



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE QUÍMICA

**DESINFECCIÓN DEL AGUA DE ABASTECIMIENTO DE
CIUDAD UNIVERSITARIA MEDIANTE LA TECNOLOGÍA DE
OZONO; ASPECTOS DE TRANSFERENCIA DE MASA Y
DIMENSIONAMIENTO DE UNA CÁMARA DE CONTACTO.**

TESIS MANCOMUNADA

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE

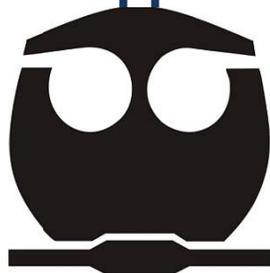
INGENIERO QUÍMICO

PRESENTAN:

RICARDO NAVA SHIMADA

Y

GABRIEL EDUARDO OLIVARES WATSON



MÉXICO, D.F.

2011



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

JURADO ASIGNADO:

PRESIDENTE: FELIPE ALBERTO KELLER TORRES

VOCAL: CELESTINO MONTIEL MALDONADO

SECRETARIO: MARÍA TERESA ORTA LEDESMA

1ER. SUPLENTE: RAFAEL HERRERA NÁJERA

2° SUPLENTE: VICTOR MANUEL LUNA PABELLO

**SITIO DONDE SE DESARROLLÓ EL TEMA: INSTITUTO DE INGENIERÍA,
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA AMBIENTAL, CIUDAD UNIVERSITARIA, UNAM**

ASESOR DEL TEMA:

MARÍA TERESA ORTA LEDESMA

SUPERVISOR TÉCNICO

IGNACIO MONJE RAMÍREZ

SUSTENTANTES:

GABRIEL EDUARDO OLIVARES WATSON

RICARDO NAVA SHIMADA

Agradecimientos:

A la UNAM, la Facultad de Química y el Instituto de Ingeniería por brindarme tantas experiencias y conocimiento.

A la Dra. María Teresa Orta y el Dr. Ignacio Monje Ramírez por su guía, enseñanza y apoyo durante el desarrollo de este proyecto.

A Gabo, "Chango", Sofía, Karen, Carlos y Alfonso por su apoyo y compañía a lo largo de la carrera.

Dedicatoria:

A mi madre por su inigualable e incondicional cariño y apoyo.

A mis hermanos, mi padre y mis tíos, en especial a Michi y a San por su confianza, presencia, enseñanza y cariño.

A Gaby, cuyo amor me completa, impulsa y motiva.

En memoria de mis abuelos Masanori y Sachiko.

Ricardo Nava Shimada

Este trabajo lo dedico a las siguientes personas:

A Karine por su amor y apoyo incondicional, no existen palabras para expresar lo que siento por ella.

A mis papás y hermanos, por acompañarme, aconsejarme y apoyarme a lo largo de la carrera, este trabajo es para ustedes.

A mis abuelos Gabriel y “Bud”, los ingenieros de la familia.

A mi primo Roberto, por servir como inspiración y guía para estudiar en la UNAM.

Agradecimientos:

Un agradecimiento especial para la Dra. María Teresa Orta y el Dr. Ignacio Monje por su enseñanza, apoyo y paciencia en el desarrollo de este trabajo.

A la UNAM por ser la fuente de mi conocimiento y desarrollo durante estos años

A Ricardo por ser mi amigo y compañero a lo largo de este trabajo y a lo largo de la carrera

A Karen, Sofía, “Chango”, Carlos por su compañía y amistad a lo largo de la carrera

Gabriel Olivares Watson

CONTENIDO

ÍNDICE DE TABLAS.....	8
ÍNDICE DE FIGURAS.....	11
NOMENCLATURA.....	14
RESUMEN.....	16
OBJETIVOS.....	17
CAPITULO 1: ANTECEDENTES.....	18
1.1 Historia del uso del ozono.....	18
1.2 Aplicaciones del ozono.....	19
1.3 Ozono a nivel mundial.....	20
1.4 Agua Subterránea.....	20
1.4.1.El agua subterránea en México.....	21
1.5 Características del sistema de distribución de agua potable en Ciudad Universitaria.....	22
1.5.1.Suministro.....	23
1.5.2.Almacenamiento.....	23
1.5.3.Distribución.....	24
1.5.4.Sistemas actuales de desinfección.....	24
CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO.....	30
2.1 OZONO.....	30
2.1.1.Características generales.....	30
2.1.2.Aplicaciones en la potabilización de agua.....	31
2.1.3.Desinfección.....	32
2.1.4.Formación de subproductos.....	34
2.2 DISEÑO Y OPERACIÓN DE EQUIPOS Y PROCESOS DE OZONACIÓN.....	36

