

Comisión Nacional del Agua

**MANUAL DE AGUA POTABLE,
ALCANTARILLADO Y SANEAMIENTO**

**DESINFECCIÓN PARA SISTEMAS DE AGUA POTABLE Y
SANEAMIENTO**

Diciembre de 2007

www.cna.gob.mx

ADVERTENCIA

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

Esta publicación forma parte de los productos generados por la Subdirección General de Agua Potable, Drenaje y Saneamiento, cuyo cuidado editorial estuvo a cargo de la Gerencia de Cuencas Transfronterizas de la Comisión Nacional del Agua.

Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento.

Edición 2007

ISBN: 978-968-817-880-5

Autor: Comisión Nacional del Agua
Insurgentes Sur No. 2416 Col. Copilco El Bajo
C.P. 04340, Coyoacán, México, D.F.
Tel. (55) 5174-4000
www.cna.gob.mx

Editor: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales
Boulevard Adolfo Ruiz Cortines No. 4209 Col. Jardines de la Montaña,
C.P 14210, Tlalpan, México, D.F.

Impreso en México
Distribución gratuita. Prohibida su venta.

Comisión Nacional del Agua

Ing. José Luis Luege Tamargo

Director General

Ing. Marco Antonio Velázquez Holguín

Coordinador de Asesores de la Dirección General

Ing. Raúl Alberto Navarro Garza

Subdirector General de Administración

Lic. Roberto Anaya Moreno

Subdirector General de Administración del Agua

Ing. José Ramón Ardavín Ituarte

Subdirector General de Agua Potable, Drenaje y Saneamiento

Ing. Sergio Soto Priante

Subdirector General de Infraestructura Hidroagrícola

Lic. Jesús Becerra Pedrote

Subdirector General Jurídico

Ing. José Antonio Rodríguez Tirado

Subdirector General de Programación

Dr. Felipe Ignacio Arreguín Cortés

Subdirector General Técnico

Lic. René Francisco Bolio Halloran

Coordinador General de Atención de Emergencias y Consejos de Cuenca

M.C.C. Heidi Storsberg Montes

Coordinadora General de Atención Institucional, Comunicación y Cultura del Agua

Lic. Mario Alberto Rodríguez Pérez

Coordinador General de Revisión y Liquidación Fiscal

Dr. Michel Rosengaus Moshinsky

Coordinador General del Servicio Meteorológico Nacional

C. Rafael Reyes Guerra

Titular del Órgano Interno de Control

Responsable de la publicación:

Subdirección General de Agua Potable, Drenaje y Saneamiento

Coordinador a cargo del proyecto:

Ing. Eduardo Martínez Oliver

Subgerente de Normalización

La Comisión Nacional del Agua contrató la Edición 2007 de los Manuales con el

INSTITUTO MEXICANO DE TECNOLOGÍA DEL AGUA según convenio
CNA-IMTA-SGT-GINT-001-2007 (Proyecto HC0758.3) del 2 de julio de 2007

Participaron:

Dr. Velitchko G. Tzatchkov

M. I. Ignacio A. Caldiño Villagómez

CONTENIDO

1. IMPORTANCIA SANITARIA DE LA DESINFECCIÓN Y CONDICIONES GENERALES	6
1.1. VIRUS	7
1.2. BACTERIAS	7
1.2.1. Indicadores bacteriológicos de contaminación	8
1.3. PROTOZOARIOS	11
1.4. HELMINTOS	12
1.5. CONDICIONES GENERALES PARA LA DESINFECCIÓN	17
1.5.1. Tiempo de contacto	18
1.5.2. Tipo y concentración del agente químico	18
1.5.3. Intensidad y naturales del agente físico	19
1.5.4. Temperatura	19
1.5.5. Número de microorganismos	19
1.5.6. Tipo de microorganismo	20
1.5.7. Naturaleza del agua	20
2. MÉTODOS DE DESINFECCIÓN	21
2.1. MÉTODOS FÍSICOS	21
2.1.1. Filtración	21
2.1.2. Temperatura	22
2.1.3. Sedimentación	22
2.1.4. Radiación (solar y luz UV)	22
2.1.5. Radiación gamma	23
2.1.6. Procesos electrolíticos	23
2.2. MÉTODOS QUÍMICOS	23
2.2.1. Yodo	23
2.2.2. Bromo	24
2.2.3. Plata ionizada	24
2.2.4. Ozono	25
2.2.5. Cloro	25
2.2.5.1. Derivados del cloro	25
3. CLORO	27
3.1. CARACTERÍSTICAS	27
3.2. DESINFECCIÓN CON CLORO	28
3.2.1. Vocabulario de la cloración	28
3.2.2. Modo de acción	28
3.2.3. Principales reacciones	29
3.2.3.1. Cloro gas	29
3.2.3.2. Hipoclorito	30
3.2.4. Otras reacciones	31
3.2.4.1. Hierro y manganeso	31
3.2.4.2. Materia orgánica	32
3.2.4.3. Amoníaco	33
3.2.5. Cloración al punto de quiebre	34

3.2.6. Ventajas y desventajas de la desinfección con cloro	35
3.2.7. Demanda de cloro	36
3.2.8. Dosis de cloro.....	36
3.2.9. Factores que afectan la eficiencia de desinfección	37
3.2.9.1. Tiempo de contacto	37
3.2.9.2. Temperatura	38
3.2.9.3. pH.....	38
3.2.10. Descloración.....	38
3.2.10.1. Dióxido de azufre	38
3.2.10.2. Carbón activado	39
3.2.11. Comparación con otros desinfectantes	39
3.3. PRESENTACIÓN DEL PRODUCTO.....	40
3.3.1. Cloro sólido	40
3.3.1.1. Hipoclorito de sodio	40
3.3.1.2. Hipoclorito de calcio	41
3.3.2. Cloro líquido	41
3.4. CONTENEDORES DE CLORO	42
3.4.1. Cilindros	43
3.4.1.1. De 907 kg	45
3.4.2. Carrotanques.....	46
3.4.3. Instalación de los cilindros.....	47
3.4.4. Transporte y almacenamiento	48
3.5. UNIDADES PARA APLICAR EL CLORO	48
3.5.1. Hipocloradores	49
3.5.2. Cloradores.....	49
3.5.2.1. Cloradores de presión	50
3.5.2.2. Cloradores de vacío	51
3.5.3. Evaporadores	52
3.5.4. Inyección	54
3.5.4.1. Mezcla rápida y difusión	54
3.5.4.2. Difusores del cloro.....	55
3.5.5. Operación de los cloradores.....	56
3.5.5.1. Simple con determinación ocasional de cloro residual	56
3.5.5.2. Con analizador permanente y alarmas.....	57
3.5.5.3. Ajuste de dosis proporcional al flujo tratado (circuito abierto)	58
3.5.5.4. Ajuste proporcional a la demanda (circuito cerrado)	58
3.5.5.5. Ajuste de dosis proporcional tanto a la demanda de cloro como al flujo tratado (circuito compuesto).....	59
3.5.6. Selección del sistema de control	60
3.6. DISEÑO.....	60
3.7. MEDICIÓN DEL CLORO RESIDUAL.....	60
3.7.1. Analizadores automáticos	61
3.7.2. Determinación en campo.....	62
3.8. SEGURIDAD	63
3.8.1. Seguridad inherente al equipo.....	63
3.8.1.1. Válvulas de seguridad	63
3.8.1.2. Equipo y manejo.....	64

3.8.2. Equipo de protección.....	64
3.8.3. Prevenciones y acciones de emergencia	67
3.9. PRIMEROS AUXILIOS.....	69
3.9.1. Efectos fisiológicos del cloro	69
3.9.2. Atención a heridos.....	69
4. OZONO	71
4.1. ESTADO DEL ARTE	71
4.2. USOS DEL OZONO	71
4.2.1. Desinfección.....	72
4.2.2. Oxidación	72
4.2.2.1. Hierro y manganeso	72
4.2.2.2. Olor y sabor.....	73
4.2.2.3. Precursores de trihalometanos.....	73
4.2.3. Pretratamiento.....	73
4.2.3.1. Mejora de la coagulación.....	73
4.2.3.2. Incremento de la biodegradabilidad	73
4.3. REACCIONES DURANTE LA DESINFECCIÓN	74
4.4. VENTAJAS Y DESVENTAJAS DEL USO DE OZONO	75
4.5. GENERADORES DE OZONO	76
4.5.1. Por corona de descarga	76
4.5.1.1. Preparación de gas de alimentación	77
4.5.1.2. Selección y diseño	79
4.5.2. Ejemplos de generadores comerciales de ozono.....	81
4.5.3. Cámaras de contacto y sistemas de difusión	83
4.5.4. Destrucción del gas residual	86
4.6. CRITERIOS DE DISEÑO	87
4.6.1. Pruebas de tratabilidad.....	89
4.6.2. La eficiencia de transferencia de ozono	91
4.7. CONTROL Y MEDIDAS DE SEGURIDAD EN LAS INSTALACIONES DE OZONO	92
4.8. EJEMPLO DEL DISEÑO DE UNA CÁMARA DE CONTACTO PARA DESINFECCIÓN	93
5. LUZ ULTRAVIOLETA.....	102
5.1. CARACTERÍSTICAS.....	102
5.2. PROPIEDADES FÍSICAS Y QUÍMICAS.....	103
5.2.1. Efecto en los microorganismos y modo de acción	103
5.2.1.1. Reactivación.....	104
5.2.2. Interferencias.....	105
5.2.2.1. Efecto de las sustancias que absorben la luz.....	105
5.2.2.2. Efecto de las partículas	107
5.2.3. Dosis del desinfectante	107
5.3. PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO.....	109
5.4. CLASIFICACIÓN DE LAS LÁMPARAS DE MERCURIO	111
5.4.1. Lámparas de baja presión.....	112
5.4.1.1. Características físicas	113

5.4.2. Lámparas de baja presión y alta intensidad	113
5.4.3. Lámparas de presión media	113
5.4.4. Factores que afectan la intensidad de las lámparas	115
5.4.4.1. Tiempo de operación.....	115
5.4.4.2. Calidad del agua	115
5.4.4.3. Temperatura.....	116
5.5. EQUIPOS DE LUZ ULTRAVIOLETA	117
5.5.1. Hidráulica del reactor.....	117
5.5.2. Tipos de equipos	119
5.5.3. Clasificación de acuerdo al tipo de instalación	120
5.5.3.1. Canales abiertos	120
5.5.3.2. Canales cerrados	121
5.5.4. Clasificación de acuerdo con la disposición de las lámparas	121
5.5.4.1. Sistemas horizontales	121
5.5.4.2. Sistemas verticales.....	124
5.5.5. Sistemas comerciales.....	125
5.6. SELECCIÓN DE EQUIPOS DE LUZ ULTRAVIOLETA.....	130
5.6.1. Diseño de un equipo de luz UV	131
5.7. OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO	133
5.7.1. Reemplazo de lámparas.....	133
5.7.2. Limpieza	134
5.7.3. Medidas de seguridad	136
5.8. EJEMPLO PRÁCTICO	137
5.8.1. Métodos.....	138
5.8.2. Resultados	138
5.8.3. Análisis de costos.....	139

INDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Fotografías de las formas más comunes de bacterias: a) cocos con forma esférica, b) bacilos con forma de pequeños bastones y c) espiroquetas con forma espiral.....	8
Figura 1.2. Protozoarios: a, b y c quistes de <i>Entamoeba coli</i> , <i>E. histolytica</i> y <i>Giardia lamblia</i> respectivamente; d y e trofozoitos de <i>E. histolytica</i> y <i>G. lamblia</i>	12
Figura 1.3. Huevos Típicos de Helmintos: a-d) Eclosión de la larva <i>Toxocara spp</i> , e) <i>Trichuris spp</i> , f) <i>Trichosomoide spp</i> , g) <i>Hymenolepis diminuta</i> , h) <i>H. nana</i> , i-l) Eclosión de la larva de <i>Ascaris spp</i>	14
Figura 1.4. Ciclo de vida de <i>Ascaris lumbricoides</i>	17
Figura 1.5. Ley de Chick y las desviaciones comúnmente encontradas	20
Figura 3.1. Distribución del ácido hipocloroso y del hipoclorito en agua a diferentes valores de pH	30
Figura 3.2. Curva obtenida en la cloración a punto de quiebre	34
Figura 3.3. Especies que conforman el cloro total residual	35
Figura 3.4. Recipientes de cloro (a) cilindro, (b) carrotanque.....	42
Figura 3.5. Cilindro de cloro mostrando en su interior los volúmenes de cloro en estado líquido y gaseoso.....	42
Figura 3.6. Tipos de fondos en cilindros para cloro de 68 kg.....	43
Figura 3.7. Fabricación por “spinning” de cilindros para cloro de 68 kg	43
Figura 3.8. Pruebas a las que son sometidos los cilindros para verificar su integridad	44
Figura 3.9. Detalles de los cilindros y forma de embarque.....	44
Figura 3.10. Corte de un cilindro para cloro de 68 kg.....	45
Figura 3.11. Accesorios de un cilindro de 907 kg.....	46
Figura 3.12. Poleas para mover cilindros de 907 kg	48
Figura 3.13. Clasificación de las unidades de suministro de cloro	49
Figura 3.14. Esquema de un aplicador de cloro a presión	50
Figura 3.15. Esquema de un aplicador de cloro al vacío.....	51
Figura 3.16. Dispositivos de control del flujo de cloro	52
Figura 3.17. Instalación de un evaporador	53
Figura 3.18. Sistema de mezclado cloro gas – agua.....	55
Figura 3.19. Difusores para tuberías	55
Figura 3.20. Sistema de difusores.....	56
Figura 3.21. Operación simple con determinación ocasional de cloro residual	57
Figura 3.22. Operación con analizador permanente y alarmas	57
Figura 3.23. Ajuste de dosis proporcional al flujo tratado (circuito abierto)	58
Figura 3.24. Ajuste proporcional a la demanda (circuito cerrado)	59
Figura 3.25. Ajuste de dosis proporcional tanto a la demanda como al flujo tratado (circuito compuesto)	59
Figura 3.26. Corte de las válvulas para cilindros de cloro	64
Figura 3.27. Máscara para gas con tubo respiratorio para colgar en el pecho.....	66
Figura 3.28. Máscara para gas con canister tipo barbilla.	67
Figura 4.1. Generador de ozono de media frecuencia	81
Figura 4.2. Generador de ozono de media frecuencia serie ZF	81
Figura 4.3. Generador de ozono marca Ozonia	82

Figura 4.4. Generador de ozono “ Ikal-ha”	82
Figura 4.5. Cámara de contacto en tres etapas con difusor de burbujas	85
Figura 4.6. Cámara de contacto tipo Kerag.....	85
Figura 4.7. Cámara de contacto con lecho empacado usada en Sipplingen, Alemania	85
Figura 4.8. Cámara de contacto y difusión en tubo profundo “U”	85
Figura 4.9. Cámara de contacto con difusor de plato poroso.....	86
Figura 4.10. Cámara de contacto con difusor de turbina radial sumergida.	86
Figura 4.11. Representación de la velocidad de decremento de ozono.....	90
Figura 4.12. Determinación de la demanda de ozono.....	92
Figura 4.13. Cámara de desinfección de cuatro etapas	95
Figura 4.14. Representación del log $([O_3]/[O_3]_0)$ contra el tiempo, para obtener el coeficiente k	98
Figura 5.1. Espectro Electromagnético	103
Figura 5.2. Espectro electromagnético con escala expandida de la radiación ultravioleta	103
Figura 5.3. Acción germicida de la luz UV sobre las bases nitrogenadas	104
Figura 5.4. Efecto de las partículas en la radiación de luz UV	108
Figura 5.5. Comparación entre una lámpara fluorescente y una germicida.	110
Figura 5.6. Radiación emitida por una lámpara de UV de baja presión	113
Figura 5.7. Radiación relativa de una lámpara de presión media.....	114
Figura 5.8. Intensidad de una lámpara de baja presión en función del tiempo	115
Figura 5.9. Variación de la intensidad en función de la temperatura.....	117
Figura 5.10. Tipos de sistemas de desinfección con luz UV	118
Figura 5.11. Efecto del flujo en la dosis de luz UV	119
Figura 5.12. Esquema de un sistema horizontal de desinfección UV.....	121
Figura 5.13. Módulo de lámparas UV.....	122
Figura 5.14. Estructura de un banco de lámparas de UV.....	123
Figura 5.15. Control de nivel en un sistema horizontal.....	123
Figura 5.16. Esquema de un sistema vertical.....	124
Figura 5.17. (a) Arreglo escalonado; (b) Arreglo uniforme	125
Figura 5.18. Sistema de desinfección UV800	126
Figura 5.19. Sistema UV3000 de <i>Trojan Technologies</i>	126
Figura 5.20. Sistema de desinfección UV4000.....	127
Figura 5.21. Equipo de desinfección (Rex UV systems)	127
Figura 5.22. Equipo de desinfección para agua potable	128
Figura 5.23. Sistema de luz ultravioleta para agua residual.....	128
Figura 5.24. (a) Aquionics <i>In Line</i> 1000, (b) Aquionics <i>In Line</i> 1000 instalado	129
Figura 5.25. Equipo de desinfección con tubos de teflón	129
Figura 5.26. (a) Equipo SWS modelo TH-1C, (b) diseño del equipo SWS.....	130
Figura 5.27. Curva de respuesta de coliformes fecales a diferentes dosis	131
Figura 5.28. Selección de la dosis de desinfección.....	132
Figura 5.29. Curva que relaciona la intensidad promedio con la transmitancia filtrada del agua	132
Figura 5.30. Lámpara con incrustaciones	134
Figura 5.31. Efecto del tamaño de partículas en el grado de desinfección	139

INDICE DE TABLAS

Tabla 1.1. Concentración y dosis infectiva de parásitos comúnmente encontrados en aguas residuales	13
Tabla 1.2. Virus más comúnmente encontrados en aguas contaminadas	15
Tabla 1.3. Bacterias más comúnmente encontrados en aguas contaminadas.....	15
Tabla 1.4. Protozoarios más comúnmente encontrados en aguas contaminadas	16
Tabla 1.5. Helmintos más comúnmente encontrados en aguas contaminadas.....	16
Tabla 2.1. Principales métodos de desinfección	21
Tabla 2.2. Aplicaciones del yodo.....	24
Tabla 2.3. Aplicaciones del bromo	24
Tabla 2.4. Aplicaciones de la plata ionizada	25
Tabla 3.1. Vocabulario específico de la práctica de la cloración	28
Tabla 3.2. Valores de la constante de equilibrio del ácido hipocloroso a diferentes temperaturas	30
Tabla 3.3. Dosis y condiciones de aplicación de cloro para la oxidación de hierro y manganeso.....	32
Tabla 3.4. Ventajas y desventajas de la cloración.....	36
Tabla 3.5. Dosis de cloro aplicadas en plantas potabilizadoras	37
Tabla 3.6. Valores de C/t para diferentes organismos y cloro como desinfectante ...	39
Tabla 3.7. Coeficientes específicos de letalidad de alternativas de desinfectantes*.	40
Tabla 3.8. Preparación de una solución de hipoclorito de sodio al 2%	40
Tabla 3.9. Preparación de una solución de hipoclorito de calcio al 2%.....	41
Tabla 3.10. Especificaciones del código ASME para cilindros de 907 kg	46
Tabla 3.11. Clasificación de aparatos cloradotes	50
Tabla 3.12. Sistemas de control de cloradotes.....	56
Tabla 3.13. Métodos más conocidos para la determinación del cloro residual	61
Tabla 3.14. Equipos e instrumentos para controlar emergencias.....	65
Tabla 3.15. Prevención y acciones en caso de emergencia	68
Tabla 3.16. Preparación y cantidades de solución para absorber el cloro de acuerdo con la capacidad del cilindro dañado	68
Tabla 3.17. Efectos fisiológicos del cloro a diferentes concentraciones.....	70
Tabla 4.1. Dosis de ozono para diversos contaminantes presentes en el agua.....	74
Tabla 4.2. Reacciones directas del ozono molecular	75
Tabla 4.3. Medios desecantes.....	77
Tabla 4.4. Consideraciones de diseño y selección para el secado de gas	78
Tabla 4.5. Características de los compresores utilizados para la alimentación de aire	79
Tabla 4.6. Factores por definir para la alimentación del generador con aire comprimido.....	79
Tabla 4.7. Clasificación de los generadores de ozono por corona de descarga de acuerdo al voltaje	80
Tabla 4.8. Diseño del generador de ozono por corona de descarga.....	80
Tabla 4.9. Tipo de difusor por aplicación.....	83
Tabla 4.10. Aspectos para el diseño de la cámara de contacto	84
Tabla 4.11. Planeación preliminar para un proyecto de ozonación	88
Tabla 4.12. Pre-diseño de un sistema de ozonación.....	88

Tabla 4.13. Consideraciones para el diseño de pruebas de tratabilidad	91
Tabla 4.14. Aspectos de seguridad	93
Tabla 4.15. Aspectos de control	94
Tabla 4.16. Valores de C•t propuestos por la EPA para la inactivación del quiste <i>Giardia</i> con ozono a diferentes valores de temperatura y un intervalo de pH entre 6 y 9	96
Tabla 4.17. Características y dimensiones de la cámara de desinfección primaria	100
Tabla 4.18. Características y dimensiones de la cámara de desinfección secundaria para un residual de 0.4 mg/l en la cuarta etapa	101
Tabla 5.1. Impacto de las características del agua residual en la desinfección con luz UV	106
Tabla 5.2. Factores que afectan la dosis.....	108
Tabla 5.3. Comparación de la sensibilidad de diferentes microorganismos a la desinfección con luz UV	109
Tabla 5.4. Distribución espectral relativa de radiadores ultravioleta.....	111
Tabla 5.5. Clasificación de las lámparas de mercurio	112
Tabla 5.6. Características de los diferentes tipos de lámparas	116
Tabla 5.7. Parámetros medidos en las pruebas de tratabilidad.....	130
Tabla 5.8. Sistemas de limpieza de lámparas UV.....	135
Tabla 5.9. Listado de responsabilidades del supervisor y empleado	136
Tabla 5.10. Parámetros analizados en el estudio de desinfección.....	138
Tabla 5.11. Resumen de los datos de los parámetros medidos en diferentes efluentes	138
Tabla 5.12. Comparación del efecto de aumento en SST y DTP en la concentración de CF aplicando una dosis de 22 mW s/cm ²	138
Tabla 5.13. Conceptos considerados para el cálculo de costos.....	140

INTRODUCCIÓN

En 1855, John Snow, un médico inglés, después de siete años de intensa investigación publicó sus conclusiones sobre cómo el agua podría representar el mecanismo de transmisión de enfermedades tan temibles como el cólera. Aseguraba que la enfermedad era causada por “algún tipo de veneno” del agua potable. Como resultado, los responsables del suministro público iniciaron nuevas y diversas actividades para prevenir enfermedades hídricas; siendo la filtración lenta en arena, una de las primeras. Posteriormente, en la década de 1870, Louis Pasteur y Robert Koch desarrollaron la teoría de que las enfermedades eran causadas por gérmenes. En 1881, Koch encontró que el cloro podía matar bacterias dando inicio a la industria de la desinfección del agua, que está marcada por los siguientes eventos:

- En 1890, se construye la primera planta de generación electrolítica de cloro en Alemania
- En 1898, se registra la primer patente de desinfección con cloro en Estados Unidos
- En 1905, se usa por primera vez la cloración continua en Lincoln, Inglaterra, para controlar una epidemia de tifoidea
- En 1908, Johnson regula el uso de la desinfección en la planta de filtración Bubbley Creek en Chicago, Estados Unidos
- También en 1908, Chick y Watson desarrollaron, de forma independiente, la teoría de la desinfección. La cual establece que el grado de destrucción de patógenos es proporcional al número de ellos y a la concentración del desinfectante.

La desinfección es la destrucción de organismos potencialmente dañinos a niveles que no sean patógenos¹ y, comúnmente, constituye la etapa final de todo tratamiento del agua. Su práctica es aceptada en todo el mundo y, si bien, la cloración es el método dominante, algunos países como Francia (desde 1910), Alemania y Canadá prefieren la desinfección con ozono. Además, otras opciones como la luz ultravioleta (UV), el yodo y la radiación gamma son también empleadas.

Un desinfectante ideal para el agua debe cumplir con:

- Destruir todas las clases de agentes patógenos y en cantidad suficiente
- No ser tóxico para el hombre ni animales domésticos
- No tener un sabor desagradable

¹ Patógenos: Que produce o es capaz de producir enfermedad

- Tener un costo razonable
- Ser de manejo, transporte y almacenamiento accesibles y seguros
- Contrarrestar la posible contaminación en líneas de conducción y tanques de almacenamiento
- No reaccionar con los compuestos presentes en el agua para producir sustancias tóxicas.

En la tabla siguiente se presenta la evaluación de estas características para los desinfectantes más comunes.

Comparación de los diferentes métodos de desinfección.

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

Adaptado de: Metcalf y Eddy, 1991

Actualmente se sabe que los principales contaminantes biológicos del agua son microorganismos patógenos de origen fecal. Siendo la ruta de infección más común la ingestión: cuando algún individuo presenta un cuadro de contagio por bacterias gran cantidad de gérmenes son evacuados en la materia fecal, que al canalizarse en

el drenaje o por exposición directa, crea focos de infección para la población. En la mayoría de los enfermos y a causa de bacterias entéricas² patógenas, existe el estado de **portador sano**, por lo que, en poblaciones donde las infecciones son comunes, una alta porción de individuos sanos excretan elevadas concentraciones de patógenos. Dicho estado de portador sano puede variar desde semanas hasta toda la vida del individuo.

Los organismos patógenos que se encuentran contaminando las aguas son:

- Virus
- Bacterias
- Protozoarios y
- Helmintos

Proviene de desechos humanos que están infectados o que son portadores. Generalmente, causan enfermedades del aparato intestinal como: fiebre tifoidea, paratifoidea, disentería, helmintiasis y cólera, entre muchas otras, y son responsables de un gran número de muertes al año en países con escasos recursos sanitarios, especialmente en zonas tropicales (Mara, 1974 y Feachem *et al.*, 1983). En la siguiente tabla se muestran algunas de las enfermedades infecciosas, en cuya incidencia puede influir el agua.

El agua residual en nuestro país tiene efectos notorios en la salud, como lo demuestra el caso del Valle del Mezquital, donde por el empleo de agua negra sin tratamiento alguno para riego hay una incidencia de enfermedades gastrointestinales en niños 13 veces mayor que para aquellos que radican en zonas, donde se emplea agua tratada (Cifuentes *et al.*, 1993). En el país cada día mueren 13 niños por enfermedades diarreicas (INEGI, 1997).

Por lo anterior, en México se reglamenta la calidad microbiológica del agua. En el caso del consumo humano la **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*” publicada por el diario de la federación el 18 de enero de 1996, fija 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 a aguas y bienes nacionales, así como descargas vertidas a suelo (uso en riego agrícola), la NOM-001-ECOL/96 establece el límite máximo permisible es de 1,000 y 2,000 como número más probable (NMP) de coliformes fecales por cada 100 ml para el promedio

² Entérica: Perteneciente al intestino

mensual y diario, respectivamente. Para determinar la contaminación por parásitos se toma como indicador los huevos de helminto; en este caso se acepta 1 HH/l para riego de todo tipo de cultivo y 5 HH/l para cierto tipo de ellos.

Principales enfermedades relacionadas con el agua

Tipo de relación con el agua	Enfermedad
Ingestión	Cólera Hepatitis infecciosa Leptospirosis Paratifoidea Tularemia Tifoidea
Ingestión o contacto	Disentería amibiana Disentería baciliar Gastroenteritis
Contacto	Ascariasis Conjuntivitis Enfermedades diarreicas Lepra Sarna Sepsis y úlceras de la piel Tiña Tracoma
Sirve para el desarrollo de los microorganismos	Gusano de Guinea Esquistosomiasis
Promueve vectores	Paludismo Oncocercosis Enfermedad del sueño Fiebre amarilla

Fuente: Tebbutt, 1994

De lo anterior se desprende que los **ORGANISMOS OPERADORES DE SISTEMAS DE AGUA POTABLE Y PLANTAS DE TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL** tienen la obligación sanitaria, legal y moral de garantizar la calidad del agua que suministran o que descargan, debiendo poner especial atención al aspecto microbiológico.

OBJETIVO

El presente documento tiene por cometido proporcionar al personal técnico de los sistemas operadores la información necesaria para entender el funcionamiento, revisar la operación o propuesta de diseño de un sistema de desinfección de agua, sea potable o residual. En general trata de presentar:

- La importancia sanitaria tanto del suministro para consumo humano como de las descargas de agua residual.
- Describir las características y sensibilidades a la desinfección de los diferentes agentes biológicos.
- Dar las bases de los principales métodos de desinfección: físicos (filtración, temperatura, sedimentación, radiación, procesos electrolíticos, entre otros) ó químicos (yodo, bromo, plata ionizada, ozono y cloro).
- Describir con detalle los tres procesos de desinfección de mayor importancia, que de acuerdo con el grado de utilización actual son:
 - I. Cloración
 - II. Ozonación
 - III. Luz UV

1. IMPORTANCIA SANITARIA DE LA DESINFECCIÓN Y CONDICIONES GENERALES

El agua para consumo humano puede estar contaminada por diversos microorganismos parásitos³ 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. Se estima que ocurren 1 647 millones de episodios diarreicos por año en menores de cinco años y que cada año son la causa de 5 millones de decesos a nivel mundial.

En México, la tasa de mortalidad por diarreas para niños menores de cinco años corresponde a 33.3 muertes por cada 100 000, lo que representa que diariamente mueren por este concepto 14 niños. En el Valle del Mezquital el riesgo de muerte por diarreas en niños es 13 veces mayor que en el resto del país, por lo que se calcula que ocurren 2 165 defunciones al año y 6 al día (INEGI, 1997 y Cifuentes *et al.*, 1993).

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*), entre muchos, constituyen los agentes que con mayor frecuencia causan diarreas infecciosas. Usualmente estos problemas se encuentran asociados, además, con la desnutrición, agravándola por cuatro diferentes mecanismos:

- **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.

³ Parásitos: Organismo que vive durante toda su existencia o parte de ella, sobre o dentro de otro ser vivo, obteniendo alimento, espacio y protección necesarios para sobrevivir.

- **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 intestinal e incrementar el tiempo de residencia de los patógenos.

1.1. VIRUS

Más de 120 tipos 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 las temperaturas son bajas (< de 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 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.

1.2. BACTERIAS

En las diferentes fuentes de agua (superficiales y subterráneas), puede encontrarse diversos tipos de bacterias, algunas de las cuales son indígenas o nativas, 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 figura 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 enfermedades hídricas. Para evaluar la calidad del agua se realizan pruebas sistemáticas de laboratorio que permiten estimar la magnitud del deterioro y que consisten en determinar indicadores bacteriológicos.

