water and Wastewater Treatment*. Chichester: Burghes and A. Graham, Ellis Horwood Ltd.
- Wegelin M, Galvis G y Latorre J. 1998. La filtración gruesa en el tratamiento de agua de fuentes superficiales. Ministerio de Desarrollo Económico y Social de Colombia. Dirección de Agua Potable y Saneamiento Básico. Agencia Suiza para el Desarrollo y la Cooperación. Duebendorf Suiza. pp V1-V12
- Wegelin M., Canonica S., Mechsner K., Fleischmann T., Pesaro F. and Metzler A. (1994). Solar wáter didinfection. Scoope of the process and analysis of radiation experiments. *J. Water SRT-Aqua* 43: Pp154-169.
- Wolfgang G. (1985) "Electrochemical Treatment of Industrial Wastewater". 25 (7): 34-37.
- Zhou Hongde. & Smith Daniel. (1994). "Kinects of ozone disinfection in completely mixed system", *Journal. Environmental of. Engineering*, Vol. 120, No. 4. pp. 841-846.

TABLA DE CONVERSIONES DE UNIDADES DE MEDIDA

Sigla	Significado	Sigla	Significado
mg	miligramo	kg/m ³	kilogramo por metro cúbico
g	gramo	l/s	litros por segundo
kg	kilogramo	m ³ /d	metros cúbicos por día
mm	milímetro	Sm ³ /h	condiciones estándar de metro cúbico por hora
cm	centímetro	Scfm	condiciones estándar de pies cúbicos por minuto
m	metro	°C	grados Celsius
ml	mililitro	psia	libra-fuerza por pulgada cuadrada absoluta
l	litro	cm/s	centímetro por segundo
m ³	metro cúbico	m/s	metro por segundo
s	segundo	HP	caballo de fuerza (medida de energía)
h	hora	kW	kilowatt
d	día	UNT	unidades nefelométricas de turbiedad
mg/l	miligramo por litro		

Longitud

Sistema métrico	Sistema Inglés	Siglas
1 milímetro (mm)	0.03	in
1 centímetro (cm) = 10 mm	0.39	in
1 metro (m) = 100 cm	1.09	yd
1 kilómetro (km) = 1 000 m	0.62	mi
Sistema Inglés	Sistema métrico	
1 pulgada (in)	2.54	cm
1 pie (ft) = 12 pulgadas	0.30	m
1 yarda (yd) = 3 pies	0.91	m
1 milla (mi) = 1 760 yardas	1.60	km
1 milla náutica (nmi) = 2 025.4 yardas	1.85	km

Superficie

Sistema métrico	Sistema inglés	Siglas
1 cm ² = 100 mm ²	0.15	in ²
1 m ² = 10 000 cm ²	1.19	yd ²
1 hectárea (ha) = 10 000 m ²	2.47	acres
1 km ² = 100 ha	0.38	mi ²
Sistema Inglés	Sistema métrico	
1 in ²	6.45	cm ²
1 ft ² = 144 in ²	0.09	m ²
1 yd ² = 9 ft ²	0.83	m ²
1 acre = 4 840 yd ²	4 046.90	m ²
1 milla ² = 640 acres	2.59	km ²

Volumen/capacidad

Sistema métrico	Sistema inglés	Siglas
1 cm ³	0.06	in ³
1 dm ³ = 1 000 cm ³	0.03	ft ³
1 m ³ = 1 000 dm ³	1.30	yd ³
1 litro (L) = 1 dm ³	1.76	pintas
1 hectolitro (hL) = 100 L	21.99	galones
Sistema Inglés	Sistema métrico	
1 in ³	16.38	cm ³
1 ft ³ = 1 728 in ³	0.02	m ³
1 onza fluida EUA = 1.0408 onzas fluidas RU	29.57	mL
1 pinta (16 onzas fluidas) = 0.8327 pintas RU	0.47	L
1 galón EUA = 0.8327 galones RU	3.78	L

Masa/peso

Sistema métrico	Sistema inglés	
1 miligramo (mg)	0.0154	grano
1 gramo (g) = 1 000 mg	0.0353	onza
1 kilogramo (kg) = 1 000 g	2.2046	libras
1 tonelada (t) = 1000 kg	0.9842	toneladas larga
Sistema Inglés	Sistema métrico	
1 onza (oz) = 437.5 granos	28.35	g
1 libra (lb) = 16 oz	0.4536	kg
1 stone = 14 lb	6.3503	kg
1 hundredweight (cwt) = 112 lb	50.802	kg
1 tonelada larga = 20 cwt	1.016	t