2.2.1. Componentes del sistema de ozonación.....	36
2.2.2. Preparación del gas de proceso.....	36
2.2.2.1. Sistemas de ozonación alimentados por aire.....	37
2.2.2.2. Sistemas de ozonación alimentados por oxígeno.....	39
2.2.2.3. Sistemas de oxígeno líquido (LOX)	40
2.2.3. Generación de ozono.....	41
2.2.4. Contacto de ozono en agua.....	43
2.2.4.1. Tipos de contactores.....	43
2.2.5. Destrucción de ozono.....	48
2.3 TIPOS DE PRUEBAS A ESCALA LABORATORIO UTILIZADAS PARA EL DIMENSIONAMIENTO DE CONTACTORES.....	49
2.3.1. Cinética del ozono en el agua.....	49
2.3.2. Tiempo de vida media del ozono en el agua.....	50
2.3.3. Residual a los 60 segundos.....	52
2.3.4. Demanda de ozono.....	52
2.3.4.1. Prueba de gas-ozono (GOT por sus siglas en inglés) o “Ozotest” propuesta por Roche et al (1994)	53
2.3.4.2. Prueba de ozono en solución (SOT por sus siglas en inglés) propuesta por Hoigné y Bader	53
2.3.4.3. Método de flujo continuo por Roustan.....	55
2.4 Dimensionamiento de una cámara de contacto de burbuja fina.....	57
2.4.1. Metodología para el dimensionamiento de la cámara de contacto de burbuja fina.....	58
2.4.2. Monitoreo de la desinfección en un sistema con ozono.....	61
2.5 TRANSFERENCIA DE MASA DEL OZONO EN AGUA.....	64
2.5.1. Teoría de la transferencia de masa	64
2.5.2. Transferencia de masa en una sola fase.....	65
2.5.3. Concentración del gas al equilibrio.....	66

2.5.4. Teoría de la doble capa.....	67
2.5.5. Determinación experimental del k_{La} y de la concentración del ozono a la salida de la columna de difusión.....	69
2.6 ESTIMACIÓN DE COSTOS DE LOS SISTEMAS DE OZONACIÓN.....	70
2.7 OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO DE REDES DE DISTRIBUCIÓN DE AGUA POTABLE.....	76
CAPÍTULO 3: RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	82
3.1 Demanda de ozono.....	82
3.2 Transferencia de masa.....	87
3.3 Vida media del ozono en el agua y residual a los 60 segundos.....	96
3.4 Diseño de la cámara de contacto.....	104
3.5 Análisis de costos.....	112
CAPÍTULO 4: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	119
ANEXOS.....	125
Anexo 1. Ubicación de los pozos de C.U.	125
Anexo 2. Detalle de resultados de las pruebas de demanda de ozono.....	126
Anexo 3: Metodo CSTR-modificado para el monitoreo de sistemas de desinfección con ozono	133
Anexo 4. Equipo de ozonación utilizado.....	140
BIBLIOGRAFÍA.	143

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1 Características generales de los pozos de abastecimiento de Ciudad Universitaria

Tabla 1.2 Características de los tanques de almacenamiento

Tabla 1.3 Caracterización química de agua potable en el subsistema de suministro de acuerdo con la NOM-127-SSA1-2000, evaluada por un laboratorio externo certificado.

Tabla 1.4 Determinación de cloro residual libre en la red de distribución de agua potable en el campus Ciudad Universitaria

Tabla 2.1 Principales subproductos de la ozonación

Tabla 2.2 Datos del proceso de ozonación

Tabla 2.3: Opciones de alimentación para los procesos de ozonación

Tabla 2.4: Recomendaciones para cada método de cálculo en el contactor

Tabla 2.5 Formato sin datos del orden de magnitud de los costos de capital

Tabla 2.6 Formato con datos del orden de magnitud de los costos de capital

Tabla 2.7 Formato sin datos del orden de magnitud de los costos de operación

Tabla 2.8 Formato con datos del orden de magnitud de los costos de operación

Tabla 3.1 Demanda de ozono Pozo 1 (Química)