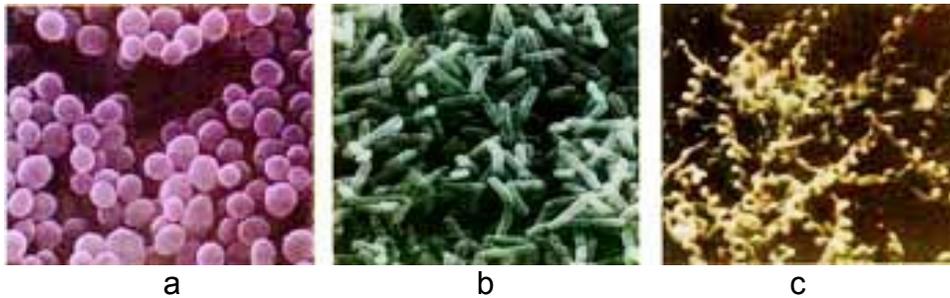


Figura 1.1. Fotografías de las formas más comunes de bacterias: a) cocos con forma esférica, b) bacilos con forma de pequeños bastones y c) espiroquetas con forma espiral

1.2.1. Indicadores bacteriológicos de contaminación

Los indicadores bacteriológicos son organismos de un grupo específico que por su sola presencia demuestran que ha ocurrido algún tipo de contaminación, y en ocasiones, sugieren su origen. En el caso específico del agua demuestran que ha habido introducción de aguas negras. La cantidad y variedad real de bacterias potencialmente patógenas difiere de acuerdo con el área geográfica, el estado de salud de la comunidad, la naturaleza y el grado de tratamiento de los desechos, la capacidad de autopurificación de los cuerpos de agua así como las características físicas y químicas del cuerpo receptor.

Los indicadores son de utilidad ya que un laboratorio normal no cuenta con recursos suficientes (humanos, técnicos y económicos) para realizar de manera sistemática la determinación de patógenos. De hecho, las pruebas de patógenos se justifican únicamente para investigaciones, en brotes epidémicos y otras situaciones específicas. De manera general, un indicador ideal de contaminación por excretas humanas y de animales de sangre caliente debe poseer las siguientes características:

- Ser aplicable a todo tipo de agua
- Estar presente cuando existen bacterias patógenas de origen fecal
- Estar directamente relacionada la cantidad de organismos con el grado de contaminación fecal
- Tener un tiempo de sobrevivencia mayor al de los patógenos entéricos
- Desaparecer rápidamente del agua una vez que han desaparecido los patógenos durante los procesos de autopurificación o de tratamiento
- No reproducirse en el ambiente
- No estar presente en agua potable
- Ser determinado cuantitativamente en forma rutinaria y fácil, sin interferencia de otras bacterias y
- No ser patógeno al hombre o animales.

La determinación de los indicadores de contaminación es de gran utilidad para la:

- Evaluar la calidad del agua para definir su uso (agrícola, doméstico, recreativo, potable, riego de áreas verdes, entre otros)
- Evaluar la eficiencia de plantas potabilizadoras y depuradoras
- Determinar el efecto de agentes tóxicos y orgánicos en la flora bacteriana
- Identificar de fuentes de contaminación
- Realizar diagnósticos relativamente rápidos de calidad bacteriológica del agua

Tradicionalmente, los coliformes totales, los coliformes fecales y los estreptococos fecales son los grupos de bacterias considerados como indicadores para la evaluación de la calidad bacteriológica del agua.

a) Coliformes totales

Las ventajas de los coliformes totales como indicadores son que:

- Su ausencia es evidencia de potabilidad bacteriológica del agua
- La cantidad encontrada es una estimación de la contaminación por desechos fecales y no fecales
- Generalmente se encuentran en mayor cantidad que los patógenos
- Sobreviven por periodos más prolongados que los patógenos
- Son poco nocivos al hombre (generalmente no son patógenos)
- Los procedimientos para su cuantificación en laboratorio son relativamente sencillos.

Cumplen con algunas de las características del indicador ideal, sin embargo, existen desventajas que impiden relacionar de manera directa su concentración con la magnitud y origen de la contaminación principalmente debido a las siguientes características del grupo:

- Algunos miembros del grupo coliforme total están ampliamente distribuidos en la naturaleza en comparación con su presencia en el intestino humano y de animales de sangre caliente.
- Son capaces de reproducirse en el ambiente extraintestinal
- Existen bacterias que interfieren en el análisis
- En cuerpos de agua con ciertas características (por ejemplo, baja temperatura o pH), aún en su ausencia, pueden estar presentes microorganismos patógenos y oportunistas como *Pseudomona*, virus entéricos y otros parásitos

Debido a estas desventajas, puede decirse que en aguas residuales los coliformes totales tienen poco significado sanitario, sin embargo, pueden ser útiles para evaluar la eficiencia de procesos de desinfección.

b) Coliformes fecales

Se encuentran normalmente en el intestino humano, y son descargadas en gran número con las heces. Por lo tanto las densidades encontradas son proporcionales al contenido de heces en el agua. La presencia de los coliformes fecales indica la posible existencia de bacterias patógenas al hombre.

Los coliformes fecales se definen como todos los bacilos⁴ cortos que difieren del grupo coliforme total por su capacidad de crecer a una mayor temperatura. Desde el punto de vista de la salud este grupo es mucho más importante, dado que se relaciona con la probabilidad de encontrar patógenos excretados. Sin embargo, sólo los coliformes totales son considerados como específicos para confirmar la calidad de agua para consumo humano.

El grupo coliforme fecal constituye aproximadamente el 90 % de los totales contenidos en excretas e incluye a *Escherichia coli* y algunas cepas de *Klebsiella pneumoniae*. Las ventajas de este grupo como indicador son:

- El 95 % dan una respuesta positiva a la prueba de temperatura
- Pueden estar ausentes, si la contaminación no es de origen fecal
- Sobreviven menos tiempo que los totales por lo que permiten suponer contaminación reciente si se encuentran en altas concentraciones
- Son más exigentes que los coliformes totales para reproducirse en el ambiente extraintestinal
- Los procedimientos de laboratorio para su cuantificación son relativamente sencillos. Sin embargo, algunas cepas dan respuesta negativa a la prueba de temperatura en el laboratorio.
- Tienen la capacidad de reproducirse en aguas ricas en nutrimentos, en sedimentos y aún en aguas poco contaminadas; algunas cepas de *Escherichia coli* sobreviven menos tiempo que *Salmonella* en aguas a bajas temperaturas y otras son patógenas al hombre.

c) Estreptococo fecales

Se encuentran donde ha habido actividad humana (agrícola y pecuaria, principalmente). Sobreviven menos tiempo que los coliformes totales y fecales, por lo que son un buen indicador de contaminación reciente. Debido a que las excretas humanas contienen concentraciones menores de estos organismos en comparación

⁴ Bacilo: cualquier bacteria en forma de bastoncillo.

con las de otros animales de sangre caliente, su cuantificación permite diferenciar el origen de la contaminación fecal.

d) Otros indicadores bacteriológicos

Se emplean con fines específicos, tales como:

**Investigación
Evaluación de sistemas de tratamiento
Problemas de diagnóstico y
Determinación de la efectividad de desinfectantes**

Un ejemplo de ello es *Pseudomonas aeruginosa* que sirve como indicador de la eficiencia de desinfección, y para evaluar la calidad del agua de albercas, debido a su gran resistencia al cloro. *Pseudomonas* es una bacteria patógena oportunista, cuyo contagio no ocurre por ingestión, sino por el contacto con aerosoles. Y en algunos países, como Alemania, se exige su determinación en aguas potables y de mesa.

1.3. PROTOZOARIOS

Los protozoarios incluyen actualmente varios grupos de importancia médica, pueden infectar y causan principalmente enfermedades de tipo gastroentérico. Por ejemplo, para 1998 en México, se reportaron 1 257 245 casos de amibiasis intestinal. También pueden provocar abscesos hepáticos (*Entamoeba histolytica*), los cuales para el mismo año fueron de 4 661 casos de meningoencefalitis (*Naegleria fawleri*). Existen tres grupos de protozoarios: flagelados, sarcodinos y ciliados (Figura 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 % y 15.9 % 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 hemorragia 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 individuos.

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

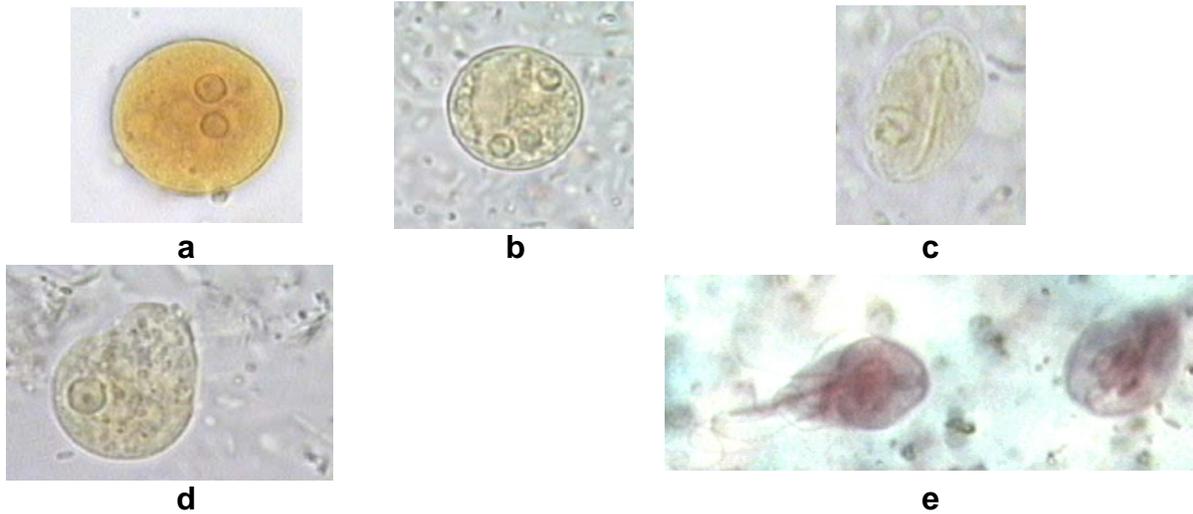


Figura 1.2. Protozoarios: a, b y c quistes de *Entamoeba coli*, *E. histolytica* y *Giardia lamblia* respectivamente; d y e trofozoitos de *E. histolytica* y *G. lamblia*

1.4. HELMINTOS

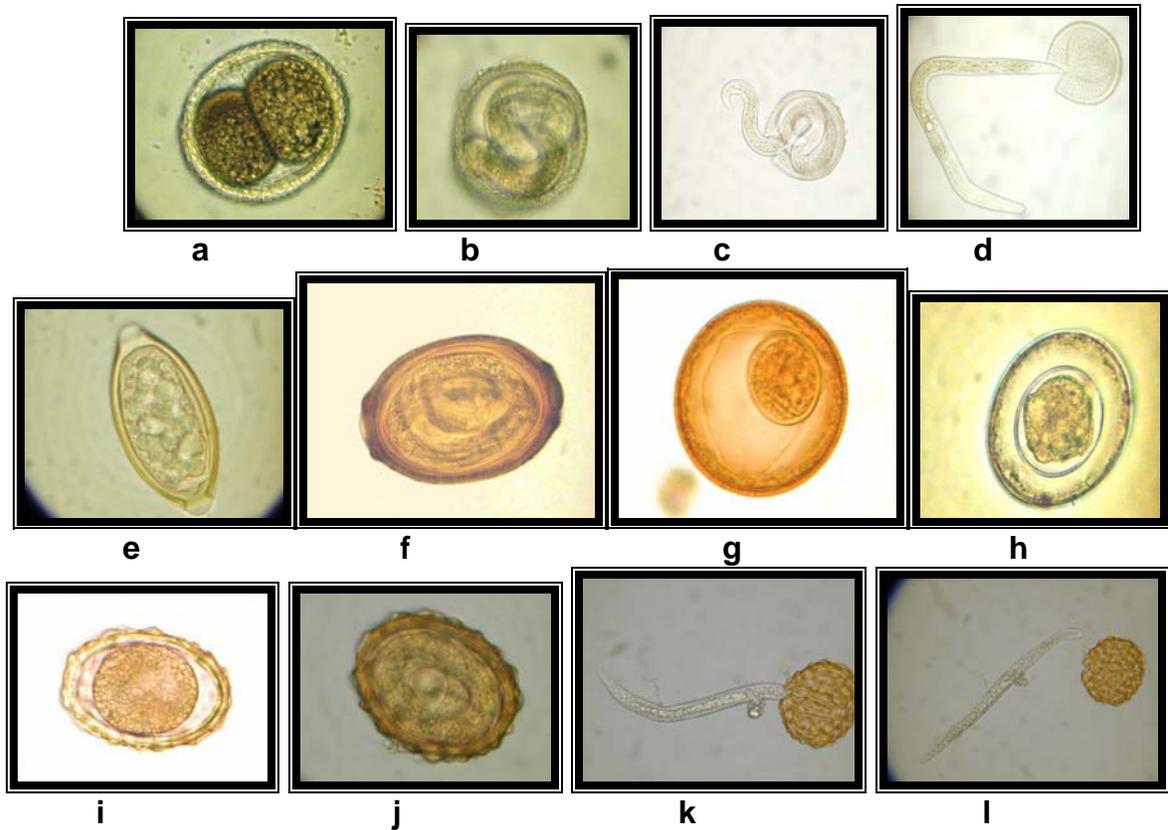
Son gusanos parásitos intestinales de los que destacan *Ascaris lumbricoides*, *Trichuris trichiura*, *Hymenolepis diminuta*, *H. nana*, *Toxocara spp* y *Taenia solium* (Figura 1.3). La mayoría de los helmintos no se multiplican dentro de su huésped, por lo que la severidad de su infección está asociada 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 infecciones causadas por virus, bacterias y protozoarios; las cuales causan una infección severa por unos cuantos días, después de haber ingerido una sola dosis infectante. La tabla 1.1 muestra la concentración de parásitos comúnmente encontrados en aguas residuales y su dosis infectiva.

Tabla 1.1. Concentración y dosis infectiva de parásitos comúnmente encontrados en aguas residuales

Patógeno	Género y especie	Concentración (número/ 100 ml)	Dosis infectiva
Virus	Rotavirus (4 tipos) Poliovirus (3 tipos) Enterovirus (72 tipos) Astrovirus (5 tipos) Norwalk agente Calicivirus (2 tipos)	100 – 50 000	1 - 10
Bacterias	Salmonella typhi Vibrio cholerae Shigella flexneri Salmonella paratyphi Campylobacter jejune Clostridium perfringens Clostridium difficile Yersinia enterocolitica <i>Escherichia coli</i> (enteropatógena) Naegleria fowleri	$10^4 - 10^7$	$10^3 - 10^4$
Protozoarios	Entamoeba histolytica Entamoeba coli Giardia lamblia Balantidium coli Cryptosporidium parvum Toxoplasma gondii	$10 - 10^4$	< 10
Helmintos	Hymenolepis nana Hymenolepis diminuta Taenia solium Taenia saginata Ascaris lumbricoides Trichuris trichiura Ancylostoma duodenale Necator americanus Toxocaris canis Strongiloides stercoralis Enterobius vermicularis	2 – 800 **	1 - 10

** Número de huevos de helminto por litro

Adaptado de: Feachem *et al.*, 1983



**Figura 1.3. Huevos Típicos de Helmintos: a-d) Eclosión de la larva *Toxocara spp*, e) *Trichuris spp*, f) *Trichosomoide spp*, g) *Hymenolepis diminuta*, h) *H. nana*, i-l) Eclosión de la larva de *Ascaris spp*
 ARCHIVO FOTOGRÁFICO DEL GTR, UNAM**

De la tabla 1.2 a la tabla 1.5 se muestran los patógenos más comúnmente encontrados en agua contaminada, la enfermedad que ocasionan y la localización en el huésped.

Tabla 1.2. Virus más comúnmente encontrados en aguas contaminadas

Parásito y Enfermedad	Localización en el Huésped
Enterovirus (72 tipos) polio, echo, coxsackie, nuevo enterovirus).	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).
Hepatitis A Virus Infecciones hepáticas	La hepatitis viral infecciosa es una enfermedad generalizada que primero afecta al hígado.
Adenovirus (47 tipos) Gastroenteritis	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.
Rotavirus (3 grupos) Gastroenteritis	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.
Norwalk agente Gastroenteritis	Importante causa de brotes de enfermedad diarreica y con vómito en niños, adolescentes y adultos.
Astrovirus (5 tipos) Gastroenteritis	Casos y brotes ocasionales de diarreas en lactantes, niños pequeños y personas de edad avanzada.
Calicivirus (2 tipos) Gastroenteritis	Casos y brotes esporádicos de diarreas en lactantes, niños pequeños y personas de edad avanzada.

Fuente: Jawetz *et al.*, 1996

Tabla 1.3. Bacterias más comúnmente encontrados en aguas contaminadas

Parásito y Enfermedad	Localización en el Huésped
Shigella dysenteriae 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.
Salmonella paratyphi A y B 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.
Vibro cholerae 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</i> (enteropatógena) Gastroenteritis	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.
Clostridium difficile Disentería	Causa diarrea y daños de las células epiteliales. Inflama el colon. Inicia con diarrea abrupta y sanguinolenta y fiebre.
Yersinia enterocolitica 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 en piernas, por debajo de las rodillas, dolorosas y de color rosado a azulado.

Tabla 1.4. Protozoarios más comúnmente encontrados en aguas contaminadas

Parásito y Enfermedad	Localización en el Huésped
Entamoeba histolytica Amebiasis	Enfermedad de mayor incidencia a nivel mundial. Se manifiesta por diarrea, dolor abdominal, pérdida de peso y fiebre. Puede dar origen a colitis fulminante, perforación y abscesos hepáticos.
Giardia lamblia 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.
Balantidium coli 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, presencia de moco sanguinolento.
Naegleia fowleri Meningoencefalitis amebiana primaria	Se caracteriza por un cuadro clínico agudo y hemorrágico capaz de provocar una muerte fulminante en hombre y animales, a los tres días de haber adquirido la infección.
Cryptosporidium Cryptosporidiosis	Se localiza en el aparato digestivo. Ocasiona diarrea leve, llegando a ser en ocasiones grave y prolongada.

Tabla 1.5. Helmintos más comúnmente encontrados en aguas contaminadas

Parásito y Enfermedad	Localización en el Huésped
Enterobius vermicularis 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.
Ascaris lumbricoides 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 el 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 (figura 1.4).
Trichuris trichiura	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.
Taenia solium Teniasis Cisticercosis	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.
Hymenolepis nana Hymenolepiasis	Ocasiona la destrucción de vellosidades, irritación de la mucosa intestinal, cuadros de dolor abdominal y de cabeza, falta de apetito y diarrea intensa, particularmente en niños.

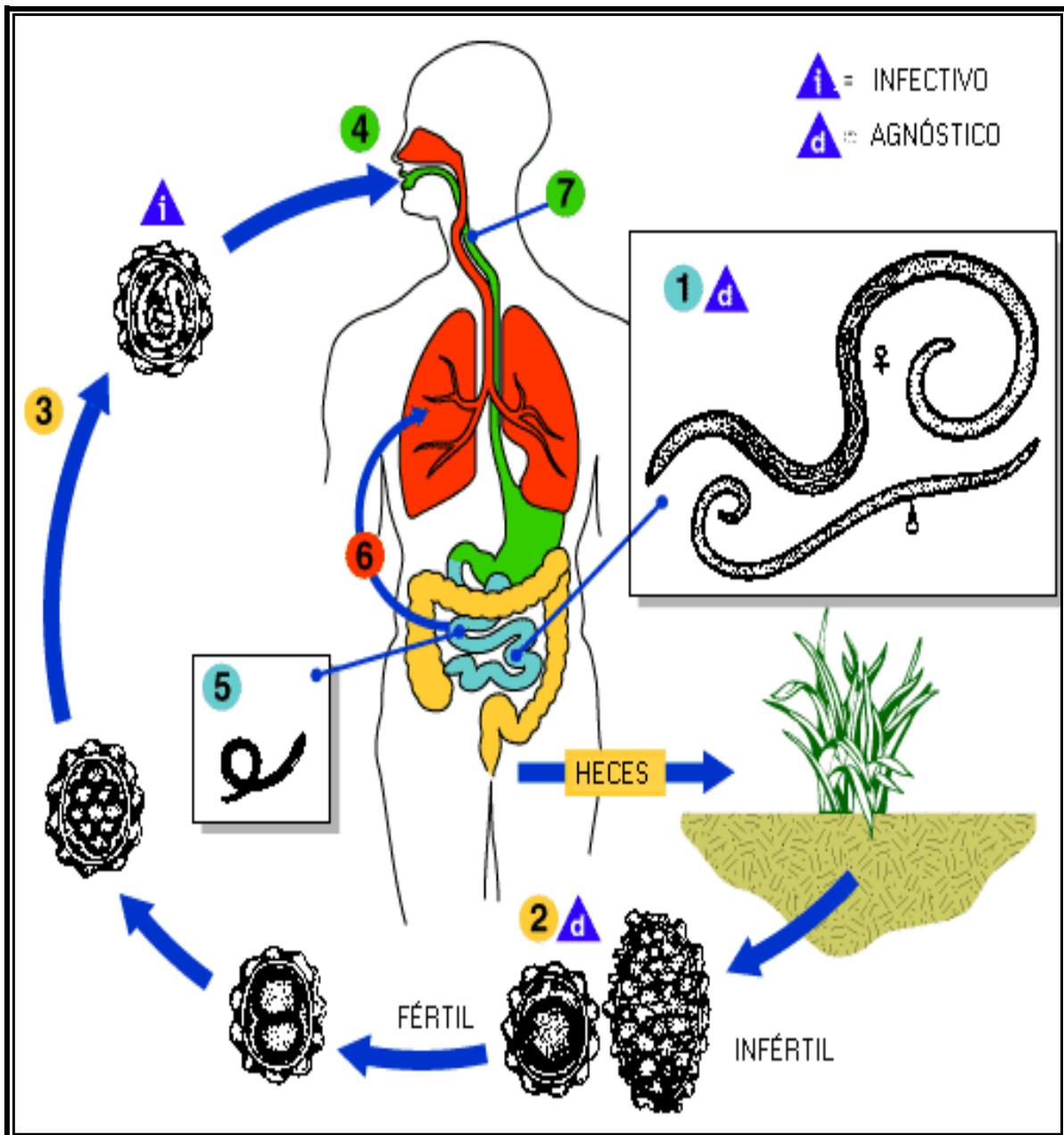


Figura 1.4.Ciclo de vida de *Ascaris lumbricoides*

1.5. CONDICIONES GENERALES PARA LA DESINFECCIÓN

En este apartado se describirán los factores más importantes y comunes de cualquier proceso de desinfección, como lo son

- Tiempo de contacto
- Tipo y concentración del agente químico
- Intensidad y naturaleza del agente físico
- Temperatura

- Número de microorganismos
- Naturaleza del agua

1.5.1. Tiempo de contacto

Probablemente sea 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

$$\frac{dN}{dt} = -kN_t \quad (1.1)$$

donde

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 es 0, la ecuación 1.1 queda

$$\frac{N_t}{N_0} = e^{-kt} \quad (1.2)$$

$$\ln \frac{N_t}{N_0} = -kt \quad (1.3)$$

En algunos casos las velocidades de inactivación aumentan con el tiempo de contacto mientras que en otros es lo contrario.

1.5.2. 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

$$C^n t_p = \text{constante} \quad (1.4)$$

donde

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. 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.

1.5.3. Intensidad y naturales 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 la 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.

1.5.4. Temperatura

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

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

donde

t_1, t_2 : tiempo para inactivar un porcentaje dado de la población a las temperaturas T_1 y T_2 ($^{\circ}\text{K}$)

E : energía de activación (J/mol)

R : constante de los gases 8.314 (J/mol $^{\circ}\text{K}$)

1.5.5. 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

$$N_t = N_0 e^{-kt} \quad (1.6)$$

donde

N_0 : número de microorganismos al tiempo 0

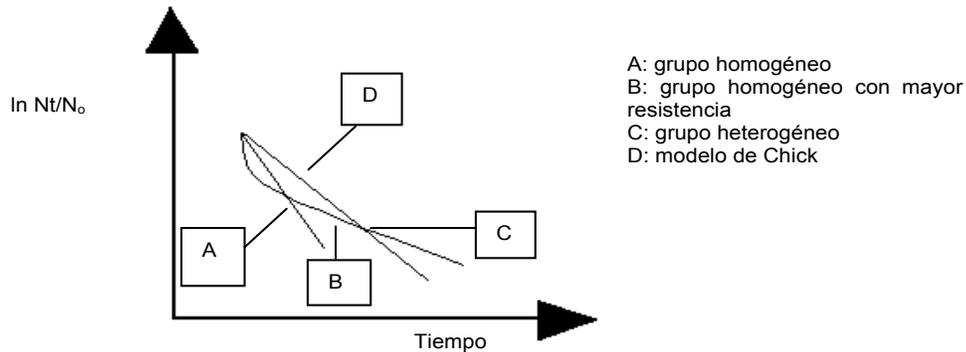
N_t : número de microorganismos al tiempo t

t : tiempo

k : constante de destrucción (t^{-1})

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

- 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



Fuente: Bitton, 1994

Figura 1.5. Ley de Chick y las desviaciones comúnmente encontradas

De acuerdo con las relaciones anteriores se puede decir que a mayor concentración de microorganismos, mayor tiempo se requerirá para inactivarlos. Una relación empírica se da a continuación para referir esto

$$C^q N_p = \text{constante} \quad (1.7)$$

donde:

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

1.5.6. Tipo de microorganismo

La eficiencia de los diferentes agentes de desinfección es afectada por la naturaleza y condición de los microorganismos. Por ejemplo, las bacterias en crecimiento son inactivadas fácilmente, mientras que las esporuladas son muy resistentes. En estos casos es recomendable utilizar otros agentes desinfectantes.

1.5.7. 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.

2. MÉTODOS DE DESINFECCIÓN

La desinfección dentro de los sistemas de tratamiento de agua potable y residual sirve para destruir microorganismos capaces de causar enfermedades de origen hídrico y es considerada como el mecanismo esencial para proteger a los seres humanos de la posible exposición a focos infecciosos por este medio.

Llevar a cabo la desinfección del agua es muy importante. La elección del tipo de proceso se hace con base en los costos, la eficiencia y posible automatización. La desinfección se puede realizar por aplicación de calor, luz, agentes químicos oxidantes, ácidos y álcalis, iones metálicos o contacto con superficies activadas químicamente. Los procesos por los cuales los organismos patógenos pueden ser dañados se clasifican como físicos o químicos. La tabla 2.1 indica los principales métodos que existen.

Tabla 2.1. Principales métodos de desinfección

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

2.1. 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 (Singh, 1990). Los más aplicados son los siguientes:

2.1.1. Filtración

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. Este proceso además disminuye la carga de sólidos y material coloidal en el agua, remueve las partículas y materia coloidal no sedimentables. Se aplica solo o combinado después de la floculación biológica o química (Jiménez, 1995). Dependiendo de la forma en que los sólidos son retenidos se conocen tres tipos principales de filtración: superficial (membranas) y a profundidad. En función de la velocidad de paso del agua se conocen los filtros lentos (<1 m/h) y los rápidos (>2 m/h). De las diversas variantes los que se emplean específicamente para remover patógenos son los **filtros lentos** de arena para agua potable y los **procesos de membranas** en agua residual y potable, donde destaca la nanofiltración.

2.1.2. Temperatura

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. Sedimentación

Es el proceso por el cual se realiza la decantación de materiales en suspensión por acción de la gravedad. La decantación natural del material fino, entre ellos, limo y arcillas ayuda a la remoción de las bacterias, siendo eliminados más rápidamente los esporulados y los huevos de helminto. Su eficiencia depende del tiempo de retención y el sistema de flujo en el sistema. Los sistemas de tratamiento que se emplean para desinfectar casi exclusivamente agua residual, son los embalses, las lagunas de maduración y el tratamiento primario avanzado. Este último sólo remueve huevos de helminto y no patógenos de menor tamaño y densidad.

2.1.4. 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 (ARN⁵) y al ácido desoxirribonucleico (ADN⁶) 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. Mayor detalle sobre la luz UV se encuentra en el capítulo 5.

⁵ Ácido ribonucleico: 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. Se abrevia ARN.

⁶ Ácido desoxirribonucleico: ácido nucleico que se encuentra principalmente en el núcleo de la célula. Contiene la información del código genético del organismo. Se abrevia ADN.

2.1.5. Radiación gamma

Tiene un efecto ionizante (con un alto poder de penetración que no es afectado por la presencia de materia orgánica). Sin embargo, el costo de producción, así como la seguridad de su manejo son una fuerte limitación (Cáceres, 1990).

2.1.6. Procesos electrolíticos

Consiste 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 (Cáceres, 1990).

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); algunos ejemplos son:

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% de *Escherichia coli* en un minuto y de quistes de amebas en 100 minutos (Caceres, 1990). Su desventaja radica en que su aplicación requiere el uso de un neutralizante, resultando 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.

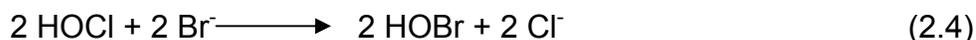
Tabla 2.2. Aplicaciones del yodo

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

Adaptado de: Caceres ,1990

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 ión 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). En la tabla 2.3 se presentan sus aplicaciones

Tabla 2.3. Aplicaciones del bromo

Desinfectante	Aplicación	Observaciones
Bromo	-Desinfección de albercas	Tiene propiedades algicidas

Adaptado de: Caceres, 1990

2.2.3. Plata ionizada

Su acción desinfectante es bastante enérgica y no imparte al agua sabores u olores desagradables. Es un proceso con un alto costo, inoperante para grandes flujos. Se recomienda para desinfectar albercas donde se añade en forma coloidal o iónica. Ocasionalmente, se emplea en filtros purificadores caseros y en gotas para desinfectar agua en casas. En la tabla 2.4 se presentan algunas de sus aplicaciones

Tabla 2.4. Aplicaciones de la plata ionizada

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

Adaptado de: Cáceres, 1990

2.2.4. 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 % 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 destrucción es diferente. El ozono mata a las bacterias por ruptura de la membrana celular (Nebel, 1982). Tiene un gran poder de destrucción 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). El ozono es tratado en este texto en el capítulo 4.

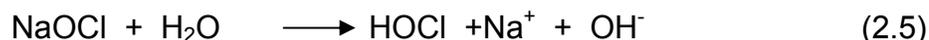
2.2.5. Cloro

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. Mayor detalle se encuentra en el capítulo 3.

2.2.5.1. 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

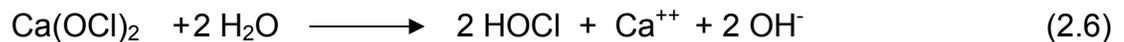


La ecuación 2.5 es muy similar a la hidrólisis del cloro gaseoso. Sin embargo, en ésta se produce un ión hidroxilo, el cual incrementa el pH del agua.