Temperatura

$$^{\circ}C = \frac{5}{9}(^{\circ}F -$$

$$^{\circ}F = \frac{9}{5}(^{\circ}C) + 32$$

Otros sistemas de unidades		Multiplicado por	Sistema Internacional de Unidades (SI)	
Unidad	Símbolo	Factor de conversión	Se convierte a	
Longitud				
Pie	pie, ft.,'	0.30	metro	m
Pulgada	plg, in,"	25.40	milímetro	mm
Presión/esfuerzo				
Kilogramo fuerza/cm ²	kg _f /cm ²	98 066.50	pascal	Pa
Libra/pulgada ²	lb/ plg ² , PSI	6 894.76	pascal	Pa
atmósfera técnica	at	98 066.50	pascal	Pa
metro de agua	m H ₂ O (mca)	9 806.65	pascal	Pa
mm de mercurio	mm Hg	133.32	pascal	Pa
bar	bar	100 000.00	pascal	Pa
Fuerza/ peso				
kilogramo fuerza	kg _f	9.80	newton	N
Masa				
libra	lb	0.45	kilogramo	kg
onza	oz	28.30	gramo	g
Peso volumétrico				
kilogramo fuerza/m ³	kg _f /m ³	9.80	N/m ³	N/m ³
libra /ft ³	lb/ft ³	157.08	N/m ³	N/m ³
Potencia				
caballo de potencia	CP, HP	745.69	watt	W
caballo de vapor	CV	735.00	watt	W
Viscosidad dinámica				
poise	μ	0.01	pascal segundo	Pa s
Viscosidad cinemática				
viscosidad cinemática	v	1	stoke	m ² /s (St)
Energía/ Cantidad de calor				
caloría	cal	4.18	joule	J
unidad térmica británica	BTU	1 055.06	joule	J
Temperatura				
grado Celsius	°C	tk=tc + 273.15	grado Kelvin	K

Nota: El valor de la aceleración de la gravedad aceptado internacionalmente es de 9.80665 m/s²

Longitud								
de / a	mm	cm	m	km	mi	milla náutica (nmi)	ft	in
mm	1.000	0.100	0.001					
cm	10000	1.000	0.010				0.033	0.394
m	1 000.000	100.000	1.000	0.001			3.281	39.370
km			0.001	1.000	0.621	0.540	3 280.83	0.039
mi			1 609.347	1.609	1.000	0.869	5 280.000	
nmi			1 852.000	1.852	1.151	1.000	6 076.115	
ft		30.480	0.305				1.000	12.000
in	25.400	2.540	0.025				0.083	1.000

Superficie								
de / a	cm ²	m ²	km ²	ha	mi ²	acre	ft ²	in ²
cm ²	1.00						0.001	0.155
m ²	10 000.00	1.00					10.764	1 550.003
km ²			1.000	100.000	0.386	247.097		
ha		10 000.00	0.010	1.000	0.004	2.471		
mi ²			2.590	259.000	1.000	640.000		
acre		4 047.00	0.004	0.405	0.002	1.000		
ft ²	929.03	0.09					1.000	0.007
in ²	6.45						144.000	1.000

Volumen								
de / a	cm ³	m ³	L	ft ³	gal. EUA	acre-ft	in ³	yd ³
cm ³	1.000		0.001				0.061	
m ³		1.000	1 000.000	35.314	264.200			1.307
L	1 000.000	0.001	1.000	0.035	0.264		61.023	
ft ³		0.028	28.317	1.000	7.481			0.037
gal. EUA		0.004	3.785	0.134	1.000		230.974	
acre-ft		1 233.490				1.000		
in ³	16.387		0.016		0.004		1.000	
Yd ³		0.765		27.000				1.000

Gasto								
de / a	l/s	cm ³ /s	gal/día	gal/min	l/min	m ³ /día	m ³ /h	ft ³ /s
l/s	1.000	1 000.000		15.851	60.000	86.400	3.600	0.035
cm ³ /s	0.001	1.000	22.825	0.016	0.060	0.083		
gal/día		0.044	1.000			0.004		
gal/min	0.063	63.089	1 440.000	1.000	0.000	5.451	0.227	0.002
l/min	0.017	16.667	0.000	0.264	1.000	1.440	0.060	
m ³ /día	0.012	11.570	264.550	0.183	0.694	1.000	0.042	
m ³ /h	0.278		6 340.152	4.403	16.667	24.000	1.000	0.010
ft ³ /s	28.316			448.831	1 698.960	2 446.590	101.941	1.000

Eficiencia de pozo			
de	a	gal/min/pie	l/s/m
gal/min/pie		1.000	0.206
l/s/m		4.840	1.000