Tabla 3.2 Demanda de ozono Pozo 2 (Multifamiliar)

Tabla 3.3 Demanda de ozono Pozo 3 (Vivero Alto)

Tabla 3.4 Resultados de los experimentos de transferencia de masa realizados para el pozo Multifamiliar (1/3)

Tabla 3.5 Resultados de los experimentos de transferencia de masa realizados para el pozo Multifamiliar (2/3)

Tabla 3.6 Resultados de los experimentos de transferencia de masa realizados para el pozo Multifamiliar (3/3)

Tabla 3.7 Parámetros experimentales del experimento 1 de vida media del ozono

Tabla 3.8 Resultados del experimento 1 de vida media del ozono

Tabla 3.9 Parámetros experimentales del experimento 2 de vida media del ozono

Tabla 3.10 Resultados del experimento 2 de vida media del ozono

Tabla 3.11 Parámetros experimentales del experimento 3 de vida media del ozono

Tabla 3.12 Resultados del experimento 3 de vida media del ozono

Tabla 3.13 Características de operación de la cámara de contacto bajo el escenario 1 de desinfección

Tabla 3.14 Desinfección por etapas para Cryptosporidium, Giardia y Virus bajo el escenario 1 de desinfección

Tabla 3.15 Dimensionamiento por etapas para la cámara de contacto bajo el escenario 1 de desinfección

Tabla 3.16 Características de operación de la cámara de contacto bajo el escenario 2 de desinfección

Tabla 3.17 Desinfección por etapas para Cryptosporidium, Giardia y Virus bajo el escenario 2 de desinfección

Tabla 3.18 Dimensionamiento por etapas para la cámara de contacto bajo el escenario 2 de desinfección

Tabla 3.19 Características de operación de la cámara de contacto bajo el escenario 3 de desinfección

Tabla 3.20 Desinfección por etapas para Cryptosporidium, Giardia y Virus bajo el escenario 3 de desinfección

Tabla 3.21 Dimensionamiento por etapas para la cámara de contacto bajo el escenario 3 de desinfección

Tabla 3.22 Costos de capital de la planta (Escenario 1)

Tabla 3.23 Costos de operación de la planta (Escenario 1)

Tabla 3.24 Costos de capital de la planta (Escenario 2)

Tabla 3.25 Costos de operación de la planta (Escenario 2)

Tabla 3.26 Costos de capital de la planta (Escenario 3)

Tabla 3.27 Costos de operación de la planta (Escenario 3)

Tabla A.2.1 Demanda de ozono del pozo de Química, prueba 1

Tabla A.2.2 Demanda de ozono del pozo de Química, prueba 2

Tabla A.2.3 Demanda de ozono del pozo de Química, prueba 3

Tabla A.2.4 Demanda de ozono del pozo Multifamiliar, prueba 1

Tabla A.2.5 Demanda de ozono del pozo Multifamiliar, prueba 2

Tabla A.2.6 Demanda de ozono del pozo Multifamiliar, prueba 3

Tabla A.2.7 Demanda de ozono del pozo del Vivero Alto, prueba 1

Tabla A.2.8 Demanda de ozono del pozo del Vivero Alto, prueba 2

Tabla A.2.9 Demanda de ozono del pozo del Vivero Alto, prueba 3

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Arreglo del sistema de distribución del agua para uso y consumo humano en Ciudad Universitaria (PUMAGUA 2010)

Figura 1.2 Ubicación de los pozos del sistema de abastecimiento de agua potable de Ciudad Universitaria

Figura 2.1 Reacciones de oxidación durante el proceso de ozonación de agua

Figura 2.2 Proceso de ozonación

Figura 2.3 Proceso de ozonación de baja presión alimentado por aire

Figura 2.4: Proceso de ozonación alimentado por oxígeno

Figura 2.5 Cámara de contacto de burbuja fina

Figura 2.6 Inyección en línea de ozono

Figura 2.7 Contactor con turbinas de mezclado

Figura 2.8 Contactor de mezcla estática

Figura 2.9 Contactor de tubo en U

Figura 2.10 Gráfica típica de decaimiento de ozono (semi-log)

Figura 2.11 Concentración de ozono residual contra dosis de ozono transferida

Figura 2.12 Modelo de la doble capa o doble resistencia con gradiente de concentración