Soluciones diluidas de hipoclorito de sodio (menores que 1 %) pueden ser generadas electroquímicamente a partir de una solución de sal. Generalmente, las soluciones de grado industrial y comercial (blanqueadores de ropa) tienen un contenido de hipoclorito del 10 al 16 %. El principal problema es que son inestables y su descomposición depende de la concentración del hipoclorito, la temperatura de almacenamiento, tiempo, las impurezas y la exposición a la luz. La descomposición del hipoclorito 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 (cal) e hidróxido de sodio. Se presenta en estado sólido, ya sea en forma granular de color blanquecino con 30 a 70 % de cloro activo, o bien, como tabletas (con 70 %). La reacción del hipoclorito de calcio con el agua es como sigue



La ecuación 2.6 muestra que la aplicación del hipoclorito de calcio al agua produce también ácido hipocloroso lo que incrementa 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 últimos, se encuentran limitados debido a su mayor costo.

3. CLORO

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 depuración 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 destrucción del ácido sulfhídrico, 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% de los procesos, Huebner, 1996) y en el país. Lo anterior también contribuye 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 tratamiento; característica, que ningún otro método común de desinfección posee.

3.1. CARACTERÍSTICAS

El cloro, en condiciones ambientales de presión y temperatura, es un gas amarillo verdoso, con olor irritante característico. Puede licuarse fácilmente mediante compresión. 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 (Droste, 1990).

El cloro es ligeramente soluble en agua (a 1 atm y 20 °C se disuelve en 10 000 mg/l, 1 % de concentración). Sus principales características a presión atmosférica son:

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

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 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.

3.2. DESINFECCIÓN CON CLORO

3.2.1. Vocabulario de la cloración

La práctica de la cloración ha generado un vocabulario específico, en la tabla 3.1 se indican los términos más comunes. Algunos de ellos serán vistos con mayor detalle posteriormente.

Tabla 3.1. Vocabulario específico de la práctica de la cloración

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, ión 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 y/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.

3.2.2. Modo de acción

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, Berg *et al.*, 1986). 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.

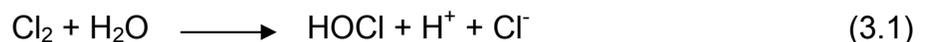
También es importante considerar que cuando las bacterias como los estafilococos forman grupos aquéllas que se encuentren en el interior estarán protegidas. Por ello, para que el cloro, y en general cualquier desinfectante actúe, los microorganismos deben estar distribuidos uniforme y libremente en el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

3.2.3. 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.

3.2.3.1. Cloro gas

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



Cuya constante de equilibrio a 25 °C es:

$$k = \frac{[H^+][Cl^-][HOCl]}{[Cl_2]} = 4.5 \times 10^{-4} \quad (3.2)$$

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 ión hidronio



La constante de ionización de esta reacción a 25 °C está dada por la ecuación 3.4 y su variación con respecto a la temperatura se muestra en la tabla 3.2.

$$k_i = \frac{[H^+][OCl^-]}{[HOCl]} = 2.9 \times 10^{-8} \quad (3.4)$$

Tabla 3.2. Valores de la constante de equilibrio del ácido hipocloroso a diferentes temperaturas

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

Fuente: Metcalf y Eddy, 1996

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 (Figura 3.1). La suma del HOCl y del OCl^- es el llamado **cloro libre residual**.

Debido a que la eficiencia de desinfección del HOCl es de 40 a 80 veces mayor que la del OCl^- , se prefiere la cloración a pH's ácidos.

3.2.3.2. Hipoclorito

El cloro también está disponible en sólido o solución. La solución de hipoclorito de sodio es la más común, mientras que en estado sólido lo usual es el hipoclorito de calcio.

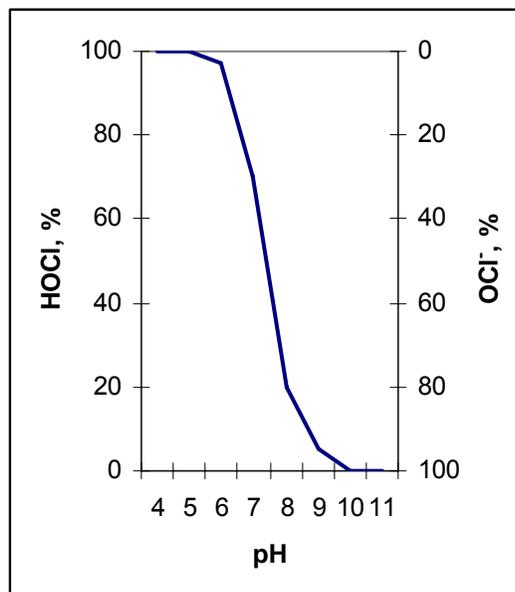
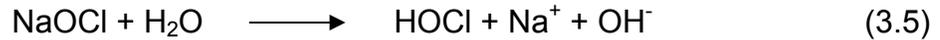


Figura 3.1. Distribución del ácido hipocloroso y del hipoclorito en agua a diferentes valores de pH

- **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



Esta reacción produce ácido hipocloroso similar al producido en la reacción de hidrólisis del cloro gas (ecuación 3.1). 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.

- **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



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.

3.2.4. 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.

3.2.4.1. Hierro y manganeso

Uno de los principales usos del cloro es la oxidación del hierro y manganeso. En la tabla 3.3 se presentan las dosis y condiciones en las que se lleva a cabo esta reacción.

Tabla 3.3. Dosis y condiciones de aplicación de cloro para la oxidación de hierro y manganeso

	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

Fuente: EPA Guidance Manual, 1999

3.2.4.2. Materia orgánica

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



La materia orgánica se encuentra en forma natural en el agua de suministro por la presencia de ácido 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 (CH₄), de cuya molécula son sustituidos tres átomos de hidrógeno por igual número de halógenos (cloro, bromo y/o yodo). La sustitución puede ser hecha por un solo compuesto, por ejemplo, triclorometano, o por una mezcla como en el bromodichlorometano. Algunos de ellos poseen nombres especiales como: cloroformo (CHCl₃), bromoformo (CHBr₃) y yodoformo (CHI₃). Siendo el de más ocurrencia y por ende más estudiado el cloroformo (Ayotte *et al.*, 1988).

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

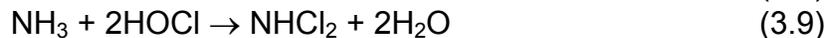
dosis de cloro, demostraron que al variar la temperatura entre 3 y 40 °C, la concentración de cloroformo aumenta de 30 a 200 µg/l.

- **pH.** La formación de THM es mayor conforme aumenta el pH del agua, por su acción catalítica sobre el haloformo.
- Los **sólidos suspendidos.** Reduce 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.

3.2.4.3. Amoniacó

El amoniacó 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



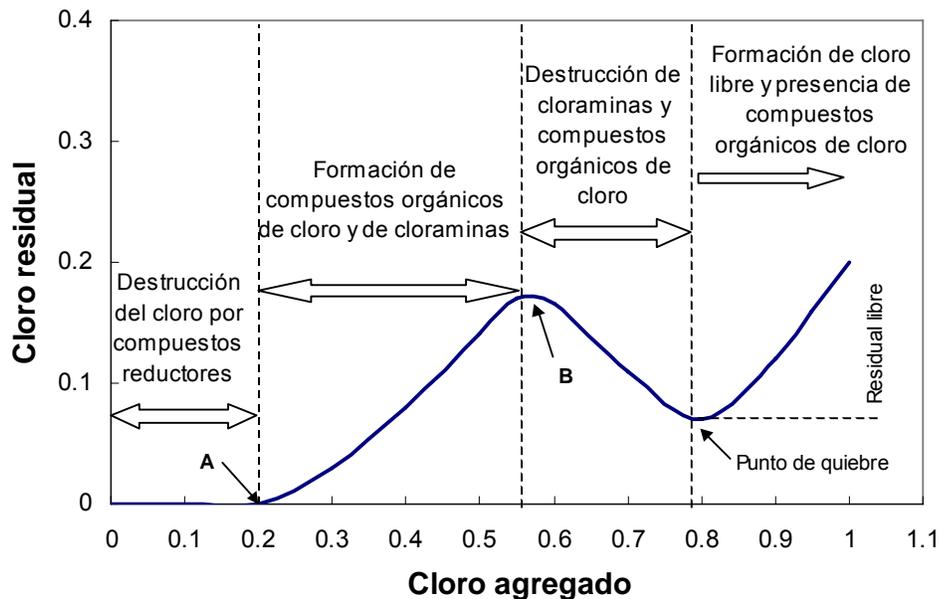
Estas reacciones dependen de factores tales como el pH, la temperatura, el tiempo de contacto y de las cantidades presentes de cada compuesto. Las especies predominantes, en la mayoría de los casos, son las monocloraminas (NH₂Cl) y las dicloraminas (NHCl₂), compuestos que en conjunto se denominan **cloro residual combinado** (Metcalf y Eddy, 1991; Peavy *et al.*, 1985).

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 mg/l de cloraminas para inactivar el 90% 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.

3.2.5. 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 figura 3.2 muestra una curva típica para ello (Metcalf y Eddy, 1991).



Fuente: Hilleboe, 1994

Figura 3.2. Curva obtenida en la cloración a punto de quiebre

Conforme el cloro es añadido, reacciona con la materia oxidable y así todo se reduce a ión 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 nítrico (N_2O) y nitrógeno (N_2) y el cloro se reduce a ión 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 (Metcalf y Eddy, 1991). En la figura 3.3 se muestra la distribución del cloro en el agua residual.

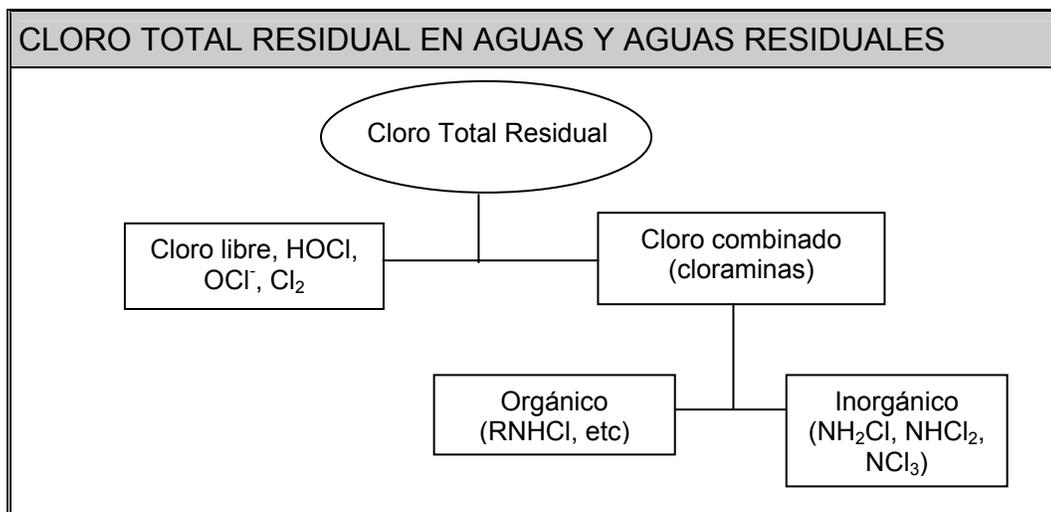


Figura 3.3. Especies que conforman el cloro total residual

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.

3.2.6. Ventajas y desventajas de la desinfección con cloro

La tabla 3.4 resume las ventajas e inconvenientes del proceso de cloración.

Tabla 3.4. 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

3.2.7. 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 mg/l, o 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:

- 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.

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.

3.2.8. 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:

- 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, NH₂Cl) 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.

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 mg/l para agua potable al final del período de contacto o la destrucción total o parcial de patógenos según requiera la norma (1000 NMP/1000 ml de coliformes fecales para agua de riego según la NOM-001-ECOL-96). Por ejemplo, en la tabla 3.5 se presentan las dosis típicas de cloro (en sus diferentes formas) usadas en plantas potabilizadoras.

Tabla 3.5. Dosis de cloro aplicadas en plantas potabilizadoras

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

Fuente: EPA, 1999

3.2.9. Factores que afectan la eficiencia de desinfección

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

3.2.9.1. 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.

3.2.9.2. Temperatura

La destrucción 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.

3.2.9.3. 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 mg/l de cloro residual combinado causa un efecto letal al 100 % de bacterias. A la misma temperatura y para lograr el mismo efecto, el cloro residual combinado debe aumentarse hasta 0.6 mg/l a pH de 7.0 y hasta 1.2 mg/l a pH de 8.5.

3.2.10. 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.

3.2.10.1. Dióxido de azufre

Este compuesto en estado gaseoso, remueve sucesivamente cloro libre, monocloraminas, dicloraminas, tricloruro de nitrógeno y compuestos policlorados. En la práctica se ha encontrado que se requieren cerca de 1.0 mg/l de dióxido de azufre para eliminar 1.0 mg/l 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 y Eddy, 1991).

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.

3.2.10.2. 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 y Eddy, 1991).

3.2.11. Comparación con otros desinfectantes

La efectividad de un desinfectante puede ser expresada como C/t, dónde 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 tabla 3.6 y pueden ser obtenidos en función de la temperatura y pH, con el polinomio

$$C/t = aC^b * pH^c * T^d \quad (3.11)$$

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

Tabla 3.6. 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

La tabla 3.7 muestra los coeficientes de letalidad para diferentes desinfectantes en especial para los derivados de cloro y es una forma rápida de comparar desinfectantes así como de analizar la sensibilidad relativa de diversas especies.

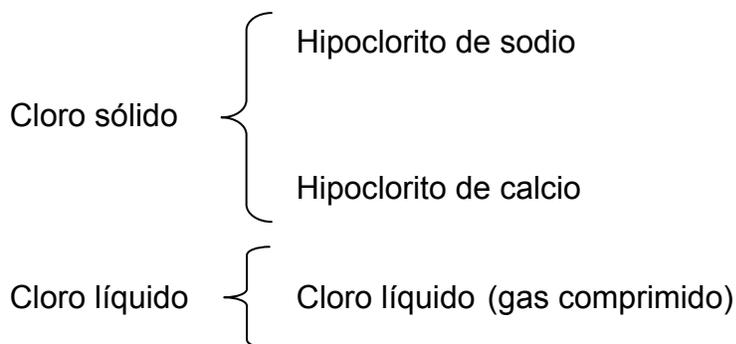
Tabla 3.7. Coeficientes específicos de letalidad de alternativas de desinfectantes*

Desinfectante	Bacterias entéricas	Virus	Esporas	Quistes de amebas
O ₃	500	5	2	0.5
ClO ₂	10	1.5	0.6	0.1
CoI	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/(mg/l x min), asumiendo que el coeficiente de dilución es igual a 1

3.3. PRESENTACIÓN DEL PRODUCTO

El cloro se encuentra en las siguientes presentaciones comerciales:



A continuación se describe con mayor detalle las presentaciones más comunes.

3.3.1. Cloro sólido

3.3.1.1. 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 % en peso.

La preparación de una solución de hipoclorito de sodio al 2% a partir de hipoclorito de sodio comercial (contenido de cloro activo del 13%) se presenta en la tabla 3.8.

Tabla 3.8. Preparación de una solución de hipoclorito de sodio al 2%

Volumen a preparar (l)	Volumen de hipoclorito de sodio (l)
50	7.5
100	15
200	30
500	75
1000	150

3.3.1.2. 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 %.

Se suministra en dos presentaciones. La primera y más común tiene una apariencia granular. Es de color blanquecino y se envasa en cuñetes de 45.36 kg, 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 %.

La preparación de una solución de hipoclorito de calcio al 2% a partir de hipoclorito de calcio comercial (70% de cloro activo) se presenta en la tabla 3.9.

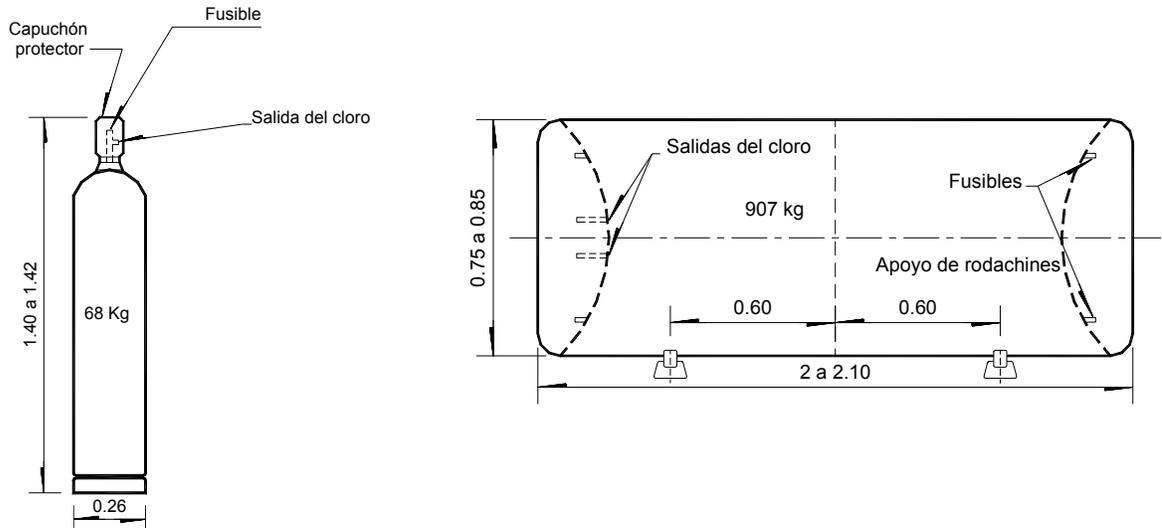
Tabla 3.9. Preparación de una solución de hipoclorito de calcio al 2%

Volumen a preparar (L)	Peso de hipoclorito de calcio (kg)
50	1.4
100	2.9
200	5.8
500	14.5
1000	29.0

3.3.2. 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 0 907 kg. El cloro líquido, también se distribuye en carrotanques especiales de 10, 15, 20 o más toneladas (Figura 3.4). Contiene, para efectos prácticos, un 100 % de cloro activo.

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



Acotaciones en metros

(a) (b)
Figura 3.4. Recipientes de cloro (a) cilindro, (b) carrotanque

3.4. CONTENEDORES DE CLORO

El cloro líquido en realidad se encuentra presente en los cilindros o en los carrotanques en dos estados: líquido (85%) y gas (15%) (Figura 3.5). La proporción de cada uno varía con la temperatura ambiente: a menor temperatura, menor es el volumen de gas.

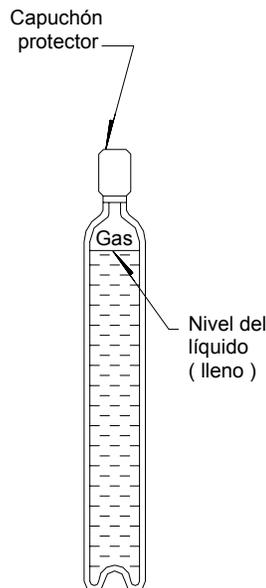


Figura 3.5. Cilindro de cloro mostrando en su interior los volúmenes de cloro en estado líquido y gaseoso

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

3.4.1. Cilindros

Se construyen sin costuras y el fondo puede ser de dos tipos: de anillo o sumergido (Figura 3.6). Se fabrican mediante el proceso conocido como de rechazo (**spinning**) el cual se ilustra en la figura 3.7 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 (Figura 3.8).

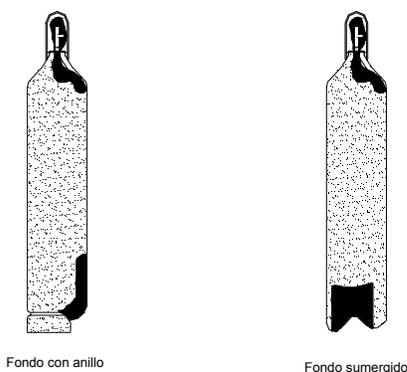


Figura 3.6. Tipos de fondos en cilindros para cloro de 68 kg

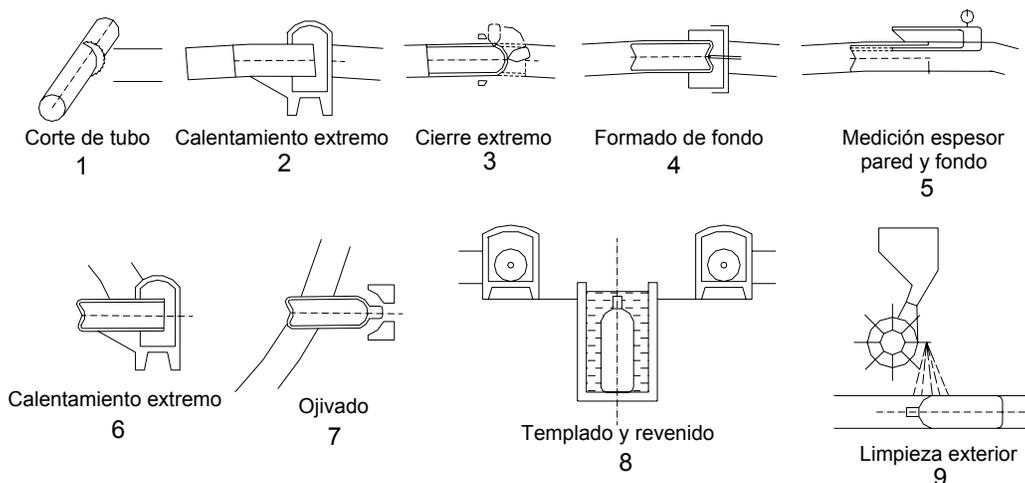


Figura 3.7. Fabricación por "spinning" de cilindros para cloro de 68 kg

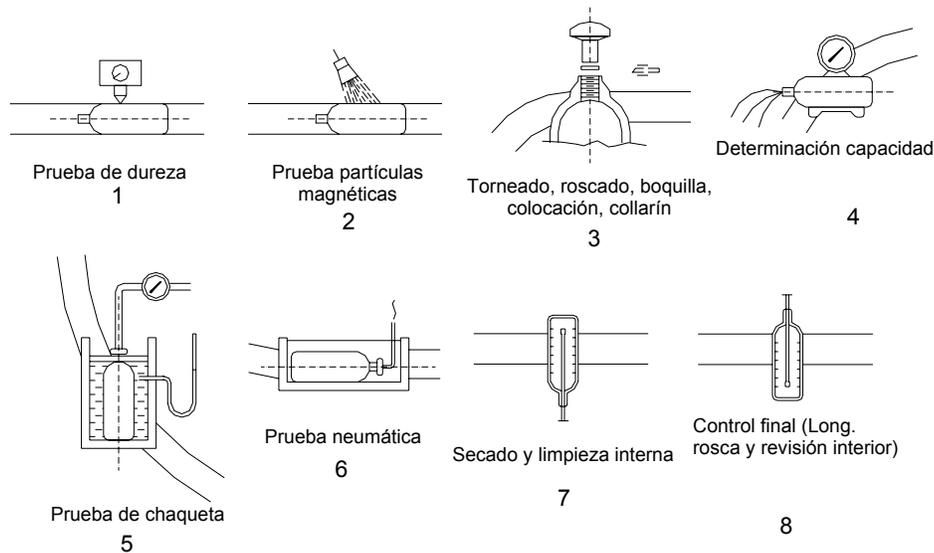


Figura 3.8. Pruebas a las que son sometidos los cilindros para verificar su integridad

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 (Figura 3.9), que implica

- 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/cm²
- Presión de prueba 57.0 kg/cm²

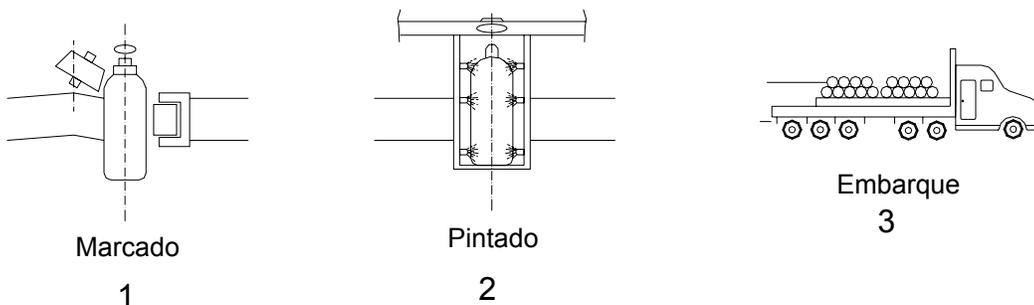


Figura 3.9. Detalles de los cilindros y forma de embarque

Las dimensiones del cilindro así como las leyendas que llevan estampadas en su cabeza, están indicadas en la figura 3.10.

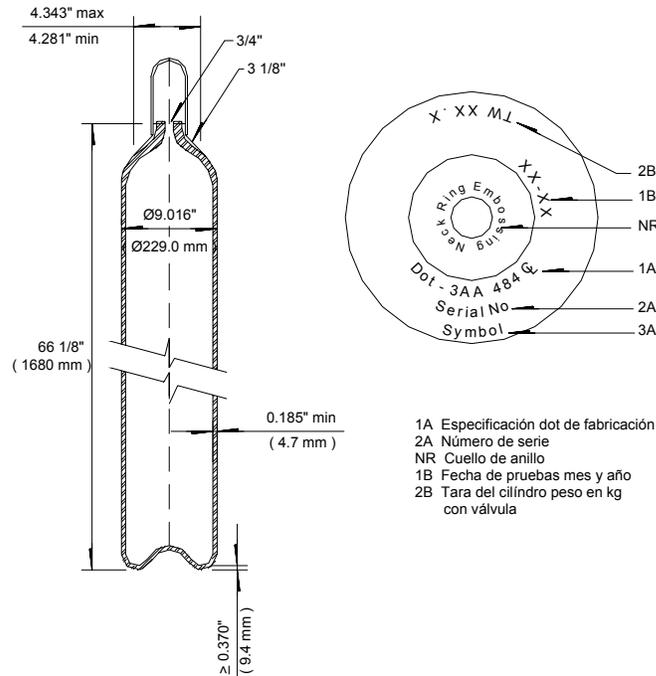


Figura 3.10. Corte de un cilindro para cloro de 68 kg

3.4.1.1. De 907 kg

En México, los recipientes de 907 kg son de acero soldado y se fabrican de acuerdo con el código ASME (Tabla 3.10). 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 ésta equipada con 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 (Figura 3.11). 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 es función de 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.

Tabla 3.10. 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	semielípticas
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

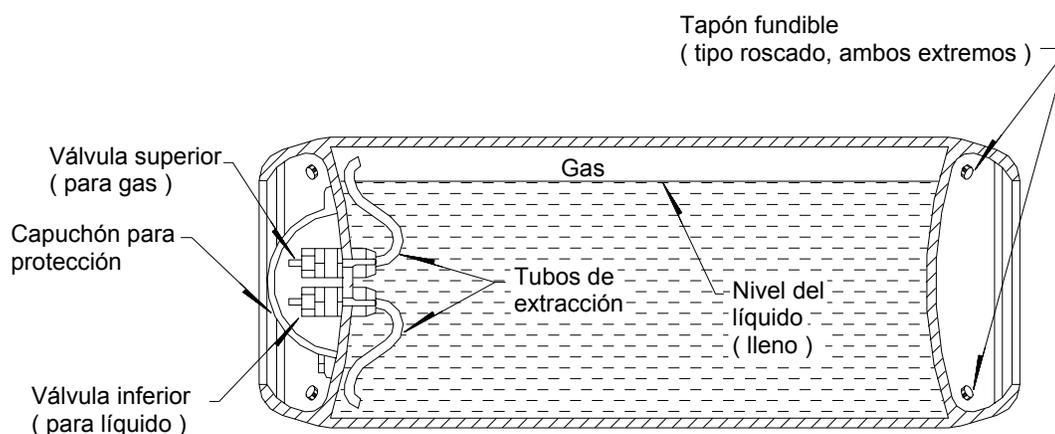


Figura 3.11. Accesorios de un cilindro de 907 kg

3.4.2. Carrotanques

Los carrotanques se usan cuando el consumo de cloro es superior a 2.0 ton/d, que para una dosis de 20 mg/l, 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

3.4.3. 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 están 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 licúa y obstruye los cloradores.

Tanto para los cilindros como para los carrotanques se debe respetar lo siguiente:

- Evitar que el sol caliente los cilindros o carrotanques.

- Nunca acercar una llama a los envases pues el cloro puede alimentar la combustión del acero.
- No permitir que la temperatura del cuarto descienda por debajo de 10 °C pues dificulta la extracción del cloro.

3.4.4. Transporte y almacenamiento

El cloro es un elemento altamente peligroso, por lo que hay que extremar precauciones durante su transporte, ya sea de la fabrica 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 figura 3.12.

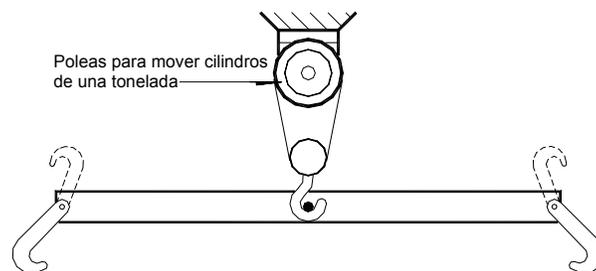


Figura 3.12. Poleas para mover cilindros de 907 kg

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

3.5. 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.

A continuación se presenta un diagrama para las diferentes opciones de aplicación (Figura 3.13).

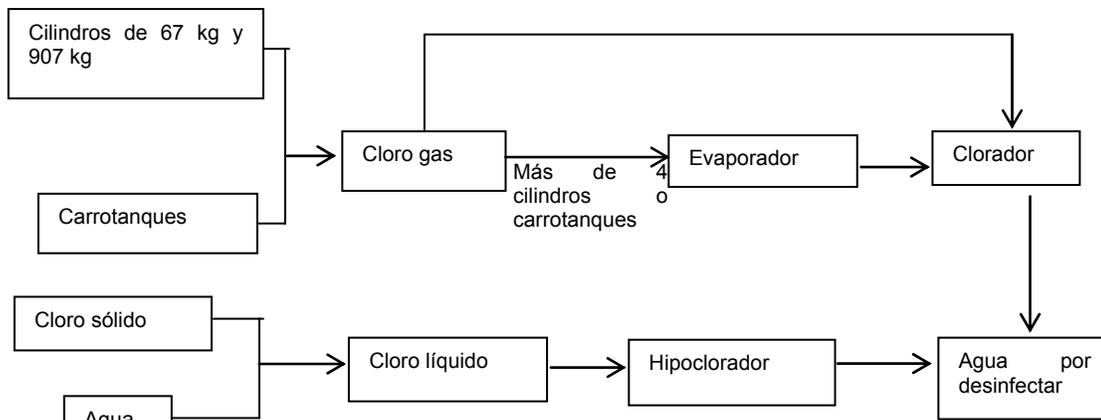


Figura 3.13. Clasificación de las unidades de suministro de cloro

3.5.1. Hipocloradores

Aunque una solución de hipoclorito puede agregarse a un abastecimiento de agua mediante dispositivos improvisados, lo que con mayor frecuencia se usa es una bomba de diafragma. 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 residual, 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).