Permeabilidad							
de	a	cm/s	gal/día/Pie ²	millones gal/día/acre	m/día	pie/s	Darcy
cm/s		1.000	21 204.78		864.000	0.033	
gal/día/pie ²			1.000		0.041		0.055
millón gal/día/acre				1.000	0.935		
m/día		0.001	24.543	1.069	1.000		1.351
pie/s		30.480			26 334.72	1.000	
Darcy			18.200		0.740		1.000

Peso									
de	a	grano	gramo	kilogramo	libra	onza	tonelada corta	tonelada larga	tonelada métrica
Grano (gr)		1.000	0.065						
Gramo (g)		15.432	1.000	0.001	0.002				
Kilogramo (kg)			1 000.000	1.000	2.205	35.273			0.001
Libra (lb)			453.592	0.454	1.000	16.000			
Onza (oz)		437.500	28.350			1.000			
t corta				907.180	2 000.000		1.000		0.907
t larga				1 016.000	2 240.000		1.119	1.000	1.016
t métrica				1 000.000	2 205.000		1.101	0.986	1.000

Potencia									
de	a	CV	HP	kW	W	ft lb/s	kg m/s	BTU/s	kcal/s
CV		1.000	0.986	0.736	735.500	542.500	75.000	0.697	0.176
HP		1.014	1.000	0.746	745.700	550.000	76.040	0.706	0.178
kW		1.360	1.341	1.000	1 000.000	737.600	101.980	0.948	0.239
W				0.001	1.000	0.738	0.102		
ft lb/s					1.356	1.000	0.138	0.001	
kg m/s		0.013	0.013	0.009	9.806	7.233	1.000	0.009	0.002
BTU/s		1.434	1.415	1.055	1 055.000	778.100	107.580	1.000	0.252
kcal/s		5.692	5.614	4.186	4 186.000	3 088.000	426.900	3.968	1.000

Presión								
de	a	atmósfera	Kg/cm ²	lb/in ²	mm de Hg	in de Hg	m de H ₂ O	ft de H ₂ O
atmósfera		1.000	1.033	14.696	760.000	29.921	10.330	33.899
kg/cm ²		0.968	1.000	14.220	735.560	28.970	10.000	32.810
lb/in ²		0.068	0.070	1.000	51.816	2.036	0.710	2.307
mm de Hg		0.001	0.001	0.019	1.000	0.039	0.013	0.044
in de Hg		0.033	0.035	0.491	25.400	1.000	0.345	1.133
m de agua		0.096	0.100	1.422	73.560	2.896	1.000	3.281
ft de agua		0.029	0.030	0.433	22.430	0.883	0.304	1.000

Energía									
de	a	CV hora	HP hora	kW hora	J	ft.lb	kgm	BTU	kcal
CV hora		1.000	0.986	0.736				2 510.000	632.500
HP hora		1.014	1.000	0.746				2 545.000	641.200
kW hora		1.360	1.341	1.000				3 413.000	860.000
J					1.000	0.738	0.102		
ft.lb					1.356	1.000	0.138		
kgm					9.806	7.233	1.000		
BTU					1 054.900	778.100	107.580	1.000	0.252
kcal					4 186.000	3 087.000	426.900	426.900	1.000

Transmisividad				
de	a	cm ² /s	gal/día/pie	m ² /día
cm ² /s		1.000	695.694	8.640
gal/día/ft		0.001	1.000	0.012
m ² /día		0.116	80.520	1.000