Figura 2.13 Orden de magnitud de los costos de sistemas de ozonación basados capacidad de generación instalada

Figura 2.14 Orden de magnitud de los costos de contactores de ozono (asumiendo 10 minutos de tiempo de residencia)

Figura 2.15 Área de construcción requerida para los equipos del sistema de ozonación

Figura 3.1 Demanda de ozono Pozo 1 (Química)

Figura 3.2 Demanda de ozono Pozo 2 (Multifamiliar)

Figura 3.3 Demanda de ozono Pozo 3 (Vivero Alto)

Figura 3.4 Coeficiente global de transferencia de masa en función de la velocidad superficial del gas

Figura 3.5 Porcentaje de ozono transferido en función del flujo volumétrico del agua

Figura 3.6 Concentración de ozono a lo largo del perfil vertical de la torre para diferentes flujos de gas

Figura 3.7 Correlación entre la concentración de ozono residual a la salida de la torre y la dosis de ozono transferida

Figura 3.8 Porcentaje de ozono transferido en función de la relación de flujo gas-líquido

Figura 3.9 Concentración de ozono residual en función del tiempo de reacción para una DOT = 0.267 mg/l

Figura 3.10 Logaritmo de la concentración al tiempo x sobre la concentración al tiempo 0 en función del tiempo de reacción para una DOT = 0.267 mg/l

Figura 3.11 Concentración de ozono residual en función del tiempo de reacción para una DOT = 0.934 mg/l

Figura 3.12 Logaritmo de la concentración al tiempo x sobre la concentración al tiempo 0 en función del tiempo de reacción para una DOT = 0.934 mg/l

Figura 3.13 Concentración de ozono residual en función del tiempo de reacción para una DOT = 0.497 mg/l

Figura 3.14 Logaritmo de la concentración al tiempo x sobre la concentración al tiempo 0 en función del tiempo de reacción para una DOT = 0.497 mg/l

Figura 3.15 Concentración de ozono residual a los 60 segundos de reacción en función de la dosis de ozono transferida

Figura 3.16 Tiempo de vida media del ozono en el agua en función de la dosis de ozono transferida

Figura A.1: Ubicación de los pozos del sistema de abastecimiento de agua potable de Ciudad Universitaria

Figura A.3.1 Contactor de 10 etapas

Figura A.4.1 Generador de ozono

Figura A.4.2 Torre de burbujeo

Figura A.4.3 Difusor de placa porosa

Figura A.4.4 Analizador de ozono en fase gaseosa

Figura A.4.5 Destructor de ozono

NOMENCLATURA

\$/kWh	Pesos por kilowatt hora
HAAs	Ácidos Haloacéticos
a	Área interfacial volumétrica
CBA	Carbón Biológicamente Activado
CGA	Carbón Granular Activado
COT	Carbono orgánico total
C.U.	Ciudad Universitaria
CG*	Concentración del gas al equilibrio
D	Coeficiente de difusión molecular
k	Coeficiente de transferencia de masa
K_L	Coeficiente global de transferencia de masa
k_{La}	Coeficiente volumétrico de transferencia de masa
C_L^*	Concentración al equilibrio en la fase líquida
$[O_3]_{ge}$	Concentración de ozono a la entrada en fase gas
$[O_3]_{le}$	Concentración de ozono a la entrada en fase líquida
$[O_3]_{gs}$	Concentración de ozono a la salida en fase gas
$[O_3]_{ls}$	Concentración de ozono a la salida en fase líquida
$[O_3]_{in}$	Concentración de ozono introducida
$[O_3]_r$	Concentración de ozono residual
$[O_3]_{r,e,x}$	Concentración de ozono residual a la entrada del punto x de muestreo
$[O_3]_{r=60s}$	Concentración de ozono residual a los 60 segundos de reacción
$[O_3]_{r,x}$	Concentración de ozono residual en el punto x de muestreo
C_G	Concentración del gas (transferencia de masa)
C_{Gi}	Concentración del gas en la interfase (transferencia de masa)
C_L	Concentración del líquido (transferencia de masa)
C_{Li}	Concentración del líquido en la interfase (transferencia de masa)
$(C^*-C_i)_{ML}$	Concentración media logarítmica entre la entrada y la salida de la columna de difusión
C	Concentración residual del desinfectante en el agua en mg/l (utilizado para el CT)
k_p	Constante cinética de desactivación
k_c	Constante cinética de desactivación para <i>Cryptosporidium</i>
k_g	Constante cinética de desactivación para Giardia
k_v	Constante cinética de desactivación para virus
Hc	Constante de Henry
X	Demanda de ozono instantánea
x	desactivación logarítmica del microorganismo
DOA	Dosis de Ozono Aplicada