3.5.2. Cloradores

Existe una gran variedad (Tabla 3.11) que en general, se clasifican en dos tipos básicos: los de presión, donde el gas se inyecta directamente desde de 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.

Tabla 3.11. Clasificación de aparatos cloradotes

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

Los primeros son más costosos, pero tienen la ventaja de que no necesitan suministro adicional de agua ni de energía eléctrica. Sin embargo, los segundos, 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.

3.5.2.1. 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 (Figura 3.14).

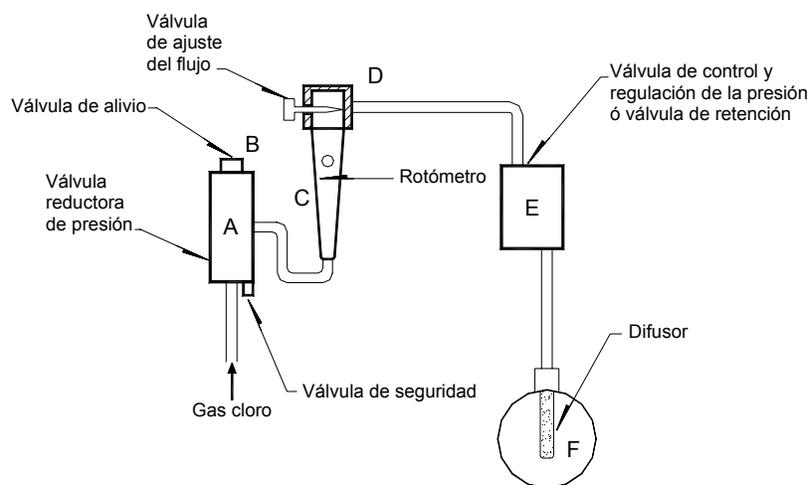


Figura 3.14. Esquema de un aplicador de cloro a presión

3.5.2.2. Cloradores de vacío

El funcionamiento de los cloradores al vacío está esquematizado en la figura 3.15.

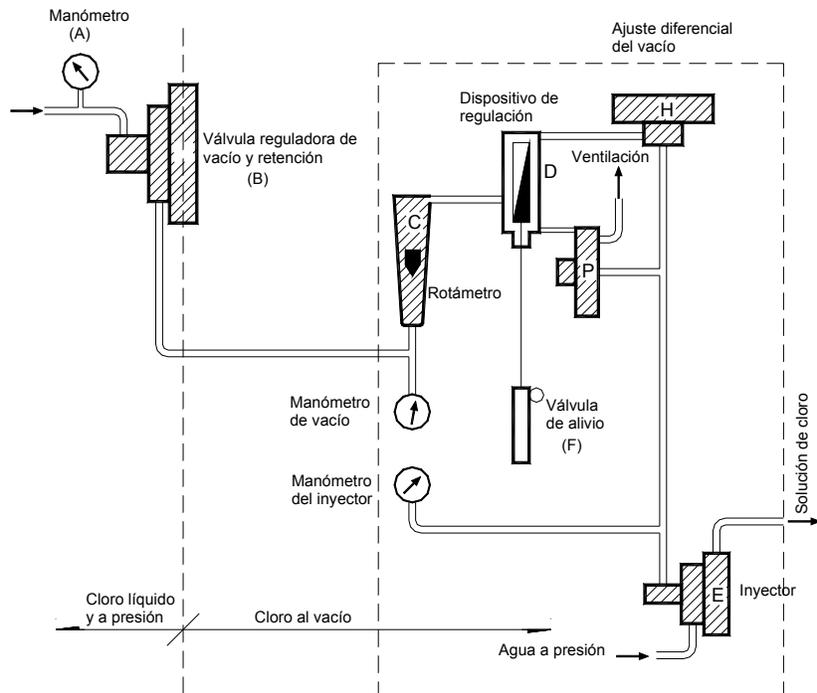


Figura 3.15. Esquema de un aplicador de cloro al vacío

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 inyector, 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.

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 y/o caudal tratado, se requiere un actuador o comando electrónico (Figura 3.16).

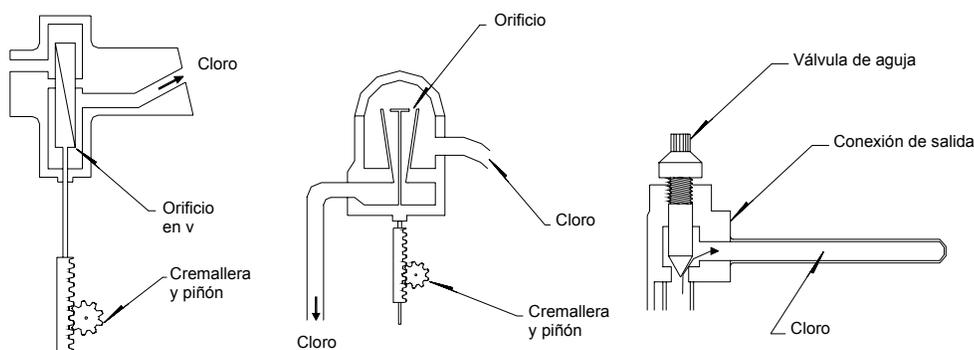


Figura 3.16. Dispositivos de control del flujo de cloro

3.5.3. 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 carrotanques 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 relicuefacción 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 metido 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 (Figura 3.17).

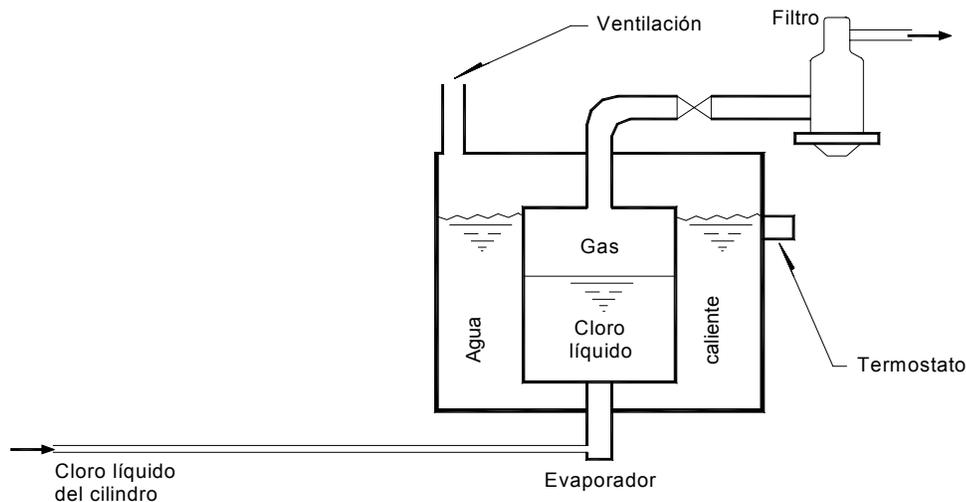


Figura 3.17. Instalación de un evaporador

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

- 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/cm^2 (400 lb/in^2)
- 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

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

- Una unión con discos para romper la presión que sirve para proteger las tuberías.
- Un interruptor de presión con alarma para avisar 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 $2.8\text{-}3.5 \text{ kg/cm}^2$ (de 100 a unas $40\text{-}50 \text{ lb/in}^2$), y de cierre automático que actúa en caso de falla eléctrica.

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.

3.5.4. 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 y Eddy, 1996).

3.5.4.1. 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, por eso, del inyector, es crear un vacío para permitir la solución del gas en el agua, lo que tiene la ventaja adicional de facilitar la medida 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 (figura 3.18) (US. EPA, 1986).

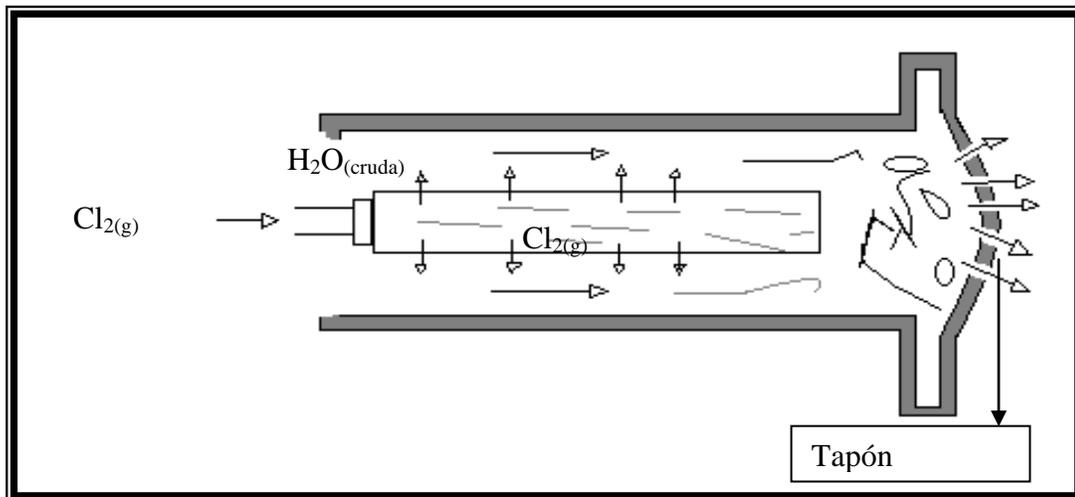


Figura 3.18. Sistema de mezclado cloro gas – agua

3.5.4.2. 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 figura 3.19. Su diseño se basa en los principios dados para los múltiples de filtros. 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 figura 3.20.

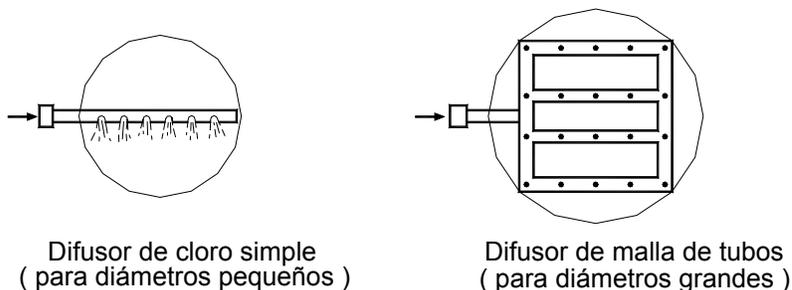


Figura 3.19. Difusores para tuberías

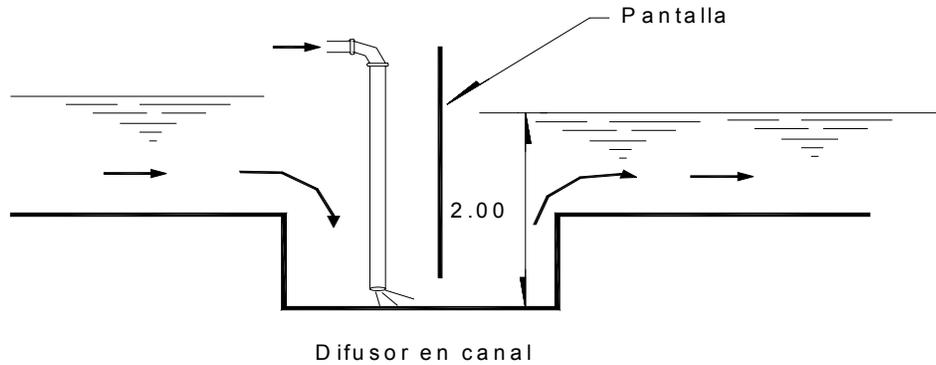


Figura 3.20. Sistema de difusores

3.5.5. Operación de los cloradores

La operación puede hacerse manual o automáticamente, como se muestra en la tabla 3.12.

Tabla 3.12. Sistemas de control de clorados

Método	Sistemas de control
Manual	I. Simple con determinación ocasional de cloro residual
	II. Con analizador permanente y alarmas
Automático	III. Ajuste de dosis proporcional al flujo tratado (circuito abierto)
	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)

3.5.5.1. 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 (Figura 3.21).

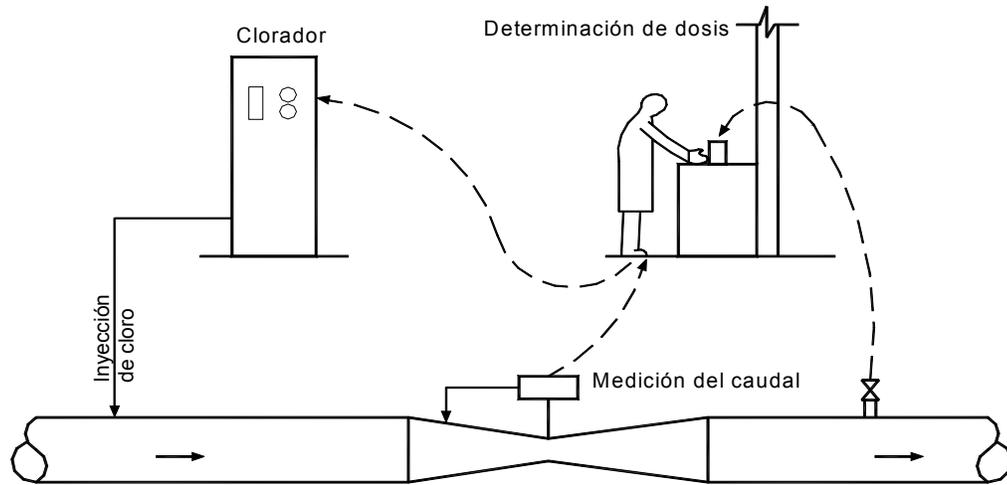


Figura 3.21. Operación simple con determinación ocasional de cloro residual

3.5.5.2. 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 (Figura 3.22).

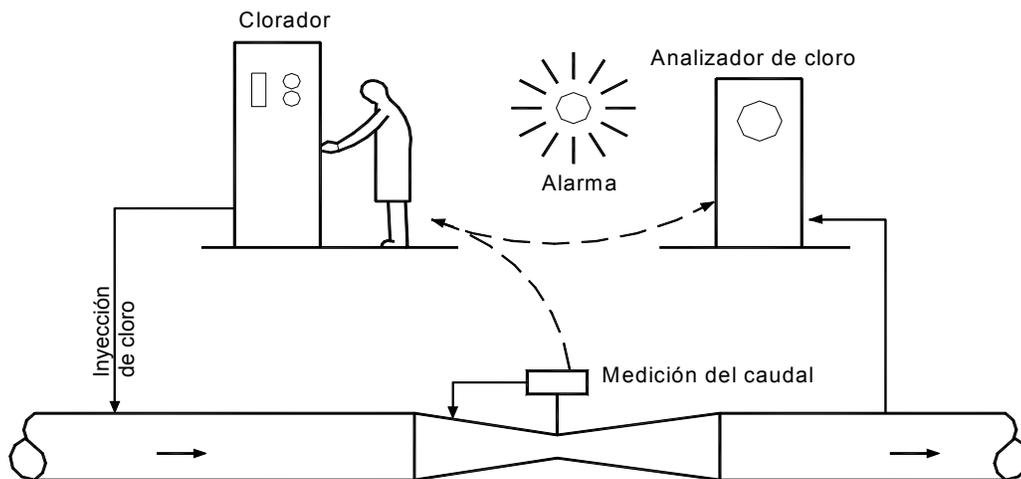


Figura 3.22. Operación con analizador permanente y alarmas

3.5.5.3. 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 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 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 (Figura 3.23).

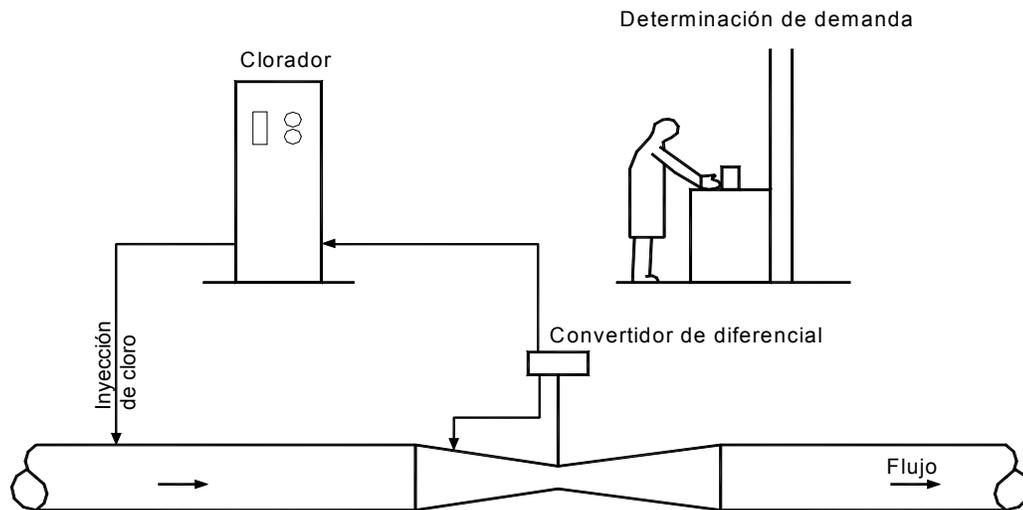


Figura 3.23. Ajuste de dosis proporcional al flujo tratado (circuito abierto)

3.5.5.4. 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 varía mucho. En tales circunstancias, el mantener un residual determinado puede ser muy difícil, en especial, cuando se requiere clorar hasta el punto de quiebre. El único ajuste que el operador tiene que hacer manualmente es el debido a grandes variaciones en el caudal tratado o por suspensiones del servicio, ya que permite fijar y mantener automáticamente una dosis de cloro residual libre o combinado (Figura 3.24).

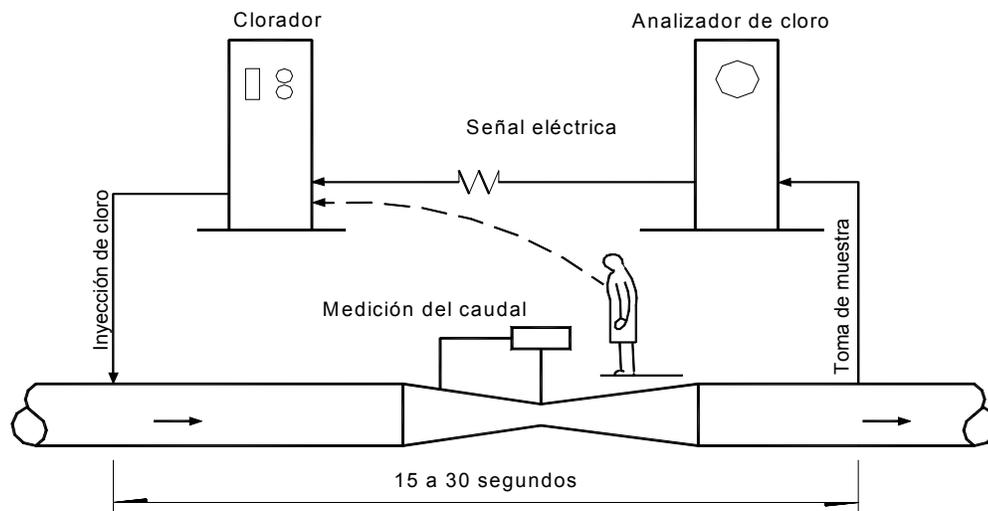


Figura 3.24. Ajuste proporcional a la demanda (circuito cerrado)

3.5.5.5. 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 (Figura 3.25). El funcionamiento del equipo es totalmente automático y la intervención del operador se limita a la vigilancia del sistema.

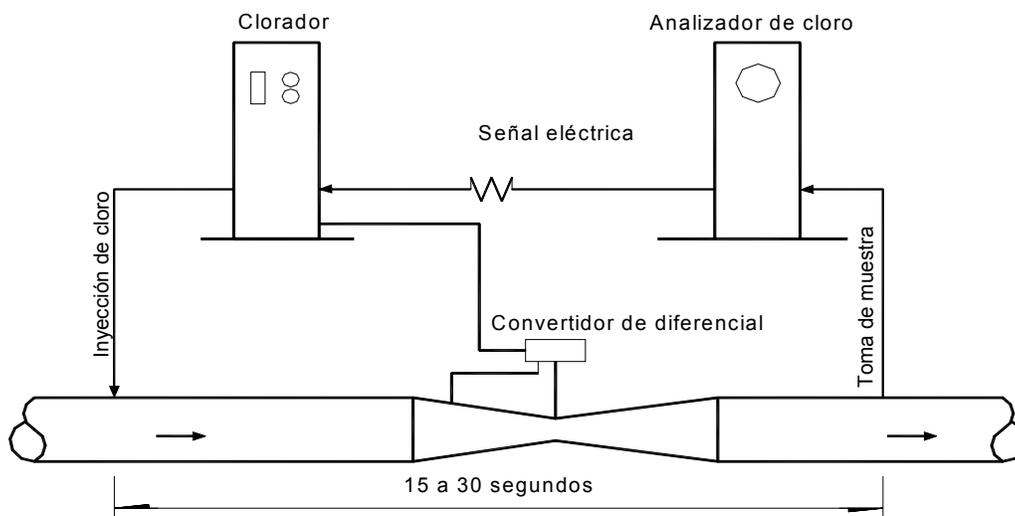


Figura 3.25. Ajuste de dosis proporcional tanto a la demanda como al flujo tratado (circuito compuesto)

3.5.6. Selección del sistema de control

En los métodos descritos, la diferencia principal es en 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.

3.6. DISEÑO

Para diseñar una unidad de cloración se debe definir:

- 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, etc).

3.7. 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 mg/l. Otros, por su complejidad como el de leucocristal violeta (APHA, AWWA y WPCF, 1995) son difíciles de manejar. En la tabla 3.13 se muestran algunos de los más utilizados. Los más antiguos son el yodométrico 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 y por su naturaleza tóxica. Los Métodos Estándar la han eliminado 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.

Tabla 3.13. Métodos más conocidos para la determinación del cloro residual

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

Fuente: APHA, AWWA y WPCF, 1995.

3.7.1. 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
- 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, otros cloro libre y/o combinado. Puesto que son equipos delicados, que requiere buena calibración y mantenimiento, 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 despolarize 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. Cuando el pH del agua es inferior a 6.0 o superior a 8.0 se requiere la amortiguación de la muestra pues sino el yoduro se descompone. Las celdas amperométricas tienen un coeficiente de temperatura de aproximadamente 2 % por grado centígrado. Por lo tanto, cambios pequeños de este pueden producir errores substanciales. El equipo puede proporcionar una compensación manual o automática de este factor.

3.7.2. 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 los fuertes concentraciones altas. Es importante considerar que si el agua contiene nitritos, hierro o manganeso (los dos últimos en concentraciones mayores de 1 mg/l), 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 (mg/l) 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, contruidos 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.

3.8. 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 carrotanques y que ya fueron mencionados en el apartado 3.6 así como la instalación de los mismos. A continuación se da mayor detalle de los mismos.

3.8.1. Seguridad inherente al equipo

3.8.1.1. Válvulas de seguridad

Están diseñadas específicamente para los recipientes de cloro. En la figura 3.26 se muestran los cortes de las usadas en cilindros de 68 y 907 kg. Como se observa, 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 taponos 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, deben por ningún motivo 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 3/4 de pulgada.

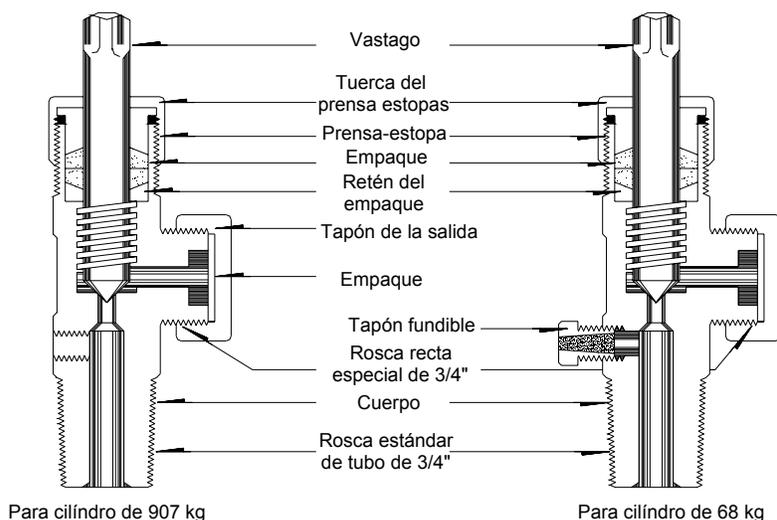


Figura 3.26. Corte de las válvulas para cilindros de cloro

3.8.1.2. 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.

3.8.2. Equipo de protección

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

a) 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 disuelto 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.

b) 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 3.14.

Tabla 3.14. 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

Es indispensable que las personas que participan en estas actividades cuenten con máscaras de gas con filtro para cloro, traje protector, guantes de goma y botas de goma.

Máscaras:

Existen básicamente tres tipos

- Canister
- Con tanque de aire a demanda de presión
- De respiración autónoma

a) Canister.- Consisten de careta, tubo respiratorio (Figura 3.27), arnés y una lata de químico absorbente (canister) (Figura 3.28). 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.

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 % de oxígeno o peligrosas. Estas máscaras se usan **“SÓLO PARA ESCAPE”**, cuando:

- No existen concentraciones mayores de 2 % en volumen de gases tóxicos o vapores.
- En casos de incendio.
- En espacios reducidos o en los que se puede dar deficiencia de oxígeno o elevadas concentraciones de gas.



Figura 3.27. Máscara para gas con tubo respiratorio para colgar en el pecho



Figura 3.28. Máscara para gas con canister tipo barbilla.

b) Con tanque de aire a demanda de presión, que permite trabajar hasta 35 minutos.

c) De respiración autónoma: Este aparato debe usarse cuando no se conocen o se piensa que las concentraciones de oxígeno y de cloro exceden 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. No tienen las limitaciones expresadas para las máscaras canister.

3.8.3. Prevenciones y acciones de emergencia

En la tabla 3.15 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.

Tabla 3.15. 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</p> <p>Efectuar simulacros de fugas de cloro periódicamente, para entrenar al personal en el uso del equipo de protección y control</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</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.</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 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>Alejarse los cilindros del área del fuego, en caso de poder hacerlo sin riesgo.</p> <p>Enfriar los cilindros con volúmenes abundantes de agua para garantizar su enfriamiento y manejar aquellos que presenten daños con sumo cuidado.</p>

La tabla 3.16 indica la preparación y cantidades de solución para absorber el cloro, de acuerdo con la capacidad del cilindro dañado.

Tabla 3.16. Preparación y cantidades de solución para absorber el cloro de acuerdo con la capacidad del cilindro dañado

Tamaño del recipiente de cloro	Sosa cáustica		Soda Ash		Cal Hidratada	
	kg 100 %	L agua	kg 100 %	L agua	kg 100 %	L Agua
68 kg	85	230	204	570	159	570
500 kg	625	1 680	1 500	4 160	1 120	4 160
907 kg	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.

3.9. PRIMEROS AUXILIOS

3.9.1. 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 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 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.

La tabla 3.17 resume los efectos toxicológicos del cloro a diferentes concentraciones.

3.9.2. 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. No 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 menos durante 15 minutos. 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 hidrocloreuro de tetracaína (pentocaína) al 0.5 %, o algún otro anestésico acuoso de igual efectividad. No se deben aplicar aceites o ungüentos a menos que el médico tenga experiencia con alguno.

Tabla 3.17. 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 faringea 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 esta	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

- 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 %) 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 únicamente 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.

4. OZONO

La ozonación se considera la tecnología de mayor eficiencia para matar casi todo tipo de patógenos, excluyendo los huevos de helminto.

Ozono proviene de la palabra griega *ozein*, que significa oler. Su fórmula molecular es O_3 y es un gas inestable de color azul y olor picante característico. Es uno de los oxidantes más fuertes que es usado como desinfectante, oxidante clásico y ayuda de coagulante.

En este capítulo se resumen los aspectos principales para su empleo como desinfectante.

4.1. ESTADO DEL ARTE

A nivel mundial, la mayoría de las instalaciones con ozonación son utilizadas para el tratamiento de agua potable. Actualmente, en Estados Unidos existen 250 plantas que incluyen nuevas y modificadas para adicionar este proceso (Rice, 1999). En 1997 había 604 en Alemania (Böhme, 1999) y en Bélgica, hoy en día, se considera que la ozonación es indispensable, por lo que se está incluyendo en todas las instalaciones existentes (Kruithof y Masschelein, 1999).

En Europa, la desinfección con ozono de agua potable es muy común desde principios de siglo. Particularmente, en Francia, el ozono se usa al final del tratamiento con o sin adición de cloro.

El ozono en desinfección se usa al inicio (desinfección primaria) o al final (desinfección secundaria). En el primer caso sirve para oxidar la materia orgánica precursora de la formación de subproductos orgánicos clorados que ocurre cuando hay una desinfección con cloro al final del tratamiento.

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 reúso 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 ha comenzado a aplicar como oxidante en plantas pequeñas de potabilización con problemas de alta contaminación orgánica y de color.

Actualmente, la tendencia mundial es aplicar el ozono con múltiples propósitos no sólo el de desinfección con la finalidad de optimar costos.

4.2. USOS DEL OZONO

El ozono puede ser usado para los propósitos que a continuación son descritos.

4.2.1. Desinfección

El ozono es considerado uno de los agentes microbicidas más rápido y eficaz. Su acción posee un amplio espectro y elimina:

Bacterias. Actúa como bactericida y bacteriostático en concentraciones tan bajas como 0.01 ppm, con periodos muy cortos de exposición. Wuhrmann y Meryrath (1955) encontraron que a 12°C y con concentraciones de 0.6 mg/l de ozono se reduce 4 unidades log de *E. coli*, *Staphylococcus* sp. y *Pseudomonas fluorescens* en menos de un minuto. Los *Streptococcus fecalis* requieren el doble del tiempo y *Mycobacterium tuberculosis*, seis veces más con la misma concentración.

Virus. El ozono oxida las proteínas de la capa y modifica la estructura tridimensional interna, de forma tal, que el virus no puede anclarse a ninguna célula huésped, no se reproduce y muere. La acción se observa en concentraciones inferiores a la bactericida pues la capa de los virus es menos compleja que la de la pared bacteriana. Para la destrucción total de virus se requieren 30 segundos a concentración baja de ozono residual (0.05 mg/l). Sin embargo, la OMS recomienda incluir un coeficiente de seguridad importante en la dosis.

Hongos. El ozono, provoca un daño celular irreversible.

Esporas. A concentraciones ligeramente superiores a las usadas para el resto de las bacterias, el ozono es capaz de destruir las esporas formadas por hongos y bacterias.

Los quistes de protozoarios son mucho más resistentes que las esporas de virus y bacterias. Actualmente, la inactivación de quistes de *Giardia lamblia* es un criterio de desinfección que se propuso como directriz por la EPA por ser uno de los gérmenes más difíciles de eliminar. Por lo anterior se presenta en el punto 4.8 un ejemplo de diseño para este caso.

4.2.2. Oxidación

4.2.2.1. Hierro y manganeso

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



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.

4.2.2.2. Olor y sabor

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.