Conversión de pies y pulgadas, a metros												
ft, in/m	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
0	0.000	0.025	0.051	0.076	0.102	0.127	0.152	0.178	0.203	0.229	0.254	0.279
1	0.305	0.330	0.356	0.381	0.406	0.432	0.457	0.483	0.508	0.533	0.559	0.584
2	0.610	0.635	0.660	0.686	0.711	0.737	0.762	0.787	0.813	0.838	0.864	0.889
3	0.914	0.940	0.965	0.991	1.016	1.041	1.067	1.092	1.176	1.143	1.168	1.194
4	1.219	1.245	1.270	1.295	1.321	1.346	1.372	1.397	1.422	1.448	1.473	1.499
5	1.524	1.549	1.575	1.600	1.626	1.651	1.676	1.702	1.727	1.753	1.778	1.803
6	1.829	1.854	1.880	1.905	1.930	1.956	1.981	2.007	2.032	2.057	2.083	2.108
7	2.134	2.159	2.184	2.210	2.235	2.261	2.286	2.311	2.337	2.362	2.388	2.413
8	2.438	2.464	2.489	2.515	2.540	2.565	2.591	2.616	2.642	2.667	2.692	2.718
9	2.743	2.769	2.794	2.819	2.845	2.870	2.896	2.921	2.946	2.972	2.997	3.023
10	3.048	3.073	3.099	3.124	3.150	3.175	3.200	3.226	3.251	3.277	3.302	3.327
11	3.353	3.378	3.404	3.429	3.454	3.480	3.505	3.531	3.556	3.581	3.607	3.632
12	3.658	3.683	3.708	3.734	3.759	3.785	3.810	3.835	3.861	3.886	3.912	3.937
13	3.962	3.988	4.013	4.039	4.064	4.089	4.115	4.140	4.166	4.191	4.216	4.242
14	4.267	4.293	4.318	4.343	4.369	4.394	4.420	4.445	4.470	4.496	4.521	4.547
15	4.572	4.597	4.623	4.648	4.674	4.699	4.724	4.750	4.775	4.801	4.826	4.851
16	4.877	4.902	4.928	4.953	4.978	5.004	5.029	5.055	5.080	5.105	5.131	5.156
17	5.182	5.207	5.232	5.258	5.283	5.309	5.334	5.359	5.385	5.410	5.436	5.461
18	5.486	5.512	5.537	5.563	5.588	5.613	5.639	5.664	5.690	5.715	5.740	5.766
19	5.791	5.817	5.842	5.867	5.893	5.918	5.944	5.969	5.994	6.020	6.045	6.071
20	6.096	6.121	6.147	6.172	6.198	6.223	6.248	6.274	6.299	6.325	6.350	6.375
21	6.401	6.426	6.452	6.477	6.502	6.528	6.553	6.579	6.604	6.629	6.655	6.680
22	6.706	6.731	6.756	6.782	6.807	6.833	6.858	6.883	6.909	6.934	6.960	6.985
23	7.010	7.036	7.061	7.087	7.112	7.137	7.163	7.188	7.214	7.239	7.264	7.290
24	7.315	7.341	7.366	7.391	7.417	7.442	7.468	7.493	7.518	7.544	7.569	7.595
25	7.620	7.645	7.671	7.696	7.722	7.747	7.772	7.798	7.823	7.849	7.874	7.899
26	7.925	7.950	7.976	8.001	8.026	8.052	8.077	8.103	8.128	8.153	8.179	8.204
27	8.230	8.255	8.280	8.306	8.331	8.357	8.382	8.407	8.433	8.458	8.484	8.509
28	8.534	8.560	8.585	8.611	8.636	8.661	8.687	8.712	8.738	8.763	8.788	8.814
29	8.839	8.865	8.890	8.915	8.941	8.966	8.992	9.017	9.042	9.068	9.093	9.119
30	9.144	9.169	9.195	9.220	9.246	9.271	9.296	9.322	9.347	9.373	9.398	9.423
31	9.449	9.474	9.500	9.525	9.550	9.576	9.601	9.627	9.652	9.677	9.703	9.728
32	9.754	9.779	9.804	9.830	9.855	9.881	9.906	9.931	9.957	9.982	10.008	10.033
33	10.058	10.084	10.109	10.135	10.160	10.185	10.211	10.236	10.262	10.287	10.312	10.338
34	10.363	10.389	10.414	10.439	10.465	10.490	10.516	10.541	10.566	10.592	10.617	10.643
35	10.668	10.693	10.719	10.744	10.770	10.795	10.820	10.846	10.871	10.897	10.922	10.947

La segunda columna es la conversión de pies a metros; las siguientes columnas son la conversión de pulgadas a metros que se suman a la anterior conversión.