DOT	Dosis de Ozono Transferida
Qg	flujo volumétrico en fase gas
Ql	flujo volumétrico en fase líquida
N	Flux de transferencia de masa
°C	Grados Celsius
Hz	Hertz
HP	Caballos de fuerza (Horse Power)
Km	Kilómetros
kWh/lbO ₃	Kilowatt hora por libra de ozono
l/s	Litros por segundo
MON	Materia orgánica natural
m	Metros
m/s	Metros por segundo
µg/l	Microgramos por litro
mg/l	Miligramos por litro
min.	minutos
NOM	Norma Oficial Mexicana
N _{1-x}	Número de etapas entre el punto de muestreo 1 y el x
N	Número de organismos viables después del proceso de Desinfección
N ₀	Número inicial de organismos viables
O ₂	Oxígeno
O ₃	Ozono
p/p	Peso a peso
CT	Poder de desinfección
PVC	Policloruro de vinilo
PEAD	Polietileno de alta densidad
%d	Porcentaje de remoción
%wt	Porcentaje en peso
pH	potencial de Hidrógeno
GOT	Prueba de gas-ozono
SOT	Prueba de ozono en solución
OH ⁻	Radical hidroxilo
R _G	Resistencia de la fase gas a la transferencia de masa
R _L	Resistencia de la fase líquida a la transferencia de masa
R _T	Resistencia total a la transferencia de masa
SSA	Secretaría de Salud
VPSA	Sistema de adsorción de oscilación al vacío
PSA	Sistema de adsorción de oscilación de presión

RESUMEN

La tesis que se presenta a continuación muestra los resultados de un trabajo experimental para analizar la viabilidad de la aplicación de un sistema de potabilización de agua con ozono para Ciudad Universitaria, con el fin de elevar la calidad de la misma a estándares internacionales y reducir el consumo de agua embotellada dentro del campus.

El desarrollo de esta investigación tuvo como propósitos específicos determinar los requerimientos básicos para el diseño de un sistema de ozonación y explorar los fenómenos de transferencia de masa que ocurren durante un proceso de ozonación de agua.

Con base en los resultados obtenidos se ha llegado a la conclusión de que un sistema de ozonación para la potabilización del agua de Ciudad Universitaria –en específico para el pozo del complejo Multifamiliar- puede ser una opción viable ya que la demanda de ozono y su constante de descomposición k^* favorecen la aplicación de dicho sistema debido a que resultó ser muy estable bajo las condiciones de temperatura y concentración de compuestos oxidables en el agua. Estas características resultan en un bajo requerimiento energético para la generación de ozono a la concentración que se requiere para alcanzar una desinfección total del agua proveniente del pozo.

Si bien la aplicación del ozono en términos costo de equipos y energía eléctrica requerida resulta ser mucho mayor que los sistemas de cloración aplicados actualmente, los beneficios derivados su implementación justifican la inversión. La calidad del agua derivada de un proceso de ozonación presenta las mismas características organolépticas del agua embotellada, ya que en muchas ocasiones las embotelladoras eligen este método de tratamiento dentro de sus procesos de purificación. Se considera que este proyecto puede ayudar a reducir el consumo de agua embotellada en Ciudad Universitaria y que puede servir como base para la implementación de sistemas similares a nivel municipal y estatal.

A continuación se presentan los objetivos, antecedentes, marco teórico, resultados y conclusiones derivadas de este trabajo de investigación.

OBJETIVOS

Objetivo general

Determinar los requerimientos básicos y de diseño para implementar la desinfección con ozono en el sistema de abastecimiento de agua de Ciudad Universitaria con el fin de elevar la calidad del líquido a estándares internacionales (v.gr., Estados Unidos, Unión Europea y Canadá) y disminuir la dependencia de los usuarios al consumo de agua embotellada.