4.2.2.3. Precursores de trihalometanos

El ozono se aplica al inicio del tratamiento con el objeto de destruir los compuestos que dan lugar a la aparición de organoclorados durante la cloración final del agua.

4.2.3. Pretratamiento

4.2.3.1. Mejora de la coagulación

En los años sesenta se observó que al emplear el ozono para oxidar hierro y manganeso ocurría una floculación espontánea. Ello condujo al desarrollo del proceso de “miscelación-desmiscelación”, donde las partículas resultantes son fácilmente removidas por filtración rápida en arena, con la ayuda de un polímero o un coagulante. Este efecto microfloculante ha sido usado con éxito en plantas potabilizadoras para reducir la dosis de reactivos durante la coagulación y floculación así como para facilitar la remoción de sólidos suspendidos.

4.2.3.2. Incremento de la biodegradabilidad

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:

- Causan color
- Son precursores 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 4.1 se presentan las dosis para diversas aplicaciones del ozono.

4.3. REACCIONES DURANTE LA DESINFECCIÓN

En el agua, el ozono actúa en forma:

- Directa, como ozono molecular, e
- Indirecta, en diversos radicales libres que son más reactivos que el ozono molecular (Hoigné y Bader 1977, Hoigné y Bader 1978).

En la forma directa el ozono molecular tiene dos formas de resonancia (ecuación 4.3) que hacen que actúe como dipolo, agente electrófilo o agente nucleófilo, como se muestra en la tabla 4.2.

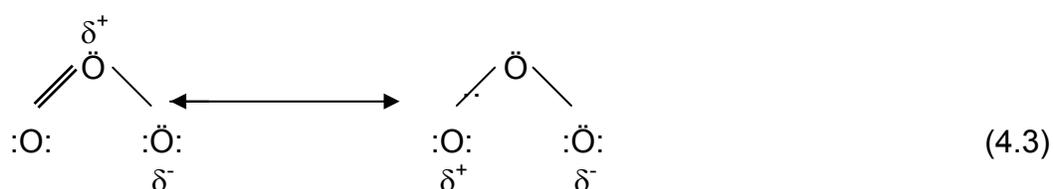
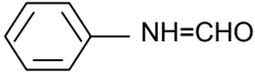


Tabla 4.1. Dosis de ozono para diversos contaminantes presentes en el agua

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

Tabla 4.2. 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 $\begin{matrix} R_1 \\ > C=O \\ R_2 \end{matrix}$ Cetonas $\begin{matrix} HOO & R_3 \\ > C < \\ HO & R_4 \end{matrix}$
Electrofilico	Aromáticos (fenol), aminas y mercaptanos.	Acidos: $\begin{matrix} & & H \\ & & \\ HOOC - C - COOH, & COOH \\ & \\ & O \end{matrix}$ Otros: Cl, NH_4^+ , NO_3 , CO_2 , H_2O
Nucleofilico	Dobles ligaduras entre carbono-nitrógeno ($> C = N -$) en disolventes inertes.	

Fuente: Adaptado de Langlais *et al.*, 1991 y Hoigné, 1998

En la forma indirecta, los radicales que el ozono genera en el agua son varios. El principal es el OH^\bullet que es muy reactivo por tener un electrón desapareado. Las condiciones que favorecen la formación de OH^\bullet son:

- pH > 9
- Presencia de iones metálicos que forman una pareja óxido-reductora, como
 $Fe^{2+} \leftrightarrow Fe^{3+}$
 $Mn^{2+} \leftrightarrow Mn^{3+}$
- Adición de peróxido de hidrógeno (agua oxigenada)
- Aplicación de radiación UV que favorece la fotólisis y la formación no sólo de radicales OH^\bullet sino también de O_2^\bullet

4.4. VENTAJAS Y DESVENTAJAS DEL USO DE OZONO

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

- Ser un fuerte oxidante que reacciona rápidamente con la mayoría de los compuestos orgánicos y microorganismos (incluyendo esporas, quistes y algas) presentes en las aguas naturales y residuales
- No impartir sabor ni olor al agua
- Poseer mayor poder desinfectante que el cloro y sus derivados

Sus desventajas se refieren a:

- Los costos

- 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/cm^2) 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.

4.5. GENERADORES DE OZONO

El ozono puede ser producido por tres métodos:

- Fotoquímico
- Electrólisis del ácido sulfúrico
- Corona de descarga

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% 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.

Electrólisis del ácido sulfúrico. La producción sintética del ozono fue descubierta por Schönbein en 1840. 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.

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.

4.5.1. Por corona de descarga

Actualmente, es el método más utilizado para producir ozono en grandes cantidades. 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 O_3 /h (Doré, 1989). El equipo de generación está compuesto por:

- Sistema para preparar el gas de alimentación
- Generador de ozono
- Cámara de contacto y sistema de difusión
- Sistema para destruir el ozono residual

4.5.1.1. 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 producido depende 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 se regenera cada una cada 96 horas. Se recomienda, que las columnas estén aisladas para conservar la energía y rellenas con cualquiera de los materiales de la tabla 4.3. La sílica gel es el mejor de ellos.

Tabla 4.3. Medios desecantes

Medio	Características				
	Densidad (kg/m ³)	Temperatura de regeneración (°C)	Área superficial (m ² /g)	Gravedad específica aparente	Forma
Sílica 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

Adaptado de: Langlais *et al.*, 1991

En la tabla 4.4 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 muestran en la tabla 4.5.

La cantidad de ozono producido en kg/h depende del gasto del aire alimentado y su calidad (seco y libre de impurezas). Estos parámetros son de mayor importancia que la variación de voltaje o amperaje. En especial, la pureza del aire importa, pues la presencia de hidrocarburos a concentraciones mayores a 1% en volumen inhiben la formación del ozono.

Tabla 4.4. Consideraciones de diseño y selección para el secado de gas

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
<ul style="list-style-type: none"> • 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
<ul style="list-style-type: none"> • Producción requerida de ozono para cierto tiempo de operación
<ul style="list-style-type: none"> • 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
<ul style="list-style-type: none"> • Capacidad inicial y crecimiento proyectado de la planta
<ul style="list-style-type: none"> • Complejidad de la operación y el mantenimiento
<ul style="list-style-type: none"> • Filosofía financiera de operación

Adaptado de: Masschelein, 1996

Tabla 4.5. Características de los compresores utilizados para la alimentación de aire

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

Adaptado de: Langlais *et al.*, 1991

En la tabla 4.6 se presentan las consideraciones y parámetros de diseño para alimentar el aire a un generador de ozono.

Tabla 4.6. Factores por definir para la alimentación del generador con aire comprimido

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

Adaptado de: Langlais *et al.*, 1991

4.5.1.2. 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 $\pm 0.14 \text{ kg/cm}^2$ para una presión normal de 0.7 kg/cm^2 .

El consumo y la capacidad de los generadores de ozono son directamente proporcionales al voltaje y a la frecuencia. En la tabla 4.7 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 4.7. Clasificación de los generadores de ozono por corona de descarga de acuerdo al voltaje

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

Fuente: Bryant *et al.*, 1992

La tabla 4.8 contiene los puntos que se deben definir para el diseño y selección de un generador de ozono.

Tabla 4.8. 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

En la tabla anterior 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.

4.5.2. Ejemplos de generadores comerciales de ozono

La empresa estadounidense “*Ozono Elettronica Internazionale*” ofrece equipos con capacidad de producción de 2.5 g O₃/h a 12 kg O₃/h (Figura 4.1). Se aplican para plantas potabilizadoras con módulos de 0.3 a 110 L/s. El suministro eléctrico es de frecuencia media o alta.



Figura 4.1. Generador de ozono de media frecuencia

La empresa española “*Tecozon Oxidines, sistemas y equipos de ozonación*” tiene generadores de alta y media capacidad en sus series ZF y OZAT. La serie ZF es de frecuencia media (Figura 4.2), posee avanzados sistemas eléctricos y electrónicos y es de construcción robusta.

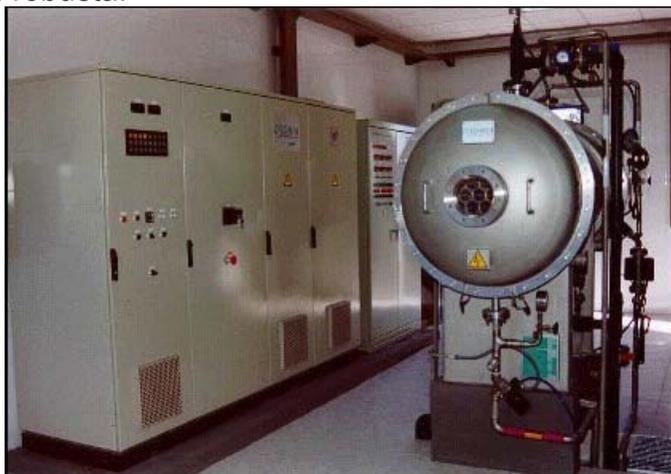


Figura 4.2. Generador de ozono de media frecuencia serie ZF

En cambio, la serie OZAT, incorpora avances como los tubos dieléctricos de tecnología avanzada (AT) desarrollados por Ozonia (Figura 4.3). Estos equipos son de construcción modular, muy compactos y capaces de producir ozono en concentraciones hasta de 10 kg/h. Funcionan tanto con aire como con oxígeno. En el

primer caso producen entre 30 g/h y 5 kg/h de ozono y en el segundo de 60 g/h a 10 kg/h.

Se usan en potabilizadoras, depuradoras, desodorizaciones por vía húmeda, suministro de agua para embotelladoras, laboratorios farmacéuticos, industria de semiconductores y piscinas.



Figura 4.3. Generador de ozono marca Ozonia

En México, la empresa “*Ikal-ha, Generadores de ozono y sistemas de tratamiento de agua*” se dedica al diseño y fabricación de equipos cuyo funcionamiento es por corona de descarga de alta frecuencia (> 30 000 Hz, figura 4.4). Producen de 0.1 g/h hasta 100 g O_3 /h. El número del modelo del equipo indica la cantidad máxima de ozono generada. La mezcla del ozono con el agua se realiza por un simple burbujeo, en el equipo portátil modelo 100, hasta con inyectores Venturi en los modelos 1000 en adelante. Los equipos modelo 4000 o superiores cuentan con un circuito de refrigeración que utiliza la misma agua tratada.



Figura 4.4. Generador de ozono “Ikal-ha”

Una de las empresas con mayor experiencia en la construcción y operación de ozonadores es la firma francesa Trailgaz, quien no tiene representación en México.

4.5.3. 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. Por ejemplo, algunos deben ser usados con sistemas de contacto a presión subatmosférica. 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 fuertemente influenciado por la baja solubilidad del ozono en las concentraciones que comúnmente se encuentra en el gas de alimentación (de 1 a 10%). Una parte clave es el difusor, el cual es función del objetivo del tratamiento como se señala en la tabla 4.9. 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% de la dosis de ozono total (Rice, 1986).

Tabla 4.9. Tipo de difusor por aplicación

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

Adaptado de: Vázquez, 1996

La EPA, define que 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. En EUA cuando se carece de este dato se emplea el criterio de guardar un valor alto de $CT = 1.6 \text{ mg/l min}$. 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 mg/l , 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. 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% 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 4.8.

En la tabla 4.10 se presentan los aspectos que deben considerarse para el diseño de la cámara de contacto de ozono.

Tabla 4.10. Aspectos para el diseño de la cámara de contacto

<p>- Difusor de burbuja:</p> <ul style="list-style-type: none"> • 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 <p>Grado de corto-circuito (t_{10} :10 % del tiempo de residencia hidráulica a través del reactor)</p> <p>Consideraciones de operación y mantenimiento</p> <p>Eficiencia de transferencia a diferentes condiciones y con relación a la calidad del agua</p>
<p>- Otros sistemas de difusión</p> <ul style="list-style-type: none"> • Tipo (turbina , inyector, eductor, columna) • Principios de operación

Adaptado de: Langlais *et al.* , 1991

A continuación se describen las principales cámaras de contacto.

- **Cámara de Contacto en Multietapas con Difusor Poroso de Burbujas Finas (Figura 4.5).**

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/cm^2 a 1.05 kg/cm^2 , la cual es suficiente para vencer la carga hidrostática y la pérdida debida al paso del gas por la tubería y los difusores.

- **Cámara de Contacto Tipo Kerag con Mezclador de Turbina con Presión Positiva o Negativa (Figura 4.6).**

Utiliza un propulsor giratorio rápido con base perforada, a través de la 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.

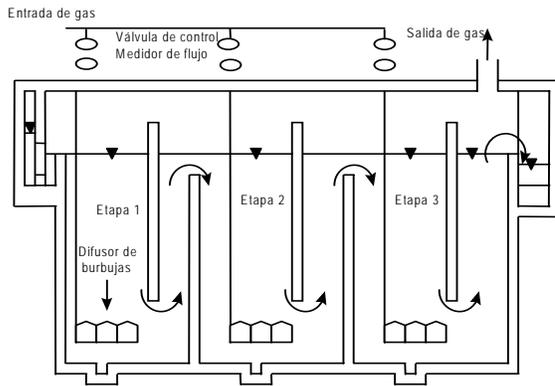


Figura 4.5. Cámara de contacto en tres etapas con difusor de burbujas

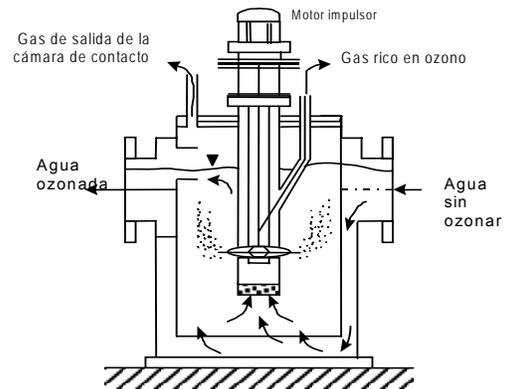


Figura 4.6. Cámara de contacto tipo Kerag

- **Cámara de Contacto con Lecho Empacado y Sistema de Difusión por Inyección (Figura 4.7).**

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).

- **Sistema de Contacto y Difusión en Tubo Profundo en "U" (Figura 4.8).**

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".

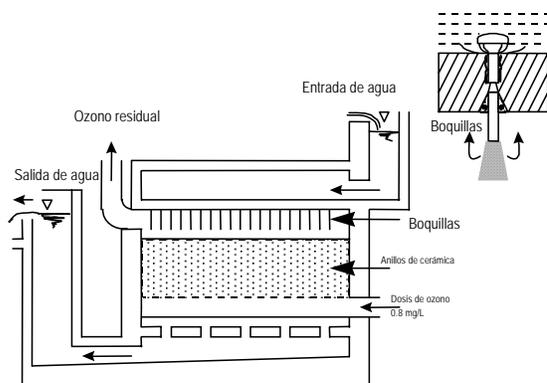


Figura 4.7. Cámara de contacto con lecho empacado usada en Sipplingen, Alemania

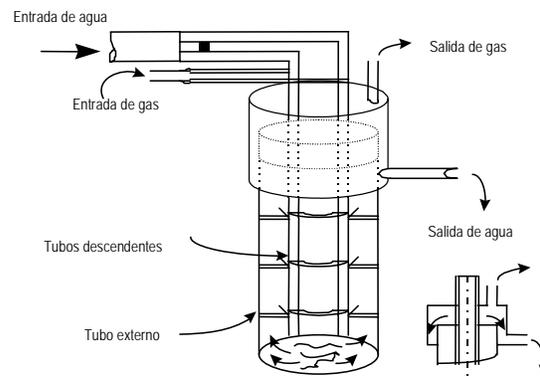


Figura 4.8. Cámara de contacto y difusión en tubo profundo "U"

- **Cámara de Contacto con Difusor de Plato Poroso (Figura 4.9).**

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.

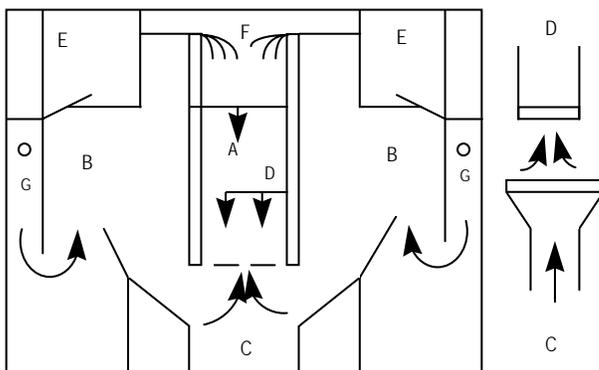
Consta de un tanque de contacto dividido en dos, una parte para la ozonación y, la otra, para la flotación. El agua fluye hacia abajo, por el centro de la cámara, y el ozono es introducido a través de un difusor de plato poroso localizado cerca del fondo.

- **Cámara de Contacto con Difusor de Turbina Radial Estático Sumergido (Figura 4.10).**

Aún 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 % 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.

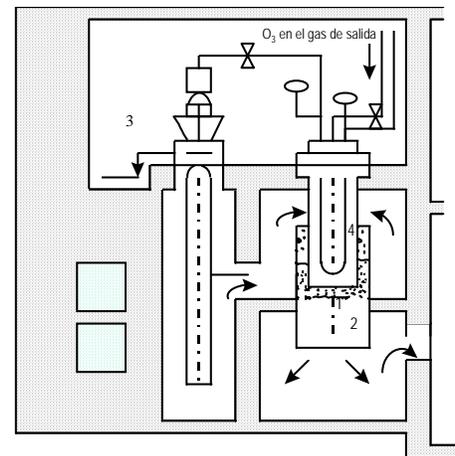
- **Sistema tipo Venturi.**

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



A: Cámara descendente de ozonación
 B: Cámaras de flotación
 C: Platos porosos de difusión
 D: Corriente de barrido (agua inyectada a través de orificios)
 E: Cámara de remoción de espuma
 F: Entrada de agua a tratar
 G: Salida de agua tratada

Figura 4.9. Cámara de contacto con difusor de plato poroso.



1 Cabeza del difusor
 2 Cámara de difusión
 3 Bomba de corriente parcial
 4 Derramadero

Figura 4.10. Cámara de contacto con difusor de turbina radial sumergida.

4.5.4. Destrucción del gas residual

Debido a que la eficiencia de transferencia del ozono es menor al 100 % 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 h por día de jornada que es 0.1 ppm (0.1 mg/m³). Existen tres formas de eliminar el ozono (Geering, 1995):

- Térmica
- Catalítica y
- Adsorción en carbón activado

a) 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 y Niegowski, 1967).

b) Catalítica. Es el método más reciente y común en Estados Unidos. Emplea catalizadores de paladio, manganeso 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.

c) 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).

4.6. 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 4.11).

Tabla 4.11. 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

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 $\text{kg/h}\cdot\text{m}^3$ (Tabla 4.12). 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.

Tabla 4.12. Pre-diseño de un sistema de ozonación

FACTORES	CARÁCTERÍSTICAS A DEFINIR
Cantidad y tasa de ozono requerida en kg/h , de acuerdo con el gasto de agua en m^3/h y a las variaciones de las dosis de ozono en $\text{g O}_3/\text{m}^3$	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 $\$/\text{kWh}$
Costo	Inversión Consumo energético Mantenimiento Consumibles Evaluación del valor presente Capacitación del personal de operación Operación

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.

4.6.1. Pruebas de tratabilidad

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

a) 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.

b) 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 mg/l de O₃ durante 4 minutos. En agua residual tratada es suficiente con mantener un residual de 0.1 mg/l.

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.

c) 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 4.5).

$$[O_3] = [O_{3o}] e^{-k't} \quad (4.5)$$

donde

$[O_3]$: Ozono residual, mg/l en un tiempo, t, determinado
 $[O_{3o}]$: Ozono residual, mg/l en el tiempo cero
 k' : Constante de velocidad, min^{-1}

La constante de velocidad, k' , es la pendiente de la relación lineal entre $\ln [O_3/O_{3o}]$ y el tiempo (Figura 4.11).

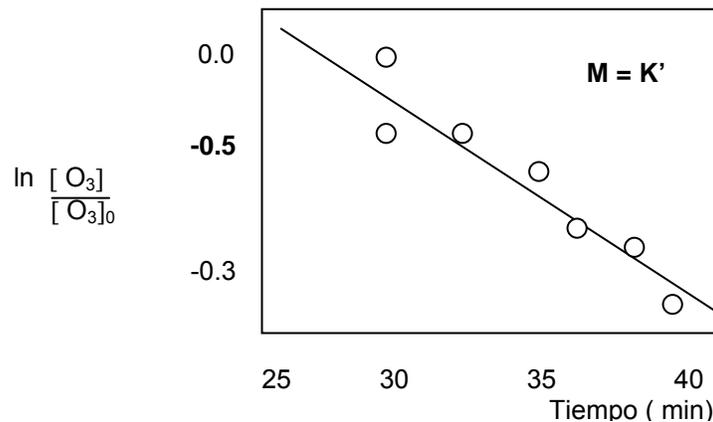


Figura 4.11. Representación de la velocidad de decremento de ozono

d) 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 4.13.

Tabla 4.13. Consideraciones para el diseño de pruebas de tratabilidad

aspecto	Parámetros
Características de la prueba	<ul style="list-style-type: none"> - 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 - 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
Datos a obtener	<ul style="list-style-type: none"> - Eficiencia de desinfección contra dosis de ozono transferido en función del tiempo de contacto, la concentración de ozono en el gas y el pH - Ozono residual contra dosis transferida para varios tiempos de retención, tasas aplicadas y valores de pH - Velocidad de consumo de ozono para un intervalo de dosis transferidas, a diferentes valores de pH - Efecto de la aplicación del ozono sobre tratamientos posteriores (ejemplo: variación de dosis requerida de coagulante, generación de subproductos de desinfección) - Características de contacto (ejemplo: t₁₀, t₅₀ y número de dispersión) para varios flujos y velocidades del gas de alimentación (estudio de trazado) - Eficiencia de la ozonación (ejemplo: desinfección u oxidación) y conveniencia de diferentes localizaciones en el tren de tratamiento - Consideraciones especiales de la cámara de contacto (ejemplo: disolución por burbuja fina o por turbinas (tamaño de burbujas))
Personal	<ul style="list-style-type: none"> - Al menos un operador de tiempo completo para seguimiento. Algunas pueden llevarse a cabo con equipos automatizados - Dos operadores durante el arranque y períodos de intensos de prueba - Un técnico laboratorista para analizar parámetros específicos

4.6.2. La eficiencia de transferencia de ozono

Se calcula a partir de la concentración de ozono en el gas de alimentación (O₃ entrada) y en el de salida (O₃ salida), como se muestra en las siguientes ecuaciones:

$$TE = \frac{[(O_3 \text{ entrada}) - (O_3 \text{ salida})]}{(O_3 \text{ entrada})} * 100 \quad (4.6)$$

Con este dato se obtiene la masa transferida (TM)

$$TM = TE * [O_3 \text{ entrada}] * V_f \quad (4.7)$$

la dosis en *batch*

$$Dosis(O_3) \text{ batch} = \frac{[TM * T_{\text{alimentación}}]}{V_r} \quad (4.8)$$

y en continuo

$$Dosis(O_3) \text{ continuo} = \frac{TM}{V_f} \quad (4.9)$$

donde

TE :	Eficiencia de transferencia, %
TM :	Masa transferida, mg O_3 /l
<i>Talimentación</i> :	Tiempo de alimentación
<i>Dosis(O_3) batch</i> :	Dosis de ozono para reactor tipo batch, mg /l
<i>Dosis(O_3) continuo</i> :	Dosis para reactor tipo continuo, mg/l
O_3 entrada:	Concentración de ozono en el gas de alimentación al reactor, mg/l
O_3 salida:	Concentración de ozono en el gas de salida, mg/l
V_r :	Volumen del reactor, l
V_f :	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 (Figura 4.12) pueden ser usadas para asignar los requerimientos de desinfección. Para cualquier otra aplicación de ozono, como el abatimiento del color, se generan gráficas semejantes.

4.7. CONTROL Y MEDIDAS DE SEGURIDAD EN LAS INSTALACIONES DE OZONO

Al trabajar con ozono, el personal, el equipo y las estructuras, así como el medio ambiente deben estar protegidos de la exposición a altas concentraciones. En la tabla 4.14 y tabla 4.15 se presentan los aspectos que deben ser tomadas en cuenta.

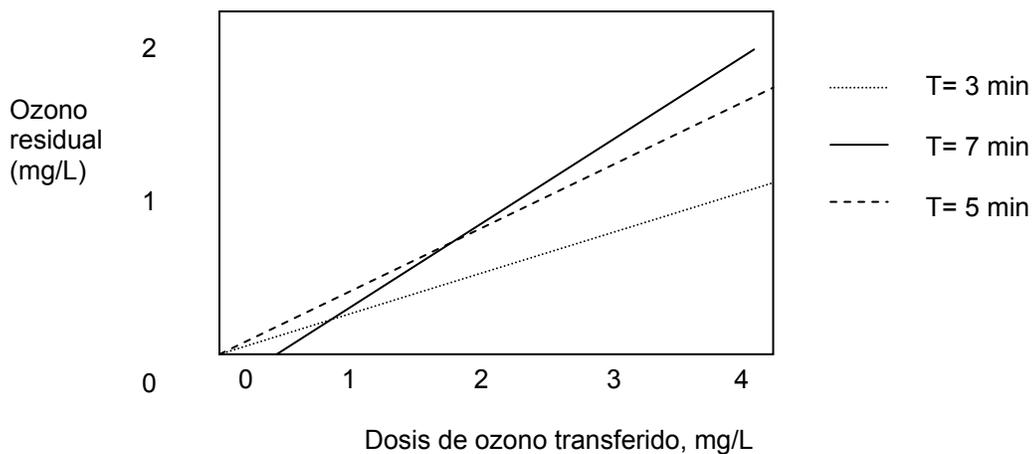


Figura 4.12. Determinación de la demanda de ozono

Tabla 4.14. Aspectos de seguridad

SISTEMA DE CONTROL	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 (ej: 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 En una cámara de contacto se debe contar con mecanismos de control y manejo de los gases de salida para proteger al personal de una exposición al ozono Tratamiento del gas de salida Control de la explosividad del sistema Presencia de gases diferentes al ozono, oxígeno y nitrógeno (Ej: gases venenosos de la catálisis) Potencial de inundación por agua Materiales de construcción adecuados

4.8. 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), patógeno que fue seleccionado por ser considerado actualmente como criterio para asegurar la desinfección con ozono por la EPA. Lo anterior es equivalente al criterio francés de guardar durante 4 minutos, un residual de ozono de 0.4 mg/l en la última cámara de contacto.

Datos:

Gasto: 650 m³/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 norma de agua potable NOM –127-SSA1-1994.

Solución

En la desinfección con ozono, el factor limitante es la velocidad de inactivación de los microorganismos y no la transferencia de masa (como es el caso de la oxidación química), por lo que es necesario aproximar 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 (Figura 4.13).

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

$$\frac{Q_{GO_3}}{Q_{LH_2O}} = \text{de } 0.15 \text{ a } 0.20 \quad (4.10)$$

donde

Q_{GO_3} : Flujo de gas ozonado, m³/h
 Q_{LH_2O} : Flujo de agua a tratar, m³/h

Tabla 4.15. 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, y el residual en el agua) Puntos de muestreo manual para control Posibilidad de operación manual en todas las instancias
De la salida del gas y de remoción	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

Adaptado de: Langlais *et al.* , 1991

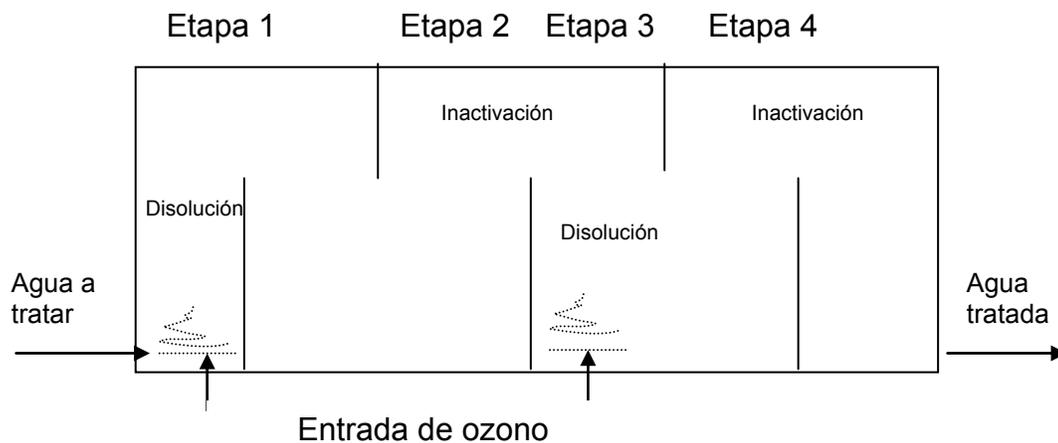


Figura 4.13. Cámara de desinfección de cuatro etapas

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 establece que se requiere de 0.3 mg/l de ozono para inactivar 3 log de *Giardia*.

Posteriormente, a partir de la tabla 4.16 se obtiene el producto de la ley de Chick $C \cdot t$ para 3 unidades log a 20 °C. Donde C es la concentración residual del desinfectante expresada en mg/l 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.

Tabla 4.16. 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

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

Fuente: U.S. EPA, 1989

Procedimiento:

Así el valor obtenido para C•t es de 0.72, con el cual se despeja el tiempo de contacto o de retención hidráulica (t = TRH)

$$C \bullet TRH = 0.72 \quad (4.11)$$

de donde

$$TRH = \frac{0.72 \text{mg/l} \cdot \text{min}}{0.3 \text{mg/l}} = 2.4 \text{min} \quad (4.12)$$

Puesto que el tiempo de retención hidráulica es afectado por cortos circuitos, se debe obtener el valor de t_{10} 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.

$$TRH_{\text{corregido}} = TRH \cdot 0.5 = 2.4 \text{min} \cdot 0.5 = 1.2 \text{min} \quad (4.13)$$

Con el TRH corregido se calcula el volumen de la primera cámara de contacto con la ecuación:

$$V = Q \cdot TRH \quad (4.14)$$

$$V = \frac{650 \text{ m}^3}{\text{h}} \cdot 1.2 \text{ min} \cdot \frac{1 \text{ h}}{60 \text{ min}} = 13 \text{ m}^3$$

y se dimensiona la cámara de la siguiente manera:

$$V = A \cdot L \cdot H = S \cdot H \quad (4.15)$$

donde:

V: Volumen de la cámara de contacto, (m³)

A: Ancho de la cámara de contacto, (m)

L: largo del la cámara de contacto, (m)

H: Altura de la cámara de contacto, (m), generalmente entre 4 y 7 m.