Tabla de conversión de pulgadas a milímetros								
Pulgadas	0	1/8	1/4	3/8	1/2	5/8	3/4	7/8
0	0	3.175	6.35	9.525	12.7	15.875	19.05	22.225
1	25.4	28.575	31.75	34.925	38.1	41.275	44.45	47.625
2	50.8	53.975	57.15	60.325	63.5	66.675	69.85	73.025
3	76.2	79.375	82.55	85.725	88.9	92.075	95.25	98.425
4	101.6	104.775	107.95	111.125	114.3	117.475	120.65	123.825
5	127.0	130.175	133.35	136.525	139.7	142.875	146.05	149.225
6	152.4	155.575	158.75	161.925	165.1	168.275	171.45	174.625
7	177.8	180.975	184.15	187.325	190.5	193.675	196.85	200.025
8	203.2	206.375	209.55	212.725	215.9	219.075	222.25	225.425
9	228.6	231.775	234.95	238.125	241.3	244.475	247.65	250.825
10	254.0	257.175	260.35	263.525	266.7	269.875	273.05	276.225
11	279.4	282.575	285.75	288.925	292.1	295.275	298.45	301.625
12	304.8	307.975	311.15	314.325	317.5	320.675	323.85	327.025
13	330.2	333.375	336.55	339.725	342.9	346.075	349.25	352.425
14	355.6	358.775	361.95	365.125	368.3	371.475	374.65	377.825
15	381.0	384.175	387.35	390.525	393.7	396.875	400.05	403.225
16	406.4	409.575	412.75	415.925	419.1	422.275	425.45	428.625
17	431.8	434.975	438.15	441.325	444.5	447.675	450.85	454.025
18	457.2	460.375	463.55	466.725	469.9	473.075	476.25	479.425
19	482.6	485.775	488.95	492.125	495.3	498.475	501.65	504.825
20	508.0	511.175	514.35	517.525	520.7	523.875	527.05	530.225
21	533.4	536.575	539.75	542.925	546.1	549.275	552.45	555.625
22	558.8	561.975	565.15	568.325	571.5	574.675	577.85	581.025
23	584.2	587.375	590.55	593.725	596.9	600.075	603.25	606.425
24	609.6	612.775	615.95	619.125	622.3	625.475	628.65	631.825
25	635.0	638.175	641.35	644.525	647.7	650.875	654.05	657.225
26	660.4	663.575	666.75	669.925	673.1	676.275	679.45	682.625
27	685.8	688.975	692.15	695.325	698.5	701.675	704.85	708.025
28	711.2	714.375	717.55	720.725	723.9	727.075	730.25	733.425
29	736.6	739.775	742.95	746.125	749.3	752.475	755.65	758.825
30	762.0	765.175	768.35	771.525	774.7	777.875	781.05	784.225

Fórmulas generales para la conversión de los diferentes sistemas

Centígrados a Fahrenheit	$^{\circ}\text{F}=9/5^{\circ}\text{C}+32$
Fahrenheit a Centígrados	$^{\circ}\text{C}=5/9 (^{\circ}\text{F}-32)$
Réaumur a Centígrados	$^{\circ}\text{C}=5/4 ^{\circ}\text{R}$
Fahrenheit a Réaumur	$^{\circ}\text{R}=4/9 (^{\circ}\text{F}-32)$
Réaumur a Fahrenheit	$^{\circ}\text{F}=(9/4^{\circ}\text{R})+32$
Celsius a Kelvin	$^{\circ}\text{K}=273.15+^{\circ}\text{C}$
Fahrenheit a Rankine	$^{\circ}\text{Ra}=459.67+^{\circ}\text{F}$
Rankine a Kelvin	$^{\circ}\text{K}=5/9^{\circ}\text{Ra}$

Factores químicos de conversión					
	A	B	C	D	E
Constituyentes	epm a ppm	ppm a epm	epm a gpg	gpg a epm	ppm a ppm CaCO ₃
calcio Ca ⁺²	20.04	0.04991	1.1719	0.8533	2.4970
hierro Fe ⁺²	27.92	0.03582	1.6327	0.6125	1.7923
magnesio Mg ⁺²	12.16	0.08224	0.7111	1.4063	4.1151
potasio K ⁺¹	39.10	0.02558	2.2865	0.4373	1.2798
sodio Na ⁺¹	23.00	0.04348	1.3450	0.7435	2.1756
bicarbonato (HCO ₃) ⁻¹	61.01	0.01639	3.5678	0.2803	0.8202
carbonato (CO ₃) ⁻²	30.00	0.03333	1.7544	0.5700	1.6680
cloro (Cl) ⁻¹	35.46	0.02820	2.0737	0.4822	1.4112
hidróxido (OH) ⁻¹	17.07	0.05879	0.9947	1.0053	2.9263
nitrate (NO ₃) ⁻¹	62.01	0.01613	3.6263	0.2758	0.8070
fosfato (PO ₄) ⁻³	31.67	0.03158	1.8520	0.5400	1.5800
sulfato (SO ₄) ⁻²	48.04	0.02082	2.8094	0.3559	1.0416
bicarbonato de calcio Ca(HCO ₃) ₂	805.00	0.01234	4.7398	0.2120	0.6174
carbonato de calcio (CaCO ₃)	50.04	0.01998	2.9263	0.3417	1.0000
cloruro de calcio (CaCl ₂)	55.50	0.01802	3.2456	0.3081	0.9016
hidróxido de calcio Ca(OH) ₂	37.05	0.02699	2.1667	0.4615	1.3506
sulfato de calcio (CaSO ₄)	68.07	0.01469	3.9807	0.2512	0.7351
bicarbonato férrico Fe(HCO ₃) ₃	88.93	0.01124	5.2006	0.1923	0.5627
carbonato férrico Fe ₂ (CO ₃) ₃	57.92	0.01727	3.3871	0.2951	0.8640
sulfato férrico Fe ₂ (CO ₄) ₃	75.96	0.01316	4.4421	0.2251	0.6588
bicarbonato magnésico Mg(HCO ₃) ₂	73.17	0.01367	4.2789	0.2337	0.6839
carbonato magnésico (MgCO ₃)	42.16	1.02372	2.4655	0.4056	1.1869
cloruro de magnesio (MgCl ₂)	47.62	0.02100	2.7848	0.3591	1.0508
hidróxido de magnesio Mg(OH) ₂	29.17	0.03428	1.7058	0.5862	1.7155
sulfato de magnesio (MgSO ₄)	60.20	0.01661	3.5202	0.2841	0.6312