Objetivos específicos:

1. Cuantificar la demanda inmediata, la concentración residual a los 60 s de reacción y la constante de descomposición del ozono en agua subterránea de los pozos de abastecimiento de C.U.
2. Realizar pruebas de transferencia de masa en una columna de burbujeo escala laboratorio que opera en modo continuo y a contracorriente, para establecer las relaciones de flujo, gas-líquido, que garanticen los requerimientos de ozono residual para el proceso de desinfección del agua de pozos de abastecimiento.
3. Determinar experimentalmente el coeficiente volumétrico de transferencia de masa, $k_L a$.
4. Dimensionar una cámara de contacto para el proceso de desinfección del agua de los pozos de abastecimiento con base en los requerimientos de dosis de ozono, transferencia de masa, tiempo de retención hidráulica y tomando en cuenta los estándares establecidos por la Unión Europea (UE) y la United States Environmental Protection Agency (USEPA).
5. Determinar el costo aproximado del sistema de desinfección con ozono a partir de modelos teóricos, y mediante la cotización de sistemas de desinfección disponibles.
6. Dar recomendaciones para la implementación y operación adecuada del sistema de desinfección con ozono.

CAPITULO 1: ANTECEDENTES

1.1 HISTORIA DEL USO DEL OZONO

La capacidad que tiene el ozono para desinfectar agua contaminada fue reconocida en 1886 por de Meritens. Algunos años después, la firma alemana Siemens & Halske, fabricantes de equipo eléctrico, contactó a representantes del gobierno de Prusia dispuestos a probar el ozono como desinfectante en la potabilización de agua; debido a esto se construyó una planta piloto en Martinikenfelde, Alemania. En 1981 Froelich reportó que las pruebas en esta planta demostraban que el ozono era efectivo en la eliminación de bacterias.

En 1889, el químico francés Mario Paul Otto comenzó a estudiar el ozono en la Universidad de *La Sorbonne* en París; y en 1897 obtuvo un doctorado por su tesis sobre ozono y creó la primer compañía para la manufactura e instalación de equipo de generación llamada Compagnie Provençale de l'Ozone.

La primera aplicación a gran escala en tratamiento de agua con ozono se dio en 1893 en Oudshoorn, Holanda; después se construyeron plantas en París, Francia (1898), Wiesbaden, Alemania (1901), Paderborn, Alemania (1902), Nueva York, E.U. (1903), y más. El número de instalaciones con sistemas de ozonación creció rápidamente hacia 1914 y en 1915 había al menos 49 plantas en funcionamiento distribuidas en toda Europa. Sin embargo disminuyó de manera notable en la primera parte del siglo XX, cuando durante la investigación sobre gases venenosos en la Primera Guerra Mundial, llevó al desarrollo del cloro, cuyo precio era inferior; lo cual inspiró en muchas partes del mundo su uso como desinfectante principal y se contuvo la propagación de ozono. No obstante, la construcción de nuevas plantas a base de ozono continuó lentamente, sobre todo en Francia; donde en 1936 ya se tenían alrededor de 100 plantas, mientras que en otras partes del mundo aproximadamente 40. Fue hasta después de la Segunda Guerra Mundial cuando la tasa de construcción de plantas de ozonación regresó a los niveles iniciales.

1.2 APLICACIONES DEL OZONO

En las plantas de ozonación de primera generación, el ozono era usado solamente como desinfectante, sin embargo se descubrió que además de desinfectar, éste mejoraba el sabor y eliminaba el color del agua.

Así, en los años 60s se introdujeron nuevas aplicaciones; muchas de estas requerían que este fuera agregado durante las primeras etapas del tratamiento y hasta este tiempo, el ozono había sido empleado en la mayoría de los casos como una etapa final, por lo cual se dio origen a la pre-ozonación.

En estos años, en Alemania y Francia, comenzaron a emplearlo específicamente para oxidar hierro y manganeso; mientras que en Escocia e Irlanda, se construyeron plantas con el fin de eliminar el color del agua de abastecimiento.

En esta década los efectos del ozono como coagulante fueron empleados por primera vez. Observaciones en Escocia y Francia del fenómeno de floculación espontánea ocurrida en algunas cámaras de contacto de ozonación, llevaron al desarrollo del proceso de “coagulación-floculación mejorado con ozono”, aplicación que favorecía la remoción de partículas. De esta manera se construyeron plantas que incorporaban este proceso en Roanne, Francia (1964), Lausanne, Suiza (1967) y Constance, Alemania (1966). Los procesos que emplean el efecto coagulante del ozono han evolucionado en aplicaciones de preozonación para el control de turbidez. También en estos años en Alemania y Suiza el ozono comenzó a usarse para oxidar ciertos microcontaminantes específicos; en particular compuestos fenólicos y plaguicidas.