S: Area 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

$$S = 1.5A * A$$

de donde

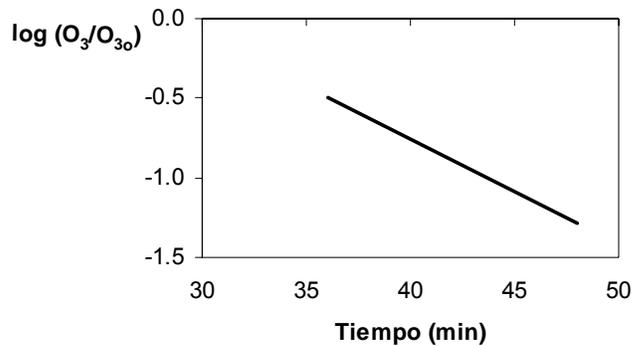
$$A = \sqrt{\frac{3.2 m^2}{1.5 m}} = 1.417m$$

y L

$$L = \frac{V}{A * H} = \frac{13m^3}{1.417m * 4m} = 2.20m$$

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 mg/l), 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 se obtuvo de la gráfica de la figura 4.14 donde k' resulta igual a 0.06 min⁻¹.



donde

- O_3 : Concentración de ozono al tiempo t , (mg/l)
- O_{30} : Concentración inicial de ozono, (mg/l)
- k' : Tasa de consumo de ozono, (min^{-1})

Figura 4.14. Representación del $\log ([O_3]/[O_3]_0)$ contra el tiempo, para obtener el coeficiente k

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 $C \cdot t$ se determinará por medio de la ecuación 4.16:

$$C \cdot t = TRH \cdot t_{10} \frac{[C_0]}{k' \cdot t} * (1 - \exp^{-k' t}) \quad (4.16)$$

$$C \cdot t = 2 \text{ min} * 0.4 \frac{0.3 \text{ mg/l}}{0.06 \text{ min}^{-1} * 2 \text{ min}} * (1 - \exp^{-0.06 * 2}) = 0.226 \text{ mg/l} \cdot \text{min}$$

El valor requerido de $C \cdot t$ será entonces la diferencia entre el valor de $C \cdot t$ fijado en la etapa 1 y el valor obtenido en la etapa 2:

$$C \cdot t \text{ requerido} = 0.72 \text{ mg/l} \cdot \text{min} - 0.226 \text{ mg/l} \cdot \text{min} = 0.494 \text{ mg/l} \cdot \text{min}$$

La concentración de ozono que abandona la etapa 2 se calcula con la ecuación 4.17:

$$[C] = C_0 e^{-k' t} \quad (4.17)$$

$$[C] = 0.3 \exp(-0.06 \cdot 2) = 0.266 \text{ mg/l}$$

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

$$V=8.66 \text{ m}^3, S=2.166 \text{ m}^2, A=1.2 \text{ m}, L=1.78 \text{ m}$$

Cálculo de la tercera etapa:

En esta etapa la adición de ozono es con mezclado. El valor de t_{10} es de $0.5 \cdot TRH$ y también se fija un residual de 0.3 mg/l . 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

$$C \cdot t = TRH * F * C_0 \quad (4.18)$$

donde

TRH: Tiempo de retención hidráulica teórico.

FC: Factor de corrección para evitar los cortos circuitos

C_0 : Concentración inicial de ozono para la tercera etapa y el residual de la segunda, (mg/l).

$$C \cdot t = 2 \text{ min} * 0.5 \left(\frac{0.3 \text{ mg/l}}{2} \right) = 0.150 \text{ mg/l} \cdot \text{min}$$

El valor de $C \cdot t$ requerido es la diferencia entre los valores de $C \cdot t$ obtenidos en las etapas dos y tres:

$$C \cdot t \text{ requerido} = 0.494 \text{ mg/l} \cdot \text{min} - 0.150 \text{ mg/l} \cdot \text{min} = 0.344 \text{ mg/l} \cdot \text{min}$$

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:

$$V = 10.83 \text{ m}^3, S = 2.70 \text{ m}^2, A = 1.34 \text{ m}, L = 2.02 \text{ m}$$

Calculo de la cuarta etapa:

En esta etapa se debe de mantener un valor de $C \cdot t$ de $0.344 \text{ mg/l} \cdot \text{min}$ y el residual de ozono debe ser de 0.3 mg/l . Es necesario calcular el TRH con la ecuación 4.19:

$$t = -\frac{1}{k'} * \ln \left(1 - \frac{k' * C \cdot t}{FC * C_0} \right) \quad (4.19)$$

$$t = -\frac{1}{0.06} * \ln \left(1 - \frac{0.06 * 0.344}{0.4 * 0.3} \right) = 3.14 \text{ min}$$

La k' , es la obtenida para el consumo de ozono y el factor de corrección puesto que no hay mezclado es de 0.4.

Con la ecuación 4.20 se verifica que el valor obtenido del tiempo de retención sea el correcto, para esto el valor de $C \bullet t$ debe ser igual a 344 mg/l · min:

$$C \bullet t = TRH \cdot FC \left(\frac{C_0(1 - e^{-k't})}{k't} \right) \quad (4.20)$$

$$C \bullet t = 3.14 \cdot 0.4 \left(\frac{0.3(1 - e^{-0.06(3.14)})}{0.6(3.14)} \right) = 0.344 \text{ mg} / \text{L} \cdot \text{min}$$

Si el ozono se aplica para desinfectar al inicio del tren de tratamiento y se busca también un efecto benéfico sobre procesos subsecuentes (4.8.4) entonces el tiempo de retención de esta etapa debe ser suficiente para que el ozono desaparezca antes de que el agua abandone la cámara de contacto. Para un residual a la salida menor de 0.1 mg/l, el tiempo de retención se calcula con:

$$t = -\frac{1}{k'} \ln \frac{C}{C_0} \quad (4.21)$$

$$t = -\frac{1}{0.06} \ln \frac{0.1}{0.3} = 18.3 \text{ min}$$

Procediendo de igual forma que en las etapas anteriores se obtienen las dimensiones de la cuarta etapa:

$$V = 198.25 \text{ m}^3, S = 49.56 \text{ m}^2, A = 5.74 \text{ m}, L = 8.62 \text{ m}$$

Finalmente, la cámara de desinfección queda dimensionada con las características de tabla 4.17.

Tabla 4.17. Características y dimensiones de la cámara de desinfección primaria

Dimensiones	Etapas 1	Etapas 2	Etapas 3	Etapas 4
Altura H, (m)	4.00	4.00	4.00	4.00
Ancho A, (m)	1.417	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 <i>Giardia</i> : 99.9 % - Constante de velocidad $k' = 0.06 \text{ min}^{-1}$ - Flujo de agua a tratar = 650 m ³ /h			

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 mg/l (o el que se fije) durante 4 minutos. En este caso se usan las mismas ecuaciones y se obtiene la tabla 4.18.

Tabla 4.18. Características y dimensiones de la cámara de desinfección secundaria para un residual de 0.4 mg/l 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	<ul style="list-style-type: none"> - Inactivación de quistes de <i>Giardia</i>: 99.9 % - Constante de velocidad $k = 0.06 \text{ min}^{-1}$ - Flujo de agua a tratar = 650 m³/h 			

Cabe señalar que para la oxidación química el procedimiento de diseño es diferente ya que el factor limitante es la transferencia de masa.

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 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. Pero, la razón más importante fue que la cloración resultó ser más eficiente y rentable (Rajeshwar y Ibañez, 1997).

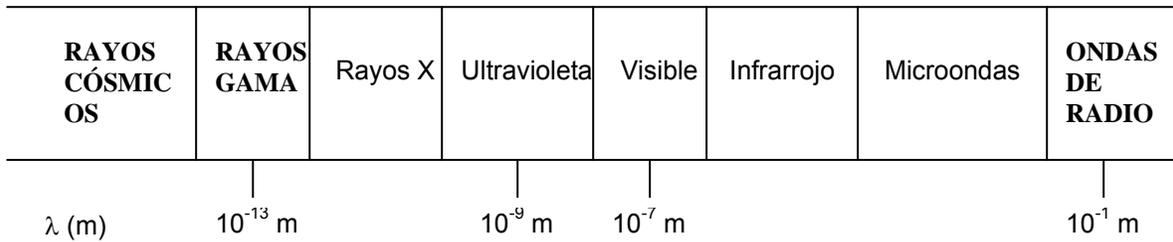
Paradójicamente, hoy en día la desinfección con luz UV es un proceso que está ganando terreno con respecto a la cloración debido a la estricta reglamentación de los organoclorados que esta última ha generado. En los últimos 20 años, el uso de la luz UV se ha incrementado incluso en plantas de tratamiento de aguas residuales (Droste, 1997). Comparada con la cloración, 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 y 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.

5.1. CARACTERÍSTICAS

La luz ultravioleta es una radiación electromagnética que está presente en el espectro natural de la radiación solar. Tiene una longitud de onda⁷ menor a la de la luz visible (400 nm) y mayor a la de los rayos X (100 nm) (Figura 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.

⁷ Las unidades estándar para longitud de onda es el nanómetro (nm). 1 nm = 10⁻⁹ m.



λ = Longitud de onda

Figura 5.1. Espectro Electromagnético

La región de UV se divide en cuatro subregiones: UV de vacío, UV-C, UV-B y UV-A (Figura 5.2).

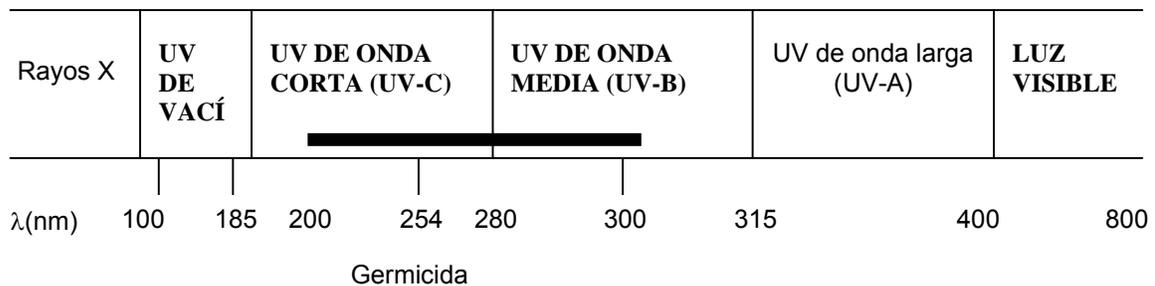


Figura 5.2. Espectro electromagnético con escala expandida de la radiación ultravioleta

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).

5.2. PROPIEDADES FÍSICAS Y QUÍMICAS

5.2.1. 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 ADN⁸ y el ARN⁹) y por los cuales ocurre la desinfección han sido ampliamente estudiados. El ADN está constituido por nucleótidos compuestos a su vez por una molécula de azúcar, otra de fosfato y una

⁸ Ácido desoxirribonucleico, ADN.

⁹ Ácido ribonucleico, ARN.

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 impide la reproducción o produce la muerte de la célula (Metcalf y Eddy, 1996). La dimerización de dos timinas es la más eficiente para inactivar los microorganismos (Figura 5.3) (Darby *et al.*, 1995).

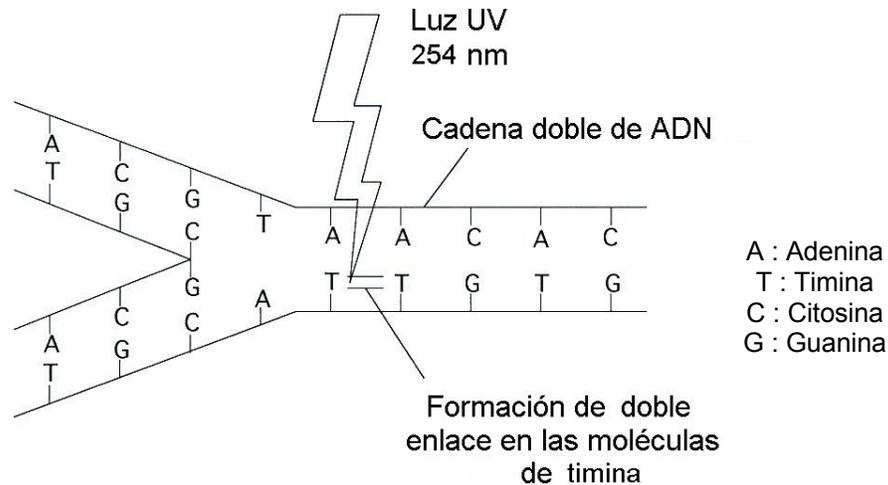


Figura 5.3. Acción germicida de la luz UV sobre las bases nitrogenadas

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.

5.2.1.1. 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:

- 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.

5.2.2. Interferencias

El éxito de la desinfección con luz UV depende de las características del agua residual como se muestra en la tabla 5.1.

5.2.2.1. 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.

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

- **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%). 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 frecuente para el agua potable es de 75 a 95 %. Para el agua residual, generalmente los procesos basados en un crecimiento biológico suspendido producen efluentes con una transmitancia de entre 60 y 65 % (Sakamoto, 1996). Un comité de la *National Sanitation Foundation* en Michigan Estados Unidos estableció que no es conveniente usar luz UV cuando el porcentaje de transmitancia es menor a 75%, aunque con los avances recientes es aceptable hasta un 40%.

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.

- **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 camisas 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 (Toft *et al.*, 1988).

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).

5.2.2.2. 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 (Figura 5.4). 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.

5.2.3. 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.

$$D = I \times t \quad (5.1)$$

donde

D : dosis de luz UV, mW s/cm²

I : intensidad promedio de la energía UV, mW/cm²

t : tiempo de exposición, s

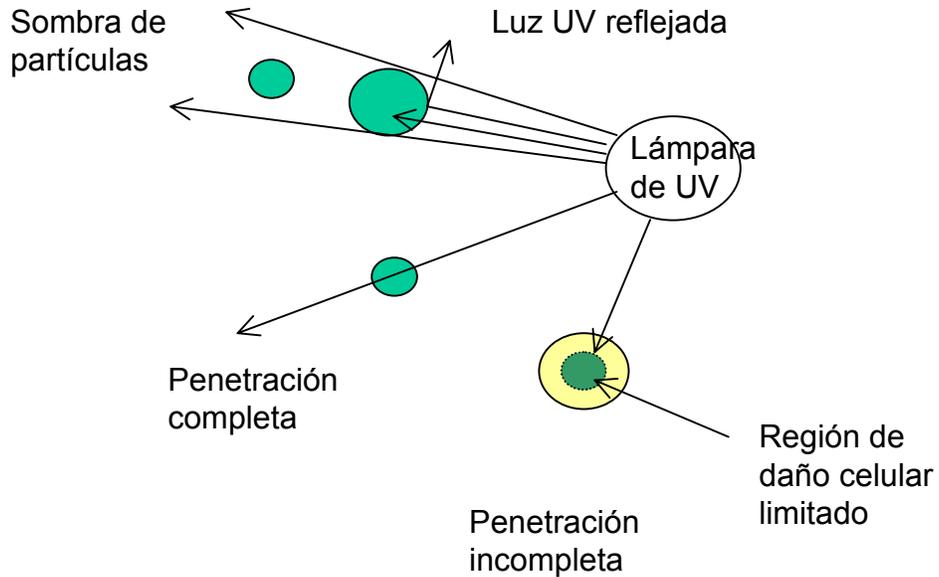


Figura 5.4. Efecto de las partículas en la radiación de luz UV

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

Tabla 5.2. Factores que afectan la dosis

FACTORES QUE AFECTAN EL RENDIMIENTO				
DOSIS	=	INTENSIDAD	X	TIEMPO DE RETENCIÓN
		Calidad del Agua Transmisión UV Sólidos Suspendidos Orgánicos Disueltos Hierro, Calcio, Magnesio		Caudal Patrón de flujo Existencia de cortos circuitos o zonas muertas Diseño del Reactor Disponibilidad del terreno
		Condición de la Lámpara Limpieza de la Camisa Envejecimiento		
		Proceso de Tratamiento		

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 requieren 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, 1996). La tabla 5.3 muestra las diferentes dosis requeridas para una variedad de microorganismos.

5.3. PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO

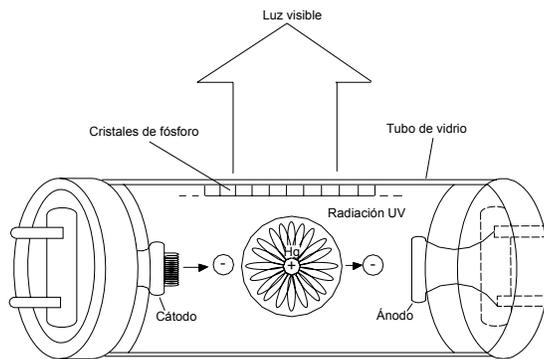
Todas las lámparas germicidas se basan en el mismo principio de funcionamiento: la radiación ultravioleta es generada por el paso de una descarga eléctrica a través de vapor de mercurio ionizado mezclado con un gas noble. Debido a que los gases a presión atmosférica no son buenos conductores de la electricidad 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 (Figura 5.5) (Cheremisinoff y Cheremisinoff, 1993).

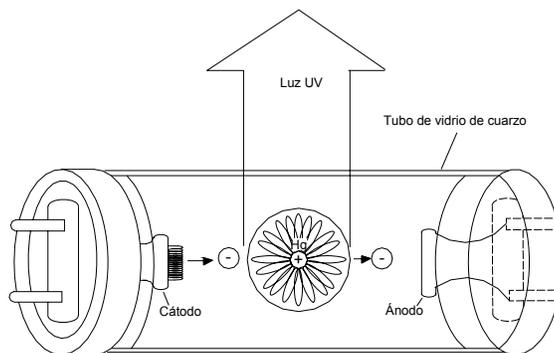
Tabla 5.3. Comparación de la sensibilidad de diferentes microorganismos a la desinfección con luz UV

MICROORGANISMO	DOSIS (mW s/cm ²) PARA LA REDUCCIÓN DE UN 90% EN LA CUENTA	
Bacterias		
Bacillus anthracis	Gram +	4.5
Bacillus subtilis (esporas)	Gram +	12
Corynebacterium diphtheriae	Gram +	3.4
Staphylococcus aureus	Gram +	5.0
Streptococcus faecalis	Gram +	4.4
Escherichia coli	Gram -	3.2
Pseudomona aeruginosa	Gram -	5.5
Salmonella enteritidis	Gram -	4.0
Salmonella typhi	Gram -	2.1
Shigella dysenteriae	Gram -	2.2
Virus		
Bacteriofago F		6.9
Virus de la influenza		3.6
Poliovirus		9.5
Rotavirus		11.3
Protozoo		
Giardia lamblia		82
Crytosporidium parvum		80

Adaptado de: Cairns, 1991



Lámpara fluorescente



Lámpara UV

Fuente: Toft *et al.*, 1988

Figura 5.5. Comparación entre una lámpara fluorescente y una germicida.

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 gasificadas de mercurio dificulte la salida de luz UV con longitud de onda de 254 nm de la lámpara, pues al ser emitido un fotón¹⁰ de UV por un átomo de mercurio, otro cercano lo absorba.

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.

5.4. 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 5.4).

Tabla 5.4. Distribución espectral relativa de radiadores ultravioleta

Tipo	Presión	Fabricante	Debajo de 254nm	254 nm	254-300 nm	300-334 nm	365 nm	Luz visible
T/M5/369	Baja	2	---	185	0.55	1.26	1.0	4.46
UA27A2 350V; 4 A	Baja	3	0.122	0.316	0.75	1.06	1.00	2.39
A.C. 150 W	Baja	5	0.123	0.313	0.79	1.10	1.00	2.35
H-5 250 W	0.4 atm	6	---	---	---	---	1.00	4.41
UA27A2 220V;3.75 A	1.04 atm	4	0.475	0.332	0.91	1.08	1.00	2.44
A.C. 250 V 3.5 A	Alta	2	0.111	0.281	0.63	1.09	1.00	2.56
D.C. 230 V 3.5 A	Alta	2	0.094	0.348	0.83	1.04	1.00	2.48
AC Uviarc 600W; 183 V 3.92 A	---	3	0.338	0.348	0.92	1.07	1.00	2.61
UV 1 Lámpara de sol	---	1	---	---	0.24	0.99	1.00	

Fabricantes:

- (1) G.E.C. (Inglaterra), (4) Hanovia, Ltd. (Inglaterra)
 (2) Thermal Syndicate, Ltd. (Inglaterra), (5) cf. Rev. Scient. Instr., 1938; 9; 325
 (3) G.E. de América, (6) Standard American

Fuente: Summer, 1957

Las lámparas de mercurio se clasifican con base en la presión del gas a la que trabajan como se muestra en la tabla 5.5, siendo las de baja presión las que emiten más radiación en la región ultravioleta, principalmente a 254 nm.

¹⁰ Partícula de luz

Tabla 5.5. 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

Fuente: WEF, 1996

Actualmente, se da un énfasis especial al 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.

5.4.1. Lámparas de baja presión

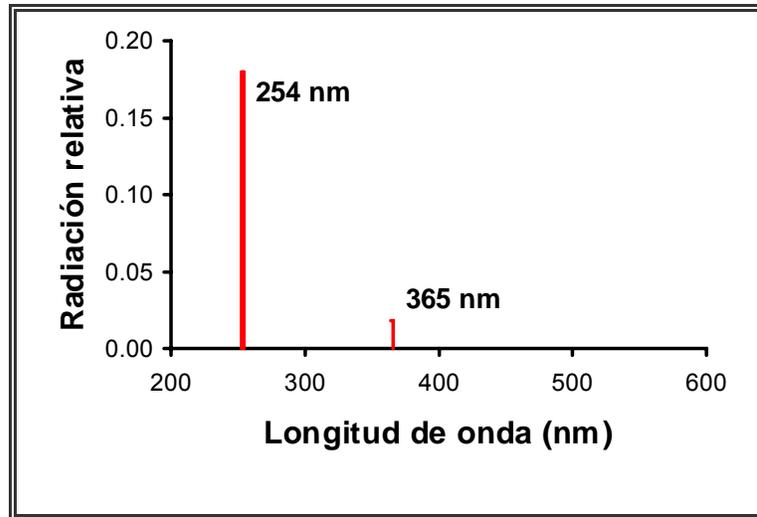
Hoy en día, el principal método de generación empleado en la desinfección de agua es el de la lámpara de mercurio de baja presión (9.5 x 10⁻⁶ kg/cm²). En éstas la intensidad es de 0.18 W de luz UV por centímetro de longitud de arco¹¹, lo que produce una **intensidad estándar** (a 254 nm) de 13.8 y 26.7 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:

Emitir el 85 % de luz monocromática (

- Figura 5.6) con una longitud de onda de 254 nm (Metcalf y Eddy, 1996)
- Tener eficiencia germicida de cinco a diez veces mayor que las de alta presión (Cheremisinoff y Cheremisinoff, 1993).

¹¹ Distancia entre los electrodos de la lámpara.



Fuente: Sakamoto, 1999

Figura 5.6. Radiación emitida por una lámpara de UV de baja presión

5.4.1.1. 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).

5.4.2. 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 9.5×10^{-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 (WEF, 1996).

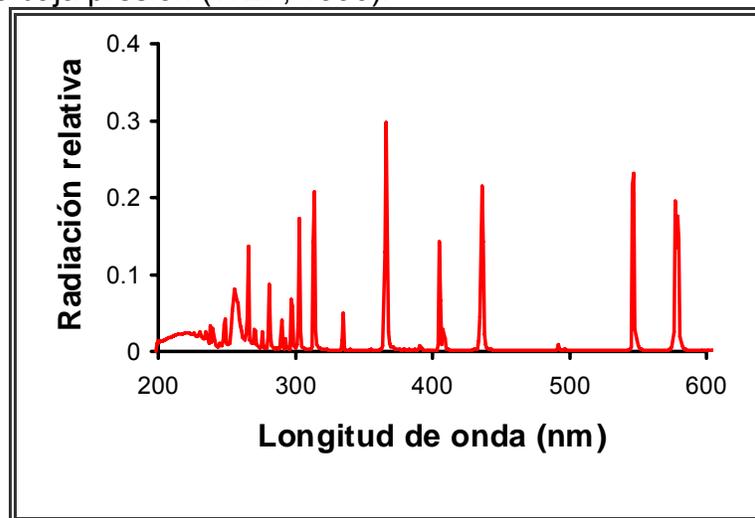
5.4.3. Lámparas de presión media

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 temperatura del agua residual no tiene impacto en la temperatura de operación (WEF, 1996).

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 (WEF, 1996).

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 (Figura 5.7) 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% es convertida en radiación (como ocurre en las lámparas de baja presión), pero solamente el 25% 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% en comparación con un 30 a 35% que ocurre en las lámparas de baja presión (WEF, 1996).



Fuente: Sakamoto, 1999

Figura 5.7. Radiación relativa de una lámpara de presión media

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 (WEF, 1996).

La experiencia con lámparas de presión media es muy limitada. Tan sólo el 0.1% de las plantas de tratamiento en operación o construcción utilizan este tipo de sistema. Debido a su poco 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 (WEF, 1996).

5.4.4. Factores que afectan la intensidad de las lámparas

5.4.4.1. 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 (Figura 5.8).

La vida de operación para una lámpara de mercurio varía de 5,000 a 8,000 horas como se muestra en la tabla 5.6; sin embargo, algunas son operadas hasta por más tiempo (10,000 horas).

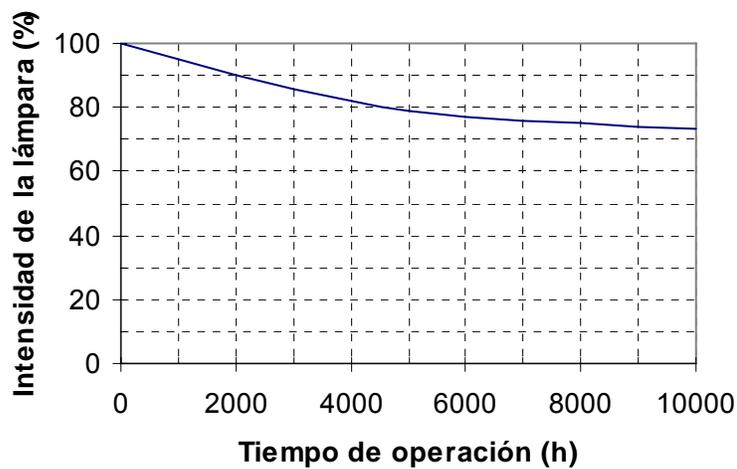


Figura 5.8. Intensidad de una lámpara de baja presión en función del tiempo

5.4.4.2. Calidad del agua

La vida de las lámparas también depende de la calidad de los efluentes y es más corta cuando existen altas concentraciones de iones (hierro, calcio y magnesio) o sólidos orgánicos.

Tabla 5.6. 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/cm²)	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

N.R: No Reportado
Adaptado de: WEF, 1996

5.4.4.3. 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% (Figura 5.9). 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% 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 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.

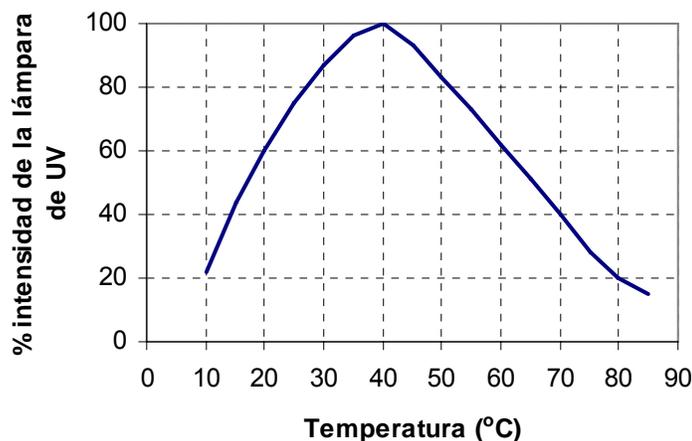


Figura 5.9. Variación de la intensidad en función de la temperatura

5.5. EQUIPOS DE LUZ ULTRAVIOLETA

A principios de los 80's los equipos consistían en cámaras cerradas que empleaban lámparas sumergidas o fuera del líquido. Actualmente, son modulares con lámparas sumergidas, generalmente 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 figura 5.10 se ilustra esta clasificación.

5.5.1. 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. En términos generales, esto se logra por la minimización de cortos circuitos y zonas muertas por medio de la geometría de las estructuras de la entrada y la salida que debe ser diseñadas para promover perfiles uniformes de velocidad (Fahey, 1990).

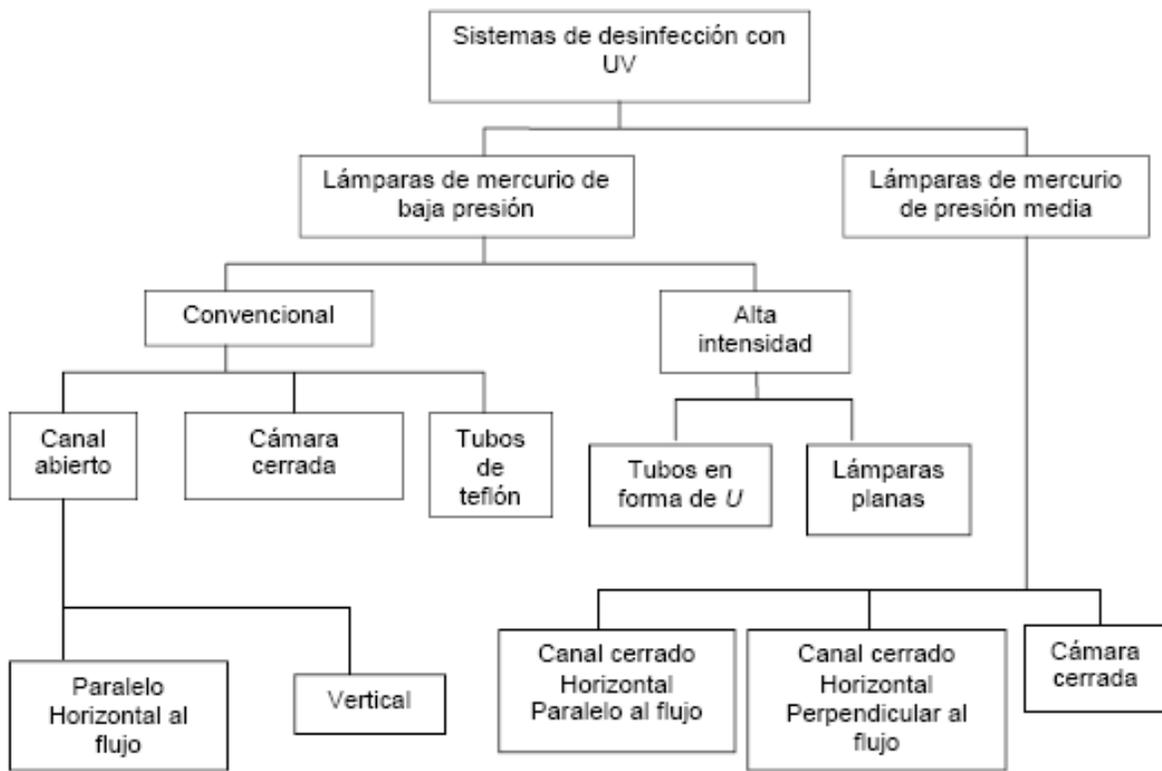


Figura 5.10. Tipos de sistemas de desinfección con luz UV

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 (Figura 5.11) (Toft *et al.*, 1988).