epm = equivalentes por millón

ppm = partes por millón

gpg = granos por galón

p.p.m. CaCO₃ = partes por millón de carbonato de calcio



ILUSTRACIONES

Ilustración 1.1 Formas típicas de las bacterias	5
Ilustración 1.2 Ejemplo de protozoarios	8
Ilustración 1.3 Huevos Típicos de Helmintos	9
Ilustración 1.4 Ciclo de vida de Ascaris lumbricoides	11
Ilustración 1.5 Ley de Chick y las desviaciones comúnmente encontradas (Bitton, 1994)	15
Ilustración 3.1 Concentrador solar para la desinfección de agua (Martín et al., 2005)	26
Ilustración 3.2 Concentrador solar aplicado en zonas rurales (OPS-CEPIS, 2002)	26
Ilustración 3.3 Ebullición de agua en zonas rurales, técnica de desinfección	27
Ilustración 3.4 Vista frontal y lateral del equipo de desinfección con UV para comunidades rurales	28
Ilustración 3.5 Filtro artesanal de cantera (cortesía de la empresa Agua Viva)	29
Ilustración 3.6 Filtros de cartucho disponibles en el mercado	30
Ilustración 3.7 Filtro lento de arena en comunidad rural	30
Ilustración 3.8 Monitoreo de cloro residual en comunidades rurales	32
Ilustración 4.1 Distribución del ácido hipocloroso y del hipoclorito en agua a diferentes valores de pH (adaptada de Tchobanoglous 2012)	39
Ilustración 4.2 Curva obtenida en la cloración a punto de quiebre (Tchobanoglous, 2012)	43
Ilustración 4.3 Especies que conforman el cloro total residual	43
Ilustración 4.4 Presentaciones comunes del cloro comercial	46
Ilustración 4.5 Recipientes de cloro: cilindro y carros tanque, respectivamente	48
Ilustración 4.6 Cilindro de cloro mostrando en su interior los volúmenes de cloro en estado líquido y gaseoso	49
Ilustración 4.7 Tipos de fondos en cilindros para cloro de 68 kg	50
Ilustración 4.8 Corte de un cilindro para cloro de 68 kg	51
Ilustración 4.9 Accesorios de un cilindro de 907 kg	52
Ilustración 4.10 Mecanismo para mover cilindros de 907 kg	53
Ilustración 4.11 Clasificación de las unidades de suministro de cloro	54
Ilustración 4.12 Esquema de un aplicador de cloro a presión	55
Ilustración 4.13 Esquema de un aplicador de cloro al vacío	56
Ilustración 4.14 Dispositivos de control del flujo de cloro	57
Ilustración 4.15 Instalación de un evaporador	58
Ilustración 4.16 Sistema de mezclado cloro gas – agua	59
Ilustración 4.17 Difusores	61