En la década de los 70s en Francia comenzó a emplearse el ozono para eliminar y controlar el crecimiento de algas.

Las aplicaciones más recientes se enfocan en el control de subproductos de desinfección (DBPs, por sus siglas en inglés) y la estabilización biológica, o la reducción del crecimiento de microorganismos en el agua. En el caso de los DBPs la mayoría de las aplicaciones se han dado en Estados Unidos. El descubrimiento de los Trihalometanos (THMs) como subproductos de la cloración en 1973, la promulgación de estándares de calidad aplicables en Estados Unidos en 1979 y la promulgación de la directiva de la Comunidad Económica Europea en 1980, para

dichos compuestos, impulsaron esta aplicación. La estabilización biológica fue reconocida en Europa como una buena aplicación en los trenes de tratamiento incorporando ozono antes de la filtración con Carbón Granular Activado (CGA). El eliminar la precloración y utilizar ozono antes del CGA, conocido como filtración de Carbón Biológicamente Activado (CBA), permitió que la vida de la cama de carbón se extendiera ampliamente. Aunque la estabilización biológica fue pensada originalmente como una etapa de tratamiento adicional para remover compuestos orgánicos, ahora se considera como un tratamiento necesario para controlar el crecimiento biológico excesivo en los sistemas de distribución, cuando se utilizan aguas superficiales como fuente de abastecimiento, con concentraciones altas de carbón orgánico disuelto.

1.3 OZONO A NIVEL MUNDIAL

Actualmente existen aproximadamente 3,000 plantas de ozono para tratamientos de agua alrededor del mundo, entre ellas 1,500 en Europa y 260 en Estados Unidos.

La planta de tratamiento por medio de ozono mas grande del mundo se encuentra en Los Ángeles, y tiene una capacidad de 2,271 millones de litros por día.

Entre las plantas de potabilización más conocidas del mundo están: Londres, París, Budapest, Kiev, Moscú (1,200 millones de litros por día), Singapur, Dallas, Los Ángeles, Milwaukee (1,040 millones de litros por día), Orlando (151 millones de litros por día), Atlanta, Boston y Nueva York.

1.4 AGUA SUBTERRÁNEA

El agua subterránea es la que se encuentra bajo la superficie terrestre y ocupa los poros y las fisuras de las rocas más sólidas. En general, mantiene una temperatura muy similar al promedio anual en la zona adyacente. El agua subterránea más profunda puede permanecer oculta durante miles o millones de años. No obstante, la mayor parte de los yacimientos están a poca profundidad y desempeñan un papel discreto pero constante dentro del ciclo hidrológico.

A nivel global, el volumen de agua subterránea es veinte veces mayor que aguas superficiales de todos los continentes e islas, de ahí la importancia de esta agua como reserva y como recurso de agua dulce. Además, tiene un importante papel en la naturaleza. El efecto de la gran reserva de agua respecto al flujo anual, es esencial para mantener el caudal de base de muchos ríos y la humedad del suelo en las riberas y áreas bajas.

El agua subterránea es de esencial importancia debido a que representa la mayor reserva de agua potable en las regiones habitadas por los seres humanos. Puede aparecer en la superficie en forma de manantiales, o puede ser extraída mediante pozos. En tiempos de sequía, puede servir para mantener el flujo de agua superficial, pero incluso cuando no hay escasez, es preferible utilizar agua subterránea porque no tiende a estar contaminada por residuos o microorganismos. Aunque el agua subterránea está menos contaminada que la superficial, la contaminación de este recurso también se ha convertido en una preocupación en los países industrializados.

1.4.1. El agua subterránea en México

Anualmente, México recibe del orden de 1.51 billones de metros cúbicos de agua en forma de precipitación. De esta agua, el 72.5% se evapora y regresa a la atmósfera; el 25.6% escurre por los ríos o arroyos y el 1.9% restante se infiltra al subsuelo y recarga los acuíferos, de tal forma que los acuíferos del país reciben 78.5 mil millones de metros cúbicos de agua dulce renovable y se les extraen por medio de pozos, norias, galerías filtrantes y manantiales 27.5 mil millones de metro cúbicos. Así, el balance subterráneo refleja en principio una gran disponibilidad de agua en el subsuelo, sin embargo, esta situación es engañosa ya que gran parte de los principales acuíferos del país se encuentran seriamente sobreexplotados. (Estadísticas del agua en México, Ed. 2010, CONAGUA).