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

- **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 (WEF, 1996). 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 (Fahey, 1990).

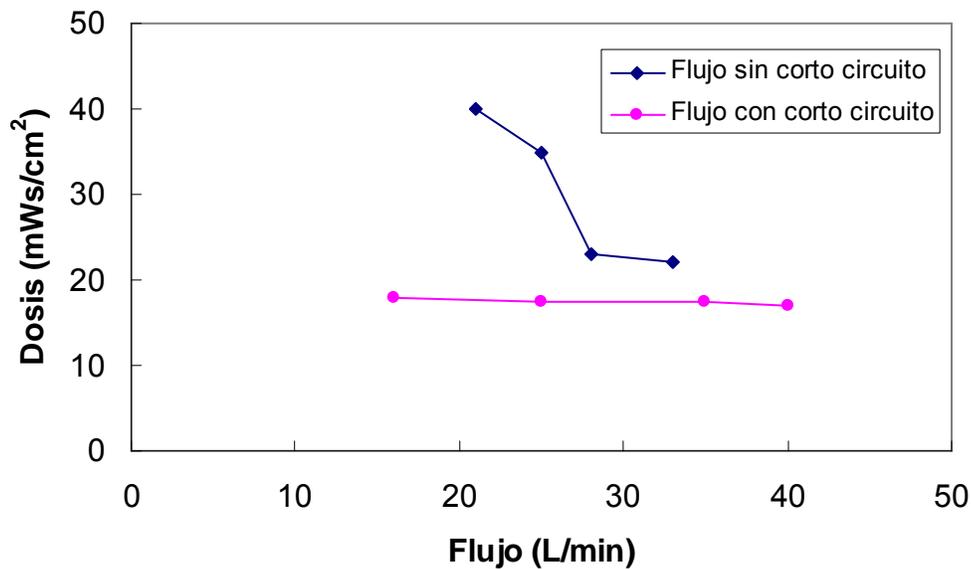


Figura 5.11. Efecto del flujo en la dosis de luz UV

5.5.2. Tipos de equipos

En la actualidad, los equipos más comunes (80% de los que están en operación) son los modulares de canal abierto con lámparas de mercurio de baja presión (WEF, 1996). 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**¹² muy densos (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% menor que el de baja presión.
- Pocos requerimientos de limpieza debido al reducido número de lámparas.

¹² Banco: 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

Entre las desventajas se pueden mencionar (WEF, 1996):

- Altos costos de operación y mantenimiento (no se incluye limpieza).
- Poca eficiencia desde el punto de vista energético.
- Elevados costos de inversión por lámpara (entre \$300 y \$500 USD).
- Costo elevado de operación por el cambio de lámparas.

5.5.3. 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

5.5.3.1. Canales abiertos

Los sistemas modulares en canal abierto son los más comunes para el tratamiento de aguas residuales. En estos, los módulos¹³ de UV están inmersos en el agua (Acher *et al.*, 1997). 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 (Fahey, 1990).

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 (Fahey, 1990). 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

¹³ Modulo: conjunto de lámparas colocadas dentro de una estructura de acero inoxidable.

5.5.3.2. 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 (Acher *et al.*, 1997).

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).

5.5.4. Clasificación de acuerdo con la disposición de las lámparas

5.5.4.1. 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 (Figura 5.12).

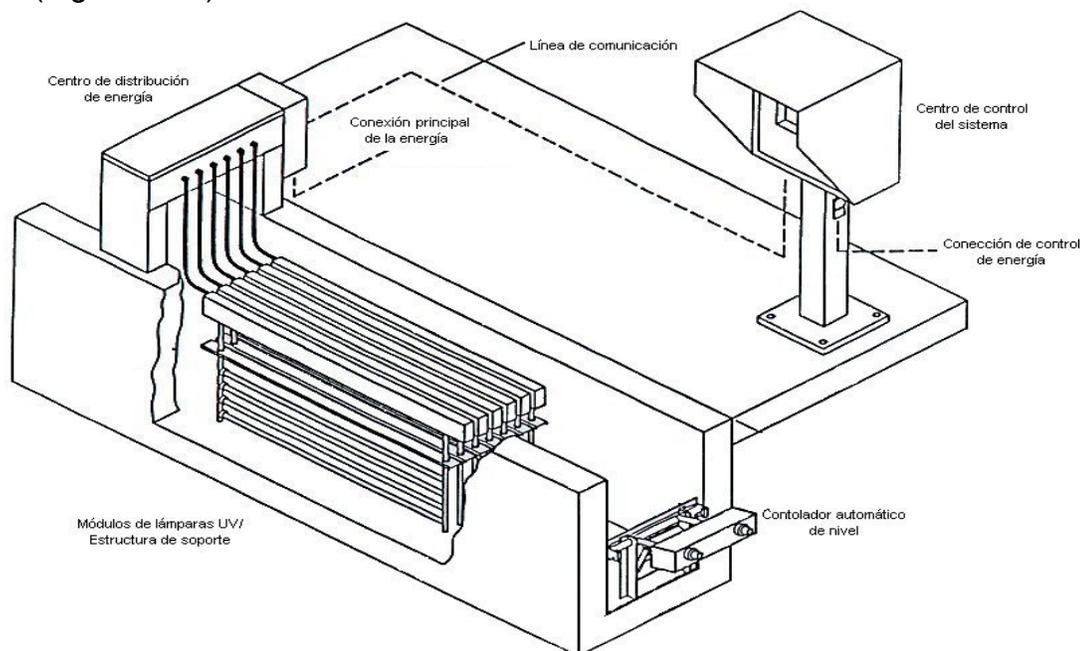
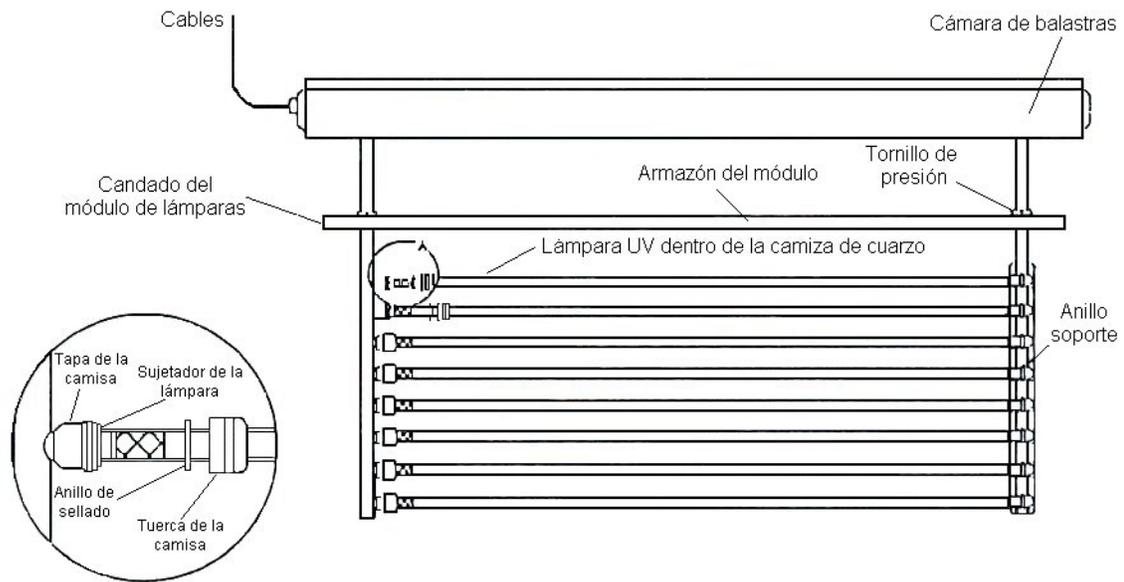


Figura 5.12. Esquema de un sistema horizontal de desinfección UV

En los sistemas horizontales pequeños, los módulos generalmente sostienen de 4 a 6 lámparas y los grandes de 8 a 16 (Figura 5.13). La lámpara más usada es la de 1.6 m de longitud (WEF, 1996). El conjunto lámpara-camisa de cuarzo es asegurado a la estructura utilizando un conector y un anillo (Figura 5.13). 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.



Detalle del conector

Figura 5.13. Módulo de lámparas UV

Los sistemas grandes se ofrecen en estructuras (Figura 5.14), 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.

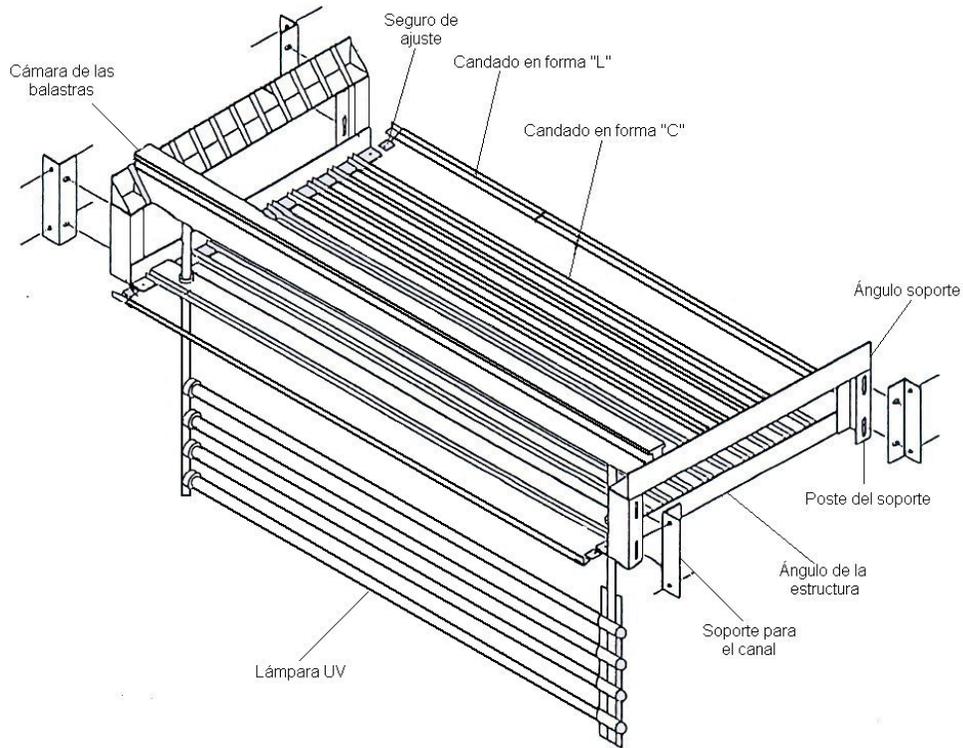


Figura 5.14. Estructura de un banco de lámparas de UV

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 (Figura 5.15) o vertederos fijos y móviles, siendo el primero el más común. 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.

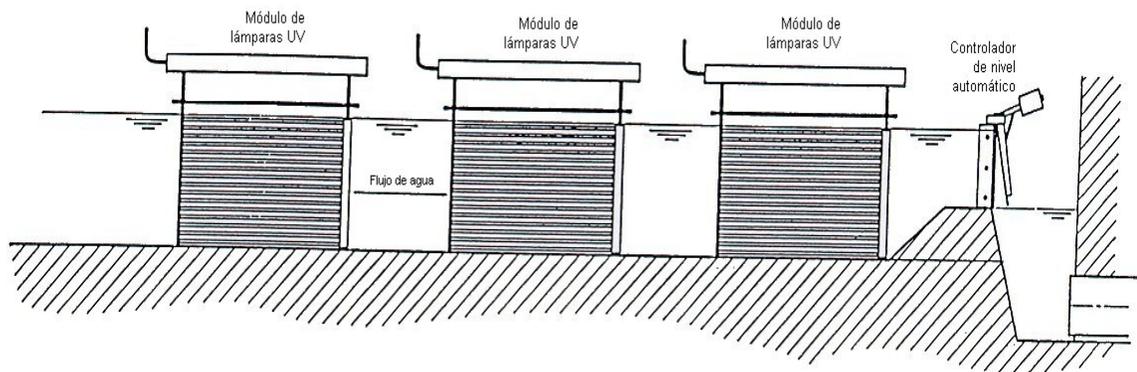


Figura 5.15. Control de nivel en un sistema horizontal

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.

5.5.4.2. 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 (Figura 5.16).

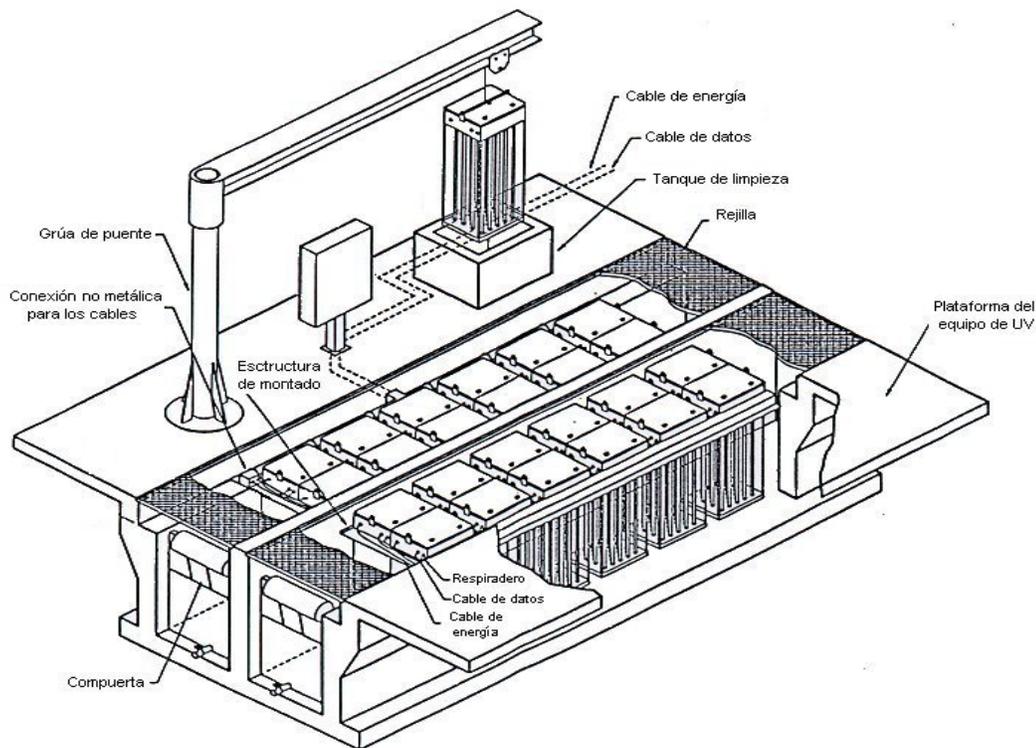


Figura 5.16. Esquema de un sistema vertical

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 (Figura 5.17a). 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 (Figura 5.17b).

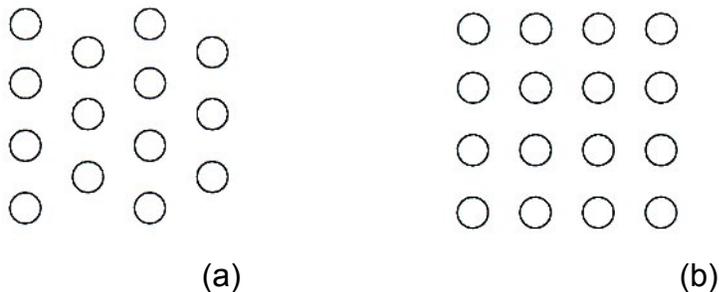


Figura 5.17. (a) Arreglo escalonado; (b) Arreglo uniforme

Los sistemas verticales generalmente usan las 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 (WEF, 1996).

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 (WEF, 1996).

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.

5.5.5. Sistemas comerciales

a) Trojan

Para agua potable Trojan Technologies (compañía canadiense) cuenta con el sistema UV800 (Figura 5.18). Las características de este sistema son:

- Lámparas de baja presión
- Refacciones totalmente electrónicas
- Monitores de luz UV
- Material de construcción: acero inoxidable

El UV800 ha encontrado aplicación en procesos de la industria farmacéutica, de alimentos y de autopartes.



Fuente: Trojan Technologies, Inc.

Figura 5.18. Sistema de desinfección UV800

Para aguas residuales, Trojan cuenta con el UV3000 para aguas residuales convencionales y el UV4000 se emplea para plantas de tratamiento grandes o con agua residual de baja calidad.

El sistema UV3000 (Figura 5.19) es de lámparas de baja presión, con posición horizontal y paralela al flujo. Se recomienda para flujos mayores de 0.4 L/s y tiene las siguientes características:

- Los módulos son instalados en un canal abierto
- El sistema de control es a prueba de agua, local, con alarma de baja intensidad y de falla de lámparas

Consiste en módulos de lámparas UV con camisas de cuarzo, balastras electrónicas, centro de distribución de energía, centro de control, sistema de detección de UV, controlador automático y sistema de limpieza.

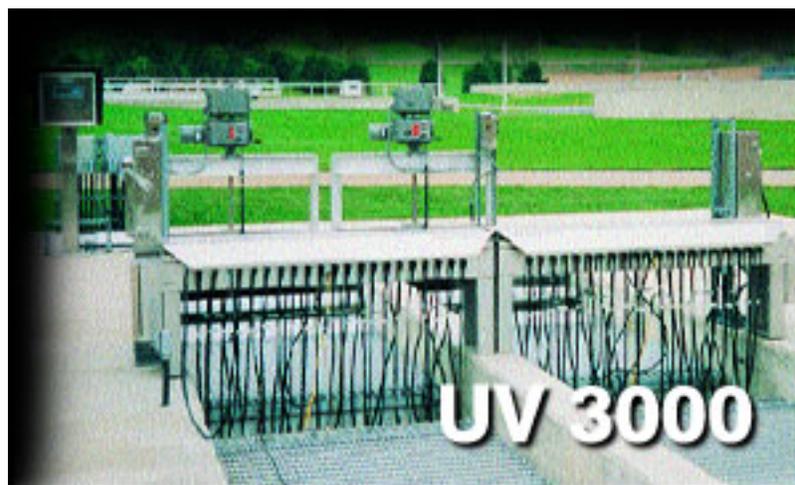


Figura 5.19. Sistema UV3000 de Trojan Technologies

El sistema UV4000 (Figura 5.20) cuenta con lámparas de alta intensidad que reducen el número total requerido en más de un 90%, por lo que minimiza el espacio requerido y los costos de instalación. Las lámparas de alta intensidad permiten operar con efluentes de baja calidad, como los primarios y secundarios, así como con agua de lluvia. Debido a su diseño, la intensidad de la lámpara puede variar de acuerdo con el flujo y la calidad del efluente. Además, cuentan con un sistema de autolimpieza.



Fuente: Trojan Technologies, Inc.

Figura 5.20. Sistema de desinfección UV4000

b) Rex UV

Rex UV systems (compañía española) presenta un sistema para la desinfección de aguas residuales (Figura 5.21). Maneja caudales desde 0.3 L/s hasta 58 L/s, con una dosis de 30 mWs/cm². Es de tipo cámara cerrada.



Figura 5.21. Equipo de desinfección (Rex UV systems)

c) UVTA

Los equipos de Ultraviolet Technology of Australasia (UVTA) son diseñados para tratar flujos de agua en potabilización desde 0.03 hasta 350 L/s. Los sistemas con que cuentan para agua potable (Figura 5.22) son de presión baja, media y alta. Los tres pueden desinfectar flujos hasta de 50 L/s basándose en una calidad del agua con menos de 2 UTN de turbiedad y 0.5 mg/l de hierro y más de 82 % de transmitancia.

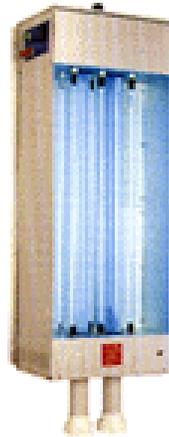


Figura 5.22. Equipo de desinfección para agua potable

El equipo *Terminator* puede desinfectar agua residual proveniente de un tratamiento secundario, con flujos de 20 hasta 350 L/s. Se caracteriza por contar con lámparas de baja presión (Figura 5.23).



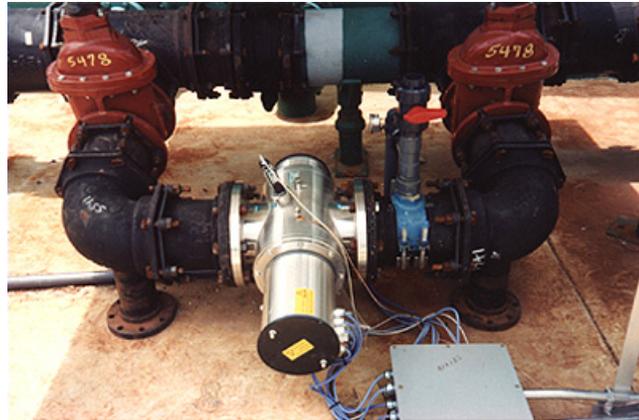
Figura 5.23. Sistema de luz ultravioleta para agua residual

d) Berson/Aquionics

Esta compañía presenta el sistema Aquionics *In Line*. Es pequeño (Figura 5.24) y consta de una lámpara de presión media. Se coloca perpendicular al flujo del agua y se emplea tanto para agua potable como residual y de proceso.



(a)



(b)

Figura 5.24. (a) Aquionics *In Line* 1000, (b) Aquionics *In Line* 1000 instalado

e) Watersolve International

Esta compañía ofrece sistemas de desinfección que utilizan camisas de teflón en lugar de las tradicionales de cuarzo. Se aplican para la desinfección de agua potable aunque también pueden ser utilizados en aguas residuales. La capacidad de estos equipos es de 0.3 L/s (Figura 5.25). El sistema incluye además la inyección de cloro para crear un residual en el efluente.



Figura 5.25. Equipo de desinfección con tubos de teflón

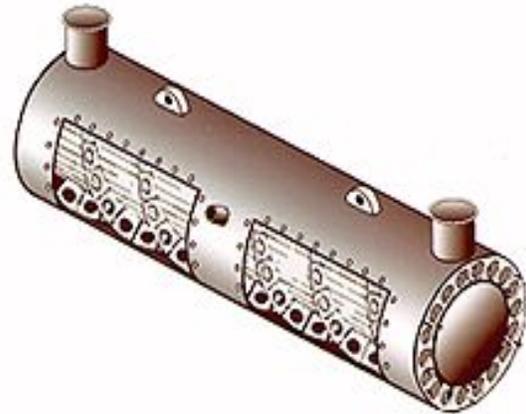
f) Safewater Solutions

Propone un sistema modular de desinfección SWS modelo TH-1C (Figura 5.26a) que consta de 18 lámparas de baja presión (de 1.9 m cada una) colocadas a lo largo de una cámara. Adheridas a las paredes se encuentran tres series de paletas distribuidas de tal forma que establecen un flujo helicoidal dentro de la cámara

(Figura 5.26b). Se aplica para desinfectar efluentes industriales, agua potable, agua residual y agua de lluvia. Es capaz de tratar un flujo máximo de un efluente primario de 41 L/s y de agua limpia de 91 L/s.



(a)



(b)

Figura 5.26. (a) Equipo SWS modelo TH-1C, (b) diseño del equipo SWS

5.6. 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 5.7.

Tabla 5.7. 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

Fuente: Loge *et al.*, 1996a

Las pruebas se realizan a nivel laboratorio o en planta piloto. En el anexo 2 se presenta una descripción general de los métodos analíticos empleados para determinar los parámetros de la tabla 5.7.

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 (sección 5.6.1) 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

5.6.1. 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 (Loge *et al.*, 1996b). Los resultados obtenidos del estudio con el equipo de luz colimada (anexo 2) 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.

Paso 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 figura 5.27.

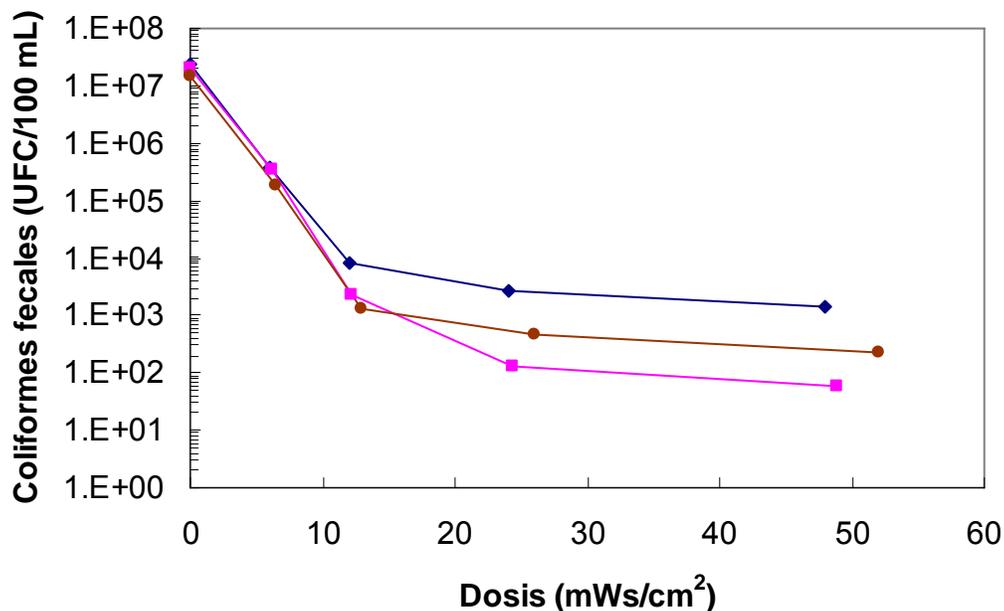


Figura 5.27. Curva de respuesta de coliformes fecales a diferentes dosis

Paso 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 (Figura 5.28).

Paso 3 Ajustar la dosis requerida (generalmente un 30%) tomando en cuenta tanto el envejecimiento de las lámparas como la formación de incrustaciones

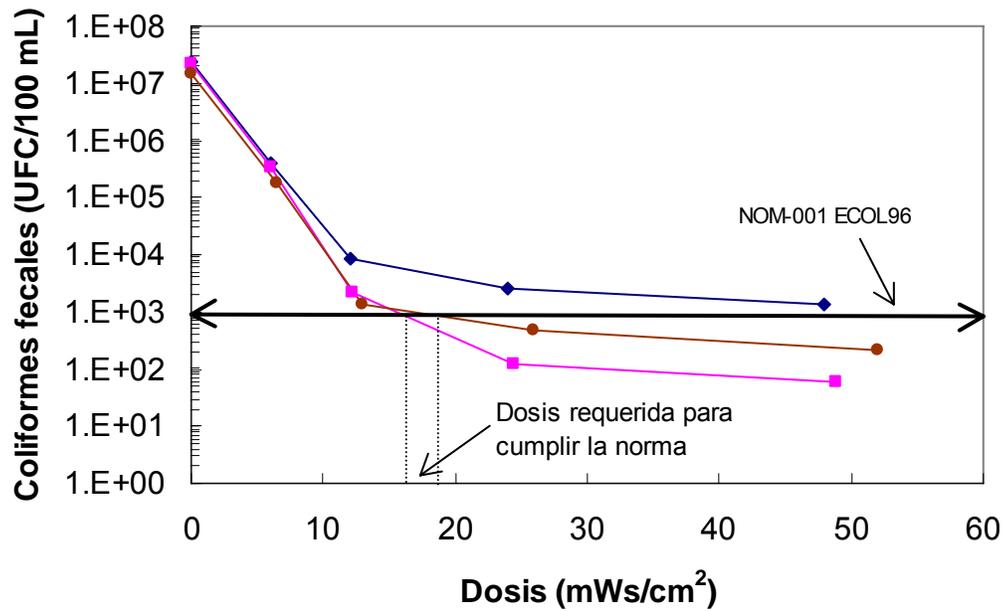


Figura 5.28. Selección de la dosis de desinfección

Paso 4

Usando algún método para determinar la intensidad de la radiación (WEF, 1996; Blatchley III E.,1997) determinar la intensidad promedio de luz UV en el sistema como se muestra en la figura 5.29.

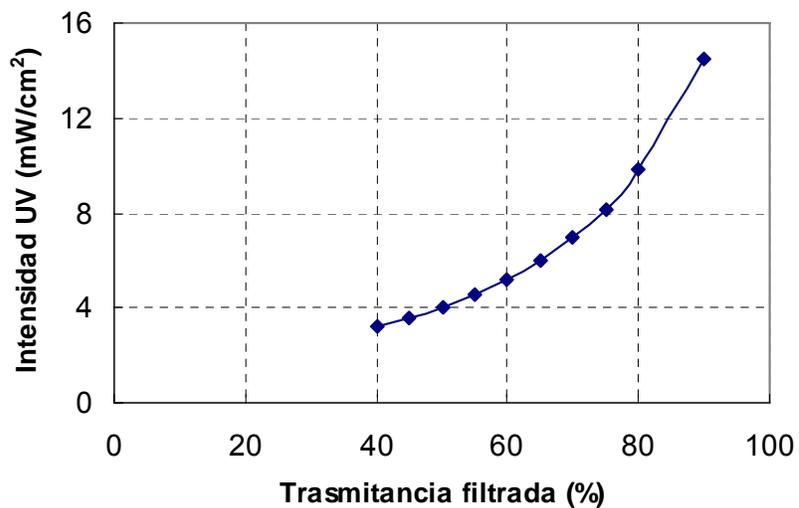


Figura 5.29. Curva que relaciona la intensidad promedio con la transmitancia filtrada del agua

Paso 5

Dada la intensidad promedio, determinar el tiempo de contacto

requerido para lograr la dosis anteriormente establecida.

$$\text{Tiempo de contacto} = \frac{\text{Dosis de UV (mWs/cm}^2\text{)}}{\text{Intensidad promedio (mW/cm}^2\text{)}}$$

Paso 6 Tomar el valor del flujo a ser tratado y determinar el volumen que debe ser retenido para lograr el tiempo de contacto requerido.

$$\text{Volumen (L)} = \text{Tiempo de contacto (s)} \times \text{Flujo de diseño (L/s)}$$

Paso 7 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 (Ver Loge *et al.*, 1996b).

$$\text{Número de lámparas requeridas para la desinfección} = \frac{\text{Volumen total (L)}}{\text{Volumen (L) / lámpara}}$$

5.7. OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO

El personal requerido así como la capacitación para la operación y mantenimiento de un sistema 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).

5.7.1. Reemplazo de lámparas

Las lámparas pierden del 30 a 40 % de su intensidad con el paso del tiempo y la mayor parte de los costos del mantenimiento son debido a su reemplazo (Fahey, 1990).

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 7000 u 8000 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.