Ilustración 4.18 Sistema de difusores	61
Ilustración 4.19 Operación simple con determinación ocasional de cloro residual	62
Ilustración 4.20 Operación con analizador permanente y alarmas	62
Ilustración 4.21 Ajuste de dosis proporcional al flujo tratado (circuito abierto)	63
Ilustración 4.22 Ajuste proporcional a la demanda (circuito cerrado)	63
Ilustración 4.23 Ajuste de dosis proporcional tanto a la demanda como al flujo tratado (circuito compuesto)	64
Ilustración 4.24 Válvulas para cilindros de cloro	68
Ilustración 4.25 Máscara para gas con tubo respiratorio para colgar en el pecho	70
Ilustración 4.26 Máscara para gas con canister tipo barbilla	70
Ilustración 4.27 Mascara con tanque de aire a demanda de presión	71
Ilustración 4.28 Mascara de respiración autónoma	71
Ilustración 5.1 Espectro Electromagnético expandido de la radiación ultravioleta	76
Ilustración 5.2 Acción germicida de la luz UV sobre las bases nitrogenadas	77
Ilustración 5.3 Efecto de las partículas en la radiación de luz UV	80
Ilustración 5.4 Comparación entre una lámpara fluorescente y una germicida	82
Ilustración 5.5 Tipos de sistemas de desinfección con luz UV	83
Ilustración 5.6 Efecto del flujo en la dosis de luz UV	84
Ilustración 5.7 Esquema de un sistema horizontal de desinfección UV	86
Ilustración 5.8 Módulo de lámparas UV (Detalle del conductor)	86
Ilustración 5.9 Estructura de un banco de lámparas de UV	87
Ilustración 5.10 Control de nivel en un sistema horizontal	87
Ilustración 5.11 Esquema de un sistema vertical	88
Ilustración 5.12 Arreglos típicos	88
Ilustración 5.13 Equipo de luz colimada	90
Ilustración 5.14 Curva de respuesta de coliformes fecales a diferentes dosis	92
Ilustración 5.15 Selección de la dosis de desinfección	92
Ilustración 5.16 Curva que relaciona la intensidad promedio con la transmitancia filtrada del agua	93
Ilustración 5.17 Efecto del tamaño de partículas en el grado de desinfección	96
Ilustración 5.18 Lámpara con incrustaciones	98
Ilustración 6.1 Generador de ozono de 3 g O ₃ /h a 30 kg O ₃ /h	113
Ilustración 6.2 Generador de ozono de 60 g O ₃ /h a 10 kg O ₃ /h	114
Ilustración 6.3 Buque generador de ozono	116
Ilustración 6.4 Generador de ozono de gran capacidad	117
Ilustración 6.5 Cámara de contacto en tres etapas con difusor de burbujas	117
Ilustración 6.6 Cámara de contacto tipo Kerag	118
Ilustración 6.7 Cámara de contacto con lecho empacado usada en Sipplingen, Alemania	118
Ilustración 6.8 Cámara de contacto y difusión en tubo profundo "U"	119
Ilustración 6.9 Cámara de contacto con difusor de plato poroso radial sumergida	119
Ilustración 6.10 Cámara de contacto con difusor de turbina radial sumergida	120
Ilustración 6.11 Representación de la velocidad de decremento de ozono	123

Ilustración 6.12 Cámara de desinfección de cuatro etapas	127
Ilustración 6.13 Representación del $\log (O_3/O_{30})$ contra el tiempo, para obtener el coeficiente k'	129
Ilustración B.1 Radiación emitida por una lámpara de UV de baja presión	138
Ilustración B.2 Radiación relativa de una lámpara de presión media	139
Ilustración B.3 Intensidad de una lámpara de baja presión en función del tiempo	140
Ilustración B.4 Variación de la intensidad en función de la temperatura	141



TABLAS

Tabla 1.1 Principales enfermedades transmitidas por el agua	2
Tabla 1.2 Principales enfermedades con base en el agua	2
Tabla 1.3 Principales enfermedades vectoriales relacionadas con el agua	3
Tabla 1.4 Concentración y dosis infectivas de virus comúnmente encontrados en aguas residuales	4
Tabla 1.5 Virus más comúnmente encontrados en aguas contaminadas (OMS, 1979)	5
Tabla 1.6 Concentración y dosis infectivas de bacterias comúnmente encontradas en aguas residuales	7
Tabla 1.7 Bacterias más comúnmente encontrados en aguas contaminadas	7
Tabla 1.8 Concentración y dosis infectivas de protozoarios comúnmente encontrados en aguas residuales	8
Tabla 1.9 Protozoarios más comúnmente encontrados en aguas contaminadas	9
Tabla 1.10 Concentración y dosis infectivas de helmintos comúnmente encontrados en aguas residuales	10
Tabla 1.11 Helmintos más comúnmente encontrados en aguas contaminadas	10
Tabla 1.12 Comparación de los diferentes métodos de desinfección (Metcalf y Eddy, 1991)	13
Tabla 2.1 Principales métodos de desinfección del agua	17
Tabla 2.2 Aplicaciones del yodo	21
Tabla 2.3 Aplicaciones de la plata ionizada	22
Tabla 3.1 Factores que actúan en la eficiencia de la desinfección solar	27
Tabla 3.2 Consideraciones del lecho de soporte	30
Tabla 3.3 Consideraciones del medio filtrante	31
Tabla 3.4 Formas de cloro comunes en sistemas pequeños de abastecimiento	32
Tabla 3.5 Relación del volumen de cloro con respecto al agua a desinfectar	32
Tabla 3.6 Comparación de las alternativas de desinfección en viviendas	34
Tabla 4.1 Principales características del cloro a presión atmosférica	36
Tabla 4.2 Valores de la constante de equilibrio del ácido hipocloroso a diferentes temperaturas (Von Sountag et al 2004)	38
Tabla 4.3 Dosis y condiciones de aplicación de cloro para la oxidación de hierro y manganeso (EPA, 1999)	40
Tabla 4.4 Ventajas y desventajas de la cloración	43
Tabla 4.5 Dosis de cloro aplicadas en plantas potabilizadoras (EPA, 1999)	45
Tabla 4.6 Valores de C/t para diferentes organismos y cloro como desinfectante	47
Tabla 4.7 Coeficientes específicos de letalidad de alternativas de desinfectantes	47
Tabla 4.8 Preparación de una solución de hipoclorito de calcio al 2%	48
Tabla 4.9 Especificaciones para cilindros	49
Tabla 4.10 Especificaciones del código ASME para cilindros de 907 kg	50
Tabla 4.11 Clasificación de aparatos cloradores	55
Tabla 4.12 Sistemas de control de cloradores	60