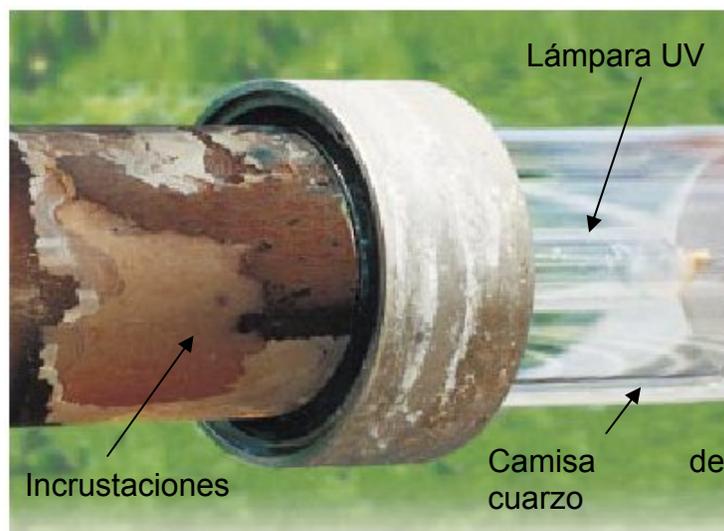
Se recomienda mantener un respaldo de lámparas equivalente a por lo menos 5% del número total de lámparas en el sistema.

5.7.2. 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 (Figura 5.30) (Fahey, 1990).



Fuente: Trojan Technologies, Inc.

Figura 5.30. Lámpara con incrustaciones

5.7.2.1. 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.

a) 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 (WEF, 1996). 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 (WEF, 1996). 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.

b) 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).

Forma en la que se realiza

Como operación se distinguen tres opciones:

- a. Con estante de limpieza portátil
- b. Con tanques de limpieza portátil
- c. Con limpieza del sistema fuera del canal

En la tabla 5.8 se indica cuando se deben usar cada uno.

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

- 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 enjuagado y colocado nuevamente en el canal, se conecta y se prende.

- 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 limpieza 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% (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.
- c. **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).

5.7.3. 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.

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.	- Seguir las prácticas de seguridad
- Asegurarse de que la protección requerida está disponible y se use en el trabajo.	- Usar protección adecuada para piel y ojos
	- Reportar el mal funcionamiento del equipo de luz UV
	- Limpiar las lámparas

- 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 sobrexposición 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.

5.8. EJEMPLO PRÁCTICO

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 NOM-001-ECOL-1996 establece el límite máximo permisible para lo siguiente

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 1000 y 2000 como número más probable (NMP) de coliformes fecales por cada 100 ml.

- *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 ciudad de México 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 hacia las afueras del valle de México por medio de tres salidas: el tajo de Nochistongo, el Gran Canal y el Emisor Central. 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 la legislación tanto nacional como internacional (Jiménez y Landa, 1998).

La evaluación del sistema de desinfección se llevó a cabo en una planta piloto localizada en el Gran Canal. El proceso de la planta incluía rejillas, floculación química con alumina 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 (Sakamoto, 1996).

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

5.8.1. Métodos

Los parámetros analizados en este estudio se muestran en la tabla 5.10.

Tabla 5.10. Parámetros analizados en el estudio de desinfección

Transmitancia de la muestra filtrada y no filtrada (%T)
Sólidos suspendidos totales (SST)
Distribución de tamaño de partícula (DTP)
Coliformes fecales (CF)

La desinfección se realizó con el equipo de luz colimada “*Collimated Beam*” (ver anexo 2), el cual cuenta con una lámpara de baja presión.

5.8.2. Resultados

La caracterización del agua para la desinfección se hizo con base en la determinación de % de transmitancia, sólido suspendidos totales y distribución de tamaño de partícula. Un resumen de los datos obtenidos se muestra en la tabla 5.11.

Tabla 5.11. Resumen de los datos de los parámetros medidos en diferentes efluentes

Efluente	%T	SST (mg/l)	DTP (μm)
Influente	2.9	102	16.9
Influente 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

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 aumento en los SST y las partículas grandes incrementa la supervivencia de los coliformes fecales (Tabla 5.12).

Tabla 5.12. 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

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% de partículas >31 μm requirieron dosis de luz UV mayores a 40 mWs/cm² para alcanzar los límites permisibles (1000 UFC/100 ml). Aquellos efluentes con concentraciones de SST entre 25 y 34 y 4% de partículas > 31 μm alcanzaron los límites permisibles con sólo 20 mWs/cm² (Figura 5.31)

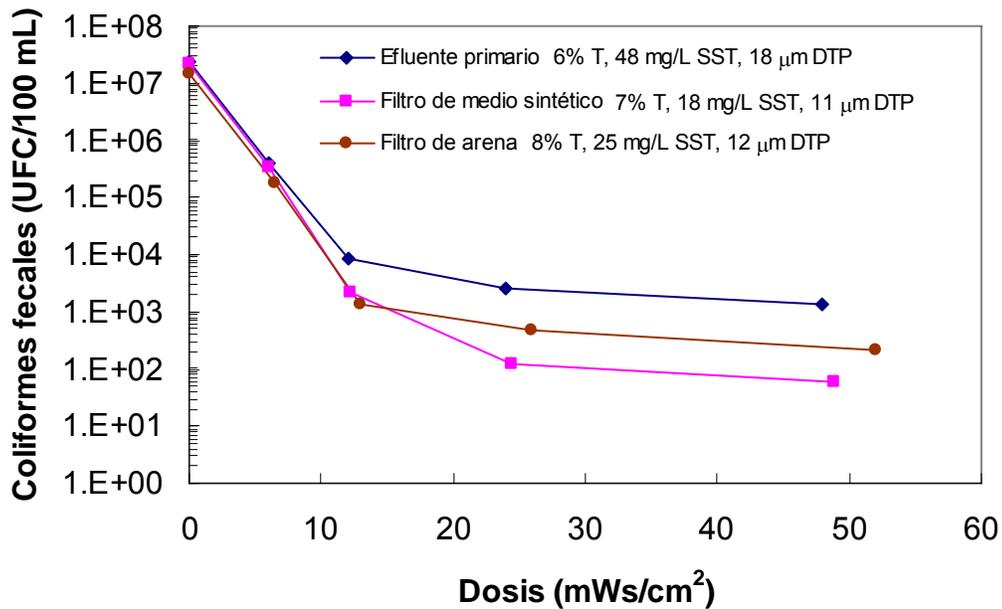
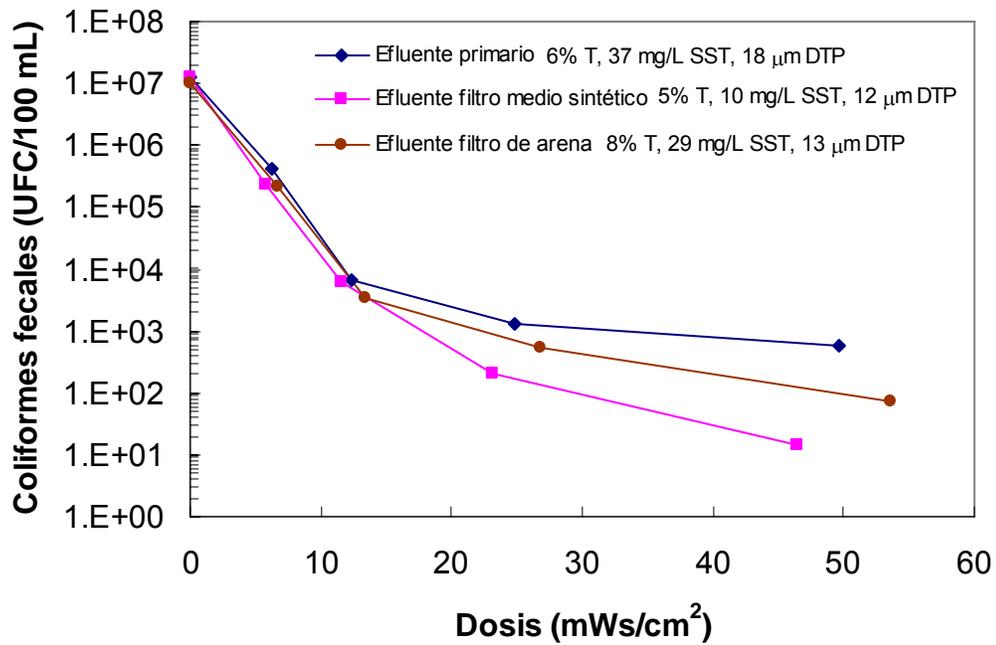


Figura 5.31. Efecto del tamaño de partículas en el grado de desinfección

5.8.3. 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 @ 254 nm: 30 %
- d) Valores a ser alcanzados en el efluente: 1000 CF/100 ml

El sistema propuesto para cubrir estos requerimientos es el sistema UV4000 (descrito en la sección 5.5.7). El costo proyectado del sistema fue de \$30,000,000 US, considerando un interés anual del 8% a un término de 20 años

En la tabla 5.13 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.

Tabla 5.13. Conceptos considerados para el cálculo de costos

PROPUESTA DE COSTOS DE CAPITAL	PROPUESTA DE COSTOS DE OPERACIÓN
Equipo de UV 99.7%	<i>Costo anual por energía</i> 83%
Obra civil, limpieza y otros 0.05%	Costo total de las partes de repuesto 16.6%
Instrumentación(3%) 0.07%	<i>Costo anual por químicos</i> 0.08%
Electricidad (7%) 0.17%	Costo total por el trabajo 0.3%

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.

REFERENCIAS

Acher A., E. Fischer, R. Turnheim y Y. Manor (1997) "Ecologically Friendly Wastewater Disinfection Techniques". **Water Research 31 (6) : 1398-1404.**

Alarcon H. Teresa (1982) "Desinfección de Agua Residual Municipal por Medio de Radiación Gamma". XVIII Congreso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental. Panamá.

Altamirano C.J.M. (1997) "Mejoramiento Mediante Ozono del Proceso de Coagulación-Floculación en un Tratamiento Fisicoquímico para Aguas Residuales". Tesis de Maestría, Fac. Ingeniería, DEPFI.

APHA-AWWA-WPCF (1992) "Métodos Normalizados para Análisis de Aguas Potables y Residuales". Ediciones Díaz Santos, S.A.

APHA, AWWA, and WPCF (1995) "Standard Methods for the Examination Water and Wastewater", Washintong D.C.

Bitton G. (1994) "Wastewater Microbiology ". Wiley-Liss, New York., pp 234-297.

Blatchley III E. (1997) "Numerical Modelling of UV Intensity: Application to Collimated-Beam Reactors and Continuous-Flow Systems". **Water Science and Technology 31(9) : 2205-2218.**

Böhme A. (1999) "Ozone Technology of German Industrial Enterprises". **Ozone Science and Engineering. 21(2) : 163-176.**

Bryant E. A.; Fulton G.P. y Budd G.C. (1992) "Disinfection Alternatives for Safe Drinking Water". Van Nostrand reinhold,N.Y., USA.

Caceres L. O. (1990) "Desinfección del Agua". Ministerio de Salud; Perú, pp 19-340.

Cairns W. L. (1991) "Ultraviolet Disinfection: An Alternative to Chemical Disinfection". **Trojan Technologies INC. : 1-22.**

Carnimeo D., Contini E., Di Marino R., Donadio F., Liberti L. y Ranieri E. (1994) "Wastewater Disinfection by UV at Trani Municipal Plant". **Water Science and Technology 30 (4) : 125-132.**

Chang ,S.D. y Singer, P.C. (1988) "The Impact of Ozonation on the Removal of Particles, TC,and THM Precursors". Proc. AWWA Ann. Conf., Orlando, Fla., pp. 1325-1342.

Cheremisinoff N.P. y Cheremisinoff P.N. (1993) "Water Treatment and Waste Recovery. Advanced Technology and Applications". **Prentice Hall. United States.: 147-158.**

Darby J., M. Heath, J. Jacangelo, F. Loge, P. Swaim y G. Tchobanoglous (1995) "Comparison of UV Radiation to Chlorination: Guidance for Achieving Optimal UV Performance". **Water Environment Research Foundation.**

Doré M. (1989) "Chimie des Oxydants et Traitement des Eaux". Lavoisier TEC and DOC. Technique et Documentation-Lavosier, Paris, pp 505.

Droste R. (1997) "Theory and Practice of Water and Wastewater Treatment". Ed. John Wiley and Sons, Inc. pp. 513-543.

EPA Guidance Manual (1999) Alternative Disinfectants and oxidants.

Fahey Richard J. (1990) "The UV Effect on Wastewater". **Water/Engineering and Management. December : 15-18.**

Garay P.N. y Cohn F.M. (1992) "High- Quality Industrial Water Management Manual". The Fairmont Press, Georgia, pp.234.

Geering, F. (1995) "Optimization of Ozono Plants for Water Works in Switzerland". **Ozone Science and engineering. 17 (1).**

Gehr R. (1996) "Desinfección con UV y Desinfección con Ozono". **Conferencia del Instituto de Ingeniería. Ciudad Universitaria.**

Goldwasser S. y D. Klipstein (1998) "Gas Discharge Lamps, Ballasts and Fixtures". Version 1.29.

Hilleboe H. (1994) Manual de Tratamiento de Aguas. Departamento de Sanidad del Estado de Nueva York. Ed. Limusa. 205 pp.

Hoigné J. y Bader H. (1977) "Rate Constants for Reactions of Ozone with Organic Pollutants and Amonia in Water". IOA Symp, Toronto, Canada.

Hoigné J. y Bader H. (1978) "Ozone Initiated Oxidations of Solutes in Wastewater: A Reaction Kinetic Aproach".**Prog.WaterTechnology.10:657.**

Hoigné J. y Bader H. (1979) "Ozonation of Water: Selectivity and Rate of Oxidation of Solutes". Proc.3rd IOA Congress, Paris, France.

Hoigné J. (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.

Huebner W. (1996) "Desinfección de Aguas de Desecho Humano", Seminario, Agua de México, Abril, pp, 29- 35, México.

Jiménez B. (1995) "Filtración del Agua". *Serie Azul* del Instituto de Ingeniería, No. 572, SIN-0185-2345 pp. 121.

Jiménez B. Chávez A. y Hurtado C. (1995) "Tratabilidad del Agua Residual del Valle de México", Informe para la CNA, México.

Jiménez B. y Landa H. (1998) "Physico-Chemical and Bacteriological Characterization of Wastewater from Mexico City". **Water Science and Technology 37 (1) : 1-8.**

Killops S. D. (1986) "Volatile Ozonation Products of Aqueous Humic Material" **Water Research 20(2) :**

Kruifhof J. C. y Masschelein W. J. (1999) "State of the Art of the Application of Ozonation in BENELUX Drinking Water Treatment". **Ozone Science and Engineering. 21(2) : 139-152.**

Langlais B.; Reckhow D.A. y Brink D.R. (1991) "Ozone in Water Treatment", Application and Engineering. Cooperative Research Report. Lewis Publisher Inc. pp 659.

Legerón J.P. (1978) "Chemical Ozone Demand of a Water Sample by Laboratory Evaluation". *Ozonews*, International Ozone Institute, August, 5:8, Part 2.

Lindenauer K. G. y Darby J.L. (1994) "Ultraviolet Disinfection of Wastewater: Effect of Dose on Subsequent Photoreactivation". **Water Research. 28 : 805.**

Loge F., R. Emerick, M. Heath, J. Jacangelo, G. Tchobanoglous y Darby J. (1996a) "Ultraviolet Disinfection of Secondary Wastewater Effluents": Prediction of Performance and Design. **Water Environment Research (68) 5 : 900-916.**

Loge F., J. Darby y Tchobanoglous G. (1996b) "UV Disinfection of Wastewater: Probabilistic Approach to Design". **Journal of Environmental Engineering. December : 1078-1084.**

Lorch W. (1987) "Handbook of Water Purification". 2ª edición. John Wiley and Sons. United Kingdom. **Capítulo 16 : 531-595.**

Manley, T.C. y Niegowsky,S.J. (1967) "Kirk Othmer Encyclopedia of Chemical Technology", Vol. 14, John Wiley and Sons, Inc. , New York (2nd ed.),pp.410-432.

MANUAL CL2.- Grupo C.Y.D.S.A.

MANUAL DE TRATAMIENTO DE AGUAS.- Departamento de Sanidad Del Estado de Nueva York.

Masschelein, W.J. (1982) "Contacting of Ozone with Water and Contactor Offgas Treatment.". **Handbook of Ozone Technology and Applications**, Vol. 1, edited by R.G.Rice and A. Netzer. Ann Arbor Science Publishers. Inc., Ann Arbor, MI.

Metcalf y Eddy (1991) "Treatment Disposal Reuse". Ed. Mc GrawHill. 3rd edition. 1334 pp.

Metcalf y Eddy (1996) "Ingeniería de Aguas Residuales. Tratamiento, Vertido y Reutilización". Ed. McGrawHill. 3^a edición. Cap.9, Pp. 343-407.

Morris J. J. (1975) "Aspects of the Quantitative Assessment of Germicidal Efficiency". Disinfection: Water and Wastewater, Edited by J. D. Johnson. Ann Arbor Science Publishers, Inc., Ann Arbor, MI, Chapter 1:1.

Norma Oficial Mexicana (NOM-001- ECOL-1996) "Límites Máximos Permisibles de Contaminantes en las Descargas Residuales y Bienes Nacionales", Diario Oficial de la Federación, enero 6, 1997, pp 67-81.

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". Diario Oficial de la Federación, noviembre 30, 1995.

Orgler K. (1982) "Methods and Operating Costs of Ozone Destruction in Offgas" Ozonation Manual of Water and Wastewater Treatment, edited by W.J. Masschelein. John Wiley and sons, Inc., New York.

Orta de Velásquez M. T., Altamirano Corro J.M. y Monje Ramírez I. (1998) "Improvement of Wastewater Coagulation Using Ozone". **Ozone, Science and Engineering**, **20(2) : 151-162**.

Pürschel W. (1976) "La Calidad de las Aguas y su Tratamiento". Tomo 3 Ed. Urmo España 85-89 p.

Rajeshwar K. y J. Ibañez (1997) "Environmental Electrochemistry". Fundamentals and Applications in Pollution Abatement. Ed. Academic Press. 625-693.

Rakness K. L., Corsaro K. M., Hale G. y Blank B. D. (1993) "Wastewater Disinfection with Ozone Process Control and Operation Results". **Ozone Science and Engineering**, **15(6) : 497-514**.

Rice R.P., (1986) "Analytical Aspects of Ozone Treatment of Water and Wastewater". Lewis Publishers.

Rice G. (1999), "Ozone in the United States of America- State of The Art", **Ozone Science and Engineering**, **21(2) : 99-118**.

Romero H. (1993) "El Uso de Aguas Residuales del Área Metropolitana de la Ciudad de México en el Riego Agrícola del Valle del Mezquital", CNA, caso de estudio, Cap1, México.

Rubin A.J. y Engel J.P. "Disinfection of Amebic Cysts in Water with Free Chlorine" **Journal of Water Pollution, Control Federation. 55 : 1174-1182.**

Sakamoto G. (1996) "Mexico City UV Disinfection Study". **Trojan Technologies INC. : 1-5.**

Sakamoto G. (1999) "UV Disinfection of Wastewater". Apuntes de Conferencia. Instituto de Ingeniería. 23 de Febrero.

Shaban A.M., El-Taweel G.E. y Ali G.H. (1997) UV Ability to Inactivate Microorganisms Combined With Factors Affecting Radiation. **Water Science and Technology. 35(11/12) : 107-112.**

Sobsey, M. D. (1989) "Inactivation of health- related microorganism in water by disinfection process". **Water Science and Technology. 21 : 179-195.**

Storer, E.L. (1986) "Design manual- municipal wastewater disinfection" EPA/65/1-86-021. U.S. Environmental Agency. Ohio, 1986, 1-33.

Summer W. (1957) "Photosensitizers. A Treatise on Photo-Electric Devices and their Application to Industry". Chapman & Hall Ltd.

Toft P., R. Tobin y Sharp J. (1988) "Drinking Water Treatment Small System Alternatives". Proceedings of the Third National Conference on Drinking Water, St John's, Newfoundland, Canada. June 12-14 : 159-174.

Trojan Engineering (1994) "Ultraviolet Disinfection System". Design Manual for Consulting Engineers. **Trojan Technologies : 2-15.**

Trojan Technologies, Inc. (1997) "Saneamiento del Valle de México. Propuesta de Desinfección de Aguas Residuales por un Sistema Avanzado de Ultravioleta".

U.S. Environmental Protection Agency (U.S. EPA). (1986) "Design Manual: Municipal Wastewater Disinfection. EPA-625/1-86/021.

U.S. Environmental Protection Agency (U.S. EPA). (1989) "Guidance Manual of Compliance with the Filtration and Disinfection Requirements for Public Water Systems Using Surface Water Supplies".

Vázquez, R. P. (1996) "¿Problemas con el Tratamiento de Aguas? : Prueba con el ozono, Tesis, Fac. Química, UNAM, 1996.

Ward, N.R. y Wolfe R.L. “ Efect to pH Application Technique and Chlorine- to Nitrogen Ratio on Disinfectant Activity of Inorganic Chloramines with Pure Culture Bacteria” **Applied Environmental Microbiology. 33 : 860-864.**

Watts, C.D. (1985) “Organic By-Products of Ozonation of Humic and Fulvic Acids”. Proc. Intl. Conf. on the Role of Ozone in Water and Wastewater Treatment, edited by N.J.D. Graham.Ellis Horwood Ltd., Chischester,U.K.

WEF (1996) “Wastewater Disinfection”. Water Environment Federation. Manual of Practice. FD-10 : **227-291.**

Wolfgang G. “Electrochemical Treatment of Industrial Wastewater”. **25 (7) : 34-37.**

World Bank (1992) “World Development Report 1992”, Oxford University Press, New York.

World Commission on Environment and Development (1982) “Our Common Future”. Oxford University Press, Oxford.

Wurrman K. y Meyrath J. (1955) “The Bactericidal Action of Ozone Solution”. Schwietz J. Allgen. Pathol. Bakteriologie. 18 : 1060.

ANEXO 1

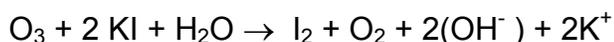
TÉCNICAS DE MEDICIÓN DE OZONO EN FASE GAS Y FASE LÍQUIDA

A1.1 DETERMINACIÓN DE OZONO EN FASE ACUOSA

Este método colorimétrico sirve para determinar el ozono residual. Es cuantitativo, selectivo y simple y reemplaza a los métodos basados en la determinación de oxidantes totales. Es aplicable en agua de lagos, ríos, aguas subterráneas conteniendo manganeso, agua subterránea extremadamente dura y agua residual tratada biológicamente. Se encuentra descrito con mayor detalle en la sección 4500-O₃ A del Standard Methods for Examination of Water and Wastewater (1995).

A1.2 DETERMINACIÓN DE OZONO EN FASE GASEOSA

El método se basa en el poder del ozono para desplazar al yodo a diferente pH de una solución de yodo alcalina:



El yodo liberado es titulado con una solución reductora, la cual puede ser arsenito de sodio ó tiosulfato de sodio.

A1.3 MÉTODO YODOMÉTRICO

- Llenar un matraz Erlenmeyer con 200 ml de solución de yoduro de potasio.
- Conectar la manguera al punto de muestreo del generador e introducir el otro extremo en el matraz que contiene la solución de yoduro de potasio, KI.
- Ajustar el flujo de aire ozonado a aproximadamente 1L/ min. Desconectar la manguera del matraz (botella de lavado) de la solución de KI y conectarla a la botella de medición (la cual también contiene KI). Esto se hace para ajustar el flujo de ozono y que no se escape al aire.
- Burbujear un volumen medido con un gasómetro aproximadamente de 2 a 3 litros. A su vez, registrar la presión y la temperatura del gas.
- Acidificar la solución con 10 ml de ácido sulfúrico 1 N.
- Titular la solución con tiosulfato de sodio.
- Añadir 2 ml de solución indicadora de almidón y continuar la titulación
- Registrar el volumen gastado de tiosulfato de sodio.

Equipo:

- Medidor de flujo de gas
- Balanza analítica

Reactivos:

Solución 0.1 N de tiosulfato de sodio. Disolver 25 g de tiosulfato de sodio en un litro de agua destilada. Valorar la solución de tiosulfato de sodio semanalmente. En un matraz Erlenmeyer añadir 80 ml de agua destilada, agregar con agitación 1 ml de ácido sulfúrico concentrado, 10 ml de solución de dicromato de potasio y 1 g de yoduro de potasio. Titular inmediatamente con solución 0.1 N de tiosulfato de sodio hasta que el color amarillo del yodo liberado desaparezca.

- Solución 1 N de ácido sulfúrico.
- Solución 0.1 N de dicromato de potasio para estandarizar la solución de tiosulfato. Disolver 4.904 g de dicromato de potasio y diluir a 1 litro.
- Solución de yoduro de potasio. Disolver 20 gramos en 1 litro de agua.
- Solución indicadora de almidón.

Cálculos:

$$[O_3]_{sgE} = (T \cdot N \cdot 24) / 2$$
$$[O_3]_{sgS} = (T \cdot N \cdot 24) / V_t$$
$$[O_3]_{ET} = ([O_3]_{sgE} \cdot t \cdot F) \cdot V_r$$
$$[O_3]_S = ([O_3]_{sgS} \cdot t \cdot F) \cdot V_r$$

donde

$[O_3]_{sgE}$: Ozono que sale del generador (fase gas), entrada tratamiento, mg/l.

$[O_3]_{sgS}$: Ozono que sale del generador (fase gas), salida tratamiento, mg/l.

$[O_3]_{ET}$: Ozono que entra al tratamiento fase acuosa, mg/l.

$[O_3]_S$: Ozono que sale del tratamiento en fase acuosa, mg/l

T : ml de tiosulfato de sodio consumidos.

N: Normalidad del tiosulfato de sodio.

24: Factor, 1ml de tiosulfato de sodio corresponde a 245 mg de ozono.

2 : los dos litros que se dejan pasar de gas a través del medidor de flujo.

V_t : Volumen de gas a través del medidor de flujo a un t dado.

t: tiempo de aplicación de ozono.

F :Flujo de gas, l/min

V_r : Volumen del reactor, l

ANEXO 2

PRUEBAS DE TRATABILIDAD

A2.1 PARÁMETROS A DETERMINAR

- Sólidos Suspendidos Totales

Estos son determinados de acuerdo a la NMX-AA-034-1981.

- Transmitancia filtrada y no filtrada

Es medida en un espectrofotómetro a 254 nm, comparando con el 100% de transmitancia del agua destilada. El espectrofotómetro esta 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 μm .

- Turbiedad

Se determina de acuerdo a la NMX-AA-038-1981.

- Coliformes fecales

La determinación de este parámetro se basa en la NMX-AA-102-1987.

- 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.

A2.2. PRUEBA DE DESINFECCIÓN CON EL EQUIPO DE LUZ COLIMADA

- Equipo

El equipo es el que se muestra en la figura B.1. 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 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.

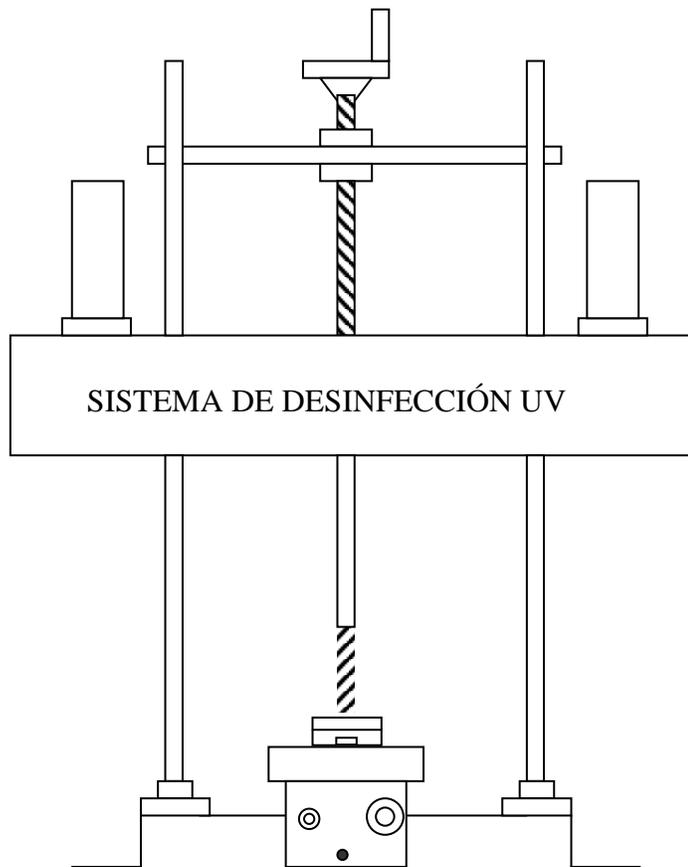


Figura A2.1. Equipo de luz colimada

- Prueba de radiación

La unidad se debe prender de 10 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 $200 \mu\text{W}$, se siguen los siguientes pasos:

- Homogeneizar la muestra y medir 50 ml. Colocarla en la cuba estéril para ser irradiada.
- Colocar la muestra en un agitador, mientras el tubo de irradiación está cubierto.
- Remover la cubierta y controlar el tiempo de exposición con un cronómetro. Los tiempos de exposición pueden ir desde 0 hasta 1000 segundos.
- Pasado el tiempo remover la cuba del agitador y colocarla en un segundo agitador para mantener homogénea la muestra.
- 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, fotoreparación 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.

Tabla de conversión de unidades de medida al Sistema Internacional de Unidades (SI)

OTROS SISTEMAS DE UNIDADES		MULTIPLICADO POR	SISTEMA INTERNACIONAL DE UNIDADES (SI)	
UNIDAD	SÍMBOLO		SE CONVIERTE A	
			UNIDAD	SÍMBOLO
LONGITUD				
Pie	pie, ft.,'	0.3048	metro	m
Pulgada	plg., in, "	25.4	milímetro	mm
PRESIÓN/ ESFUERZO				
Kilogramo fuerza/cm ²	kg _f /cm ²	98,066.5	Pascal	Pa
Libra/pulgada ²	lb/ plg ² ,PSI	6,894.76	Pascal	Pa
Atmósfera	atm	98,066.5	Pascal	Pa
metro de agua	m H ₂ O (mca)	9,806.65	Pascal	Pa
Mm de mercurio	mm Hg	133.322	Pascal	Pa
Bar	bar	100,000	Pascal	Pa
FUERZA/ PESO				
Kilogramo fuerza	kg _f	9.8066	Newton	N
MASA				
Libra	lb	0.453592	kilogramo	kg
Onza	oz	28.30	gramo	g
PESO VOLUMÉTRICO				
Kilogramo fuerza/m ³	kg _f /m ³	9.8066	N/m ³	N/m ³
Libra /ft ³	lb/ft ³	157.18085	N/m ³	N/m ³
POTENCIA				
Caballo de potencia, Horse Power	CP, HP	745.699	Watt	W
Caballo de vapor	CV	735	Watt	W
VISCOSIDAD DINÁMICA				
Poise	μ	0.01	Mili Pascal segundo	mPa.s
VISCOSIDAD CINEMÁTICA				
Viscosidad cinemática	v	1	Stoke	m ² /s (St)
ENERGÍA/ CANTIDAD DE CALOR				
Caloría	cal	4.1868	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