Tabla 4.13 Métodos más conocidos para la determinación del cloro residual	66
Tabla 4.14 Equipos e instrumentos para controlar emergencias	69
Tabla 4.15 Prevención y acciones en caso de emergencia	72
Tabla 4.16 Preparación y cantidades de solución para absorber el cloro de acuerdo con la capacidad del cilindro dañado	73
Tabla 4.17 Efectos fisiológicos del cloro a diferentes concentraciones	74
Tabla 5.1 Impacto de las características del agua residual en la desinfección con luz UV	78
Tabla 5.2 Factores que afectan la dosis	80
Tabla 5.3 Comparación de la sensibilidad de diferentes microorganismos a la desinfección con luz UV	81
Tabla 5.4 Parámetros medidos en las pruebas de tratabilidad	89
Tabla 5.5 Parámetros analizados en el estudio de desinfección	94
Tabla 5.6 Comparación del efecto de aumento en SST y DTP en la concentración de CF aplicando una dosis de 22 mW s/cm ²	95
Tabla 5.7 Conceptos considerados para el cálculo de costos	95
Tabla 5.8 Sistemas de limpieza de lámparas UV	98
Tabla 5.9 Listado de responsabilidades del supervisor y empleado	99
Tabla 6.1 Parámetros cinéticos de inactivación de microorganismos con ozono (pH 7)	103
Tabla 6.2 Dosis de ozono para diversos contaminantes presentes en el agua	106
Tabla 6.3 Reacción del ozono con compuestos inorgánicos (Rodríguez, 2003)	106
Tabla 6.4 Reacciones directas del ozono molecular	107
Tabla 6.5 Medios desecantes	110
Tabla 6.6 Consideraciones de diseño y selección para el secado de gas (Masschelein, 1996)	110
Tabla 6.7 Características de los compresores utilizados para la alimentación de aire (Langlais <i>et al.</i> , 1991)	111
Tabla 6.8 Factores por definir para la alimentación del generador con aire comprimido (Langlais <i>et al.</i> , 1991)	111
Tabla 6.9 Clasificación de los generadores de ozono por corona de descarga de acuerdo al voltaje (Bryant <i>et al.</i> , 1992)	111
Tabla 6.10 Diseño del generador de ozono por corona de descarga	112
Tabla 6.11 Tipo de difusor por aplicación (Vázquez, 1996)	114
Tabla 6.12 Aspectos para el diseño de la cámara de contacto (Langlais <i>et al.</i> , 1991)	116
Tabla 6.13 Planeación preliminar para un proyecto de ozonación	121
Tabla 6.14 Pre-diseño de un sistema de ozonación	122
Tabla 6.15 Consideraciones para el diseño de pruebas de tratabilidad	124
Tabla 6.16 Aspectos de seguridad en las instalaciones de dosificación de ozono	126
Tabla 6.17 Aspectos de control	126
Tabla 6.18 Valores de C•t propuestos por la EPA para la inactivación del quiste Giardia con ozono a diferentes valores de temperatura y un intervalo de pH entre 6 y 9 (EPA, 1989)	128

Tabla 6.19 Características y dimensiones de la cámara de desinfección primaria	131
Tabla 6.20 Características y dimensiones de la cámara de desinfección secundaria para un residual de 0.4 en la cuarta etapa	131
Tabla A.1 Formulas para la obtención de hipoclorito	136