La unidad básica para el manejo del agua es la cuenca hidrológica, en la cual se considera la forma en que escurre el agua en la superficie (cuencas hidrográficas) y en el subsuelo (acuíferos). Con esta base, se integraron las trece regiones hidrológico-administrativas en que se organiza el país para fines de administración del agua.

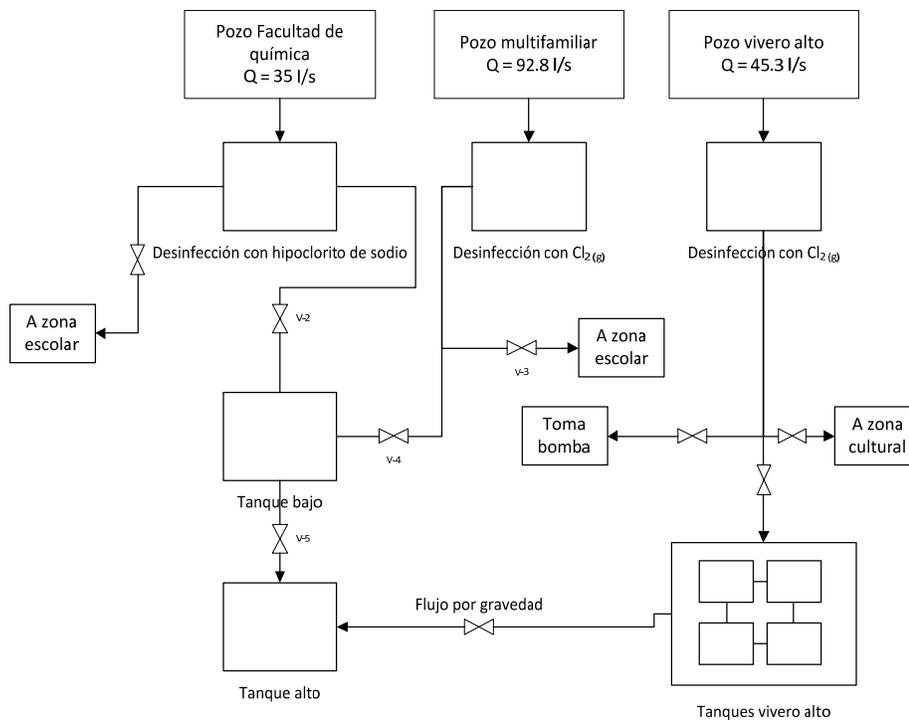
En lo que se refiere a las aguas subterráneas, el país se divide en 653 acuíferos o unidades hidrogeológicas, conforme a lo publicado en el *Diario Oficial de la Federación*, el 5 de diciembre de 2001.

La importancia del agua subterránea queda de manifiesto al considerar que, 62.5% del volumen que se suministra a la población, el 33.5% del que se destina a la agricultura y el 50% del que utiliza la industria tienen ese origen (Estadísticas del agua en México, Ed. 2010, CONAGUA).

1.5 CARACTERÍSTICAS DEL SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN DE AGUA POTABLE EN CIUDAD UNIVERSITARIA

El sistema de distribución de agua potable en Ciudad Universitaria consta de tres partes fundamentales; abastecimiento, almacenamiento y distribución, el siguiente esquema ejemplifica el arreglo actual del mismo:

Figura 1.1 Arreglo del sistema de distribución del agua para uso y consumo humano en Ciudad Universitaria (PUMAGUA, 2010)



Fuente: Informe Final PUMAGUA, 2008

1.5.1. Suministro

El subsistema de suministro que abastece agua potable a Ciudad Universitario depende de 3 pozos profundos: “Pozo de Química”, Pozo del Multifamiliar” Y “Pozo del Vivero Alto”. Las características de estos se describen en la siguiente tabla.

Tabla 1.1 Características generales de los pozos de abastecimiento de Ciudad Universitaria

	Pozo de la Facultad de Química	Pozo Multifamiliar	Pozo Vivero Alto
LOCALIZACIÓN	Facultad de Química	A un costado del Multifamiliar	Vivero Alto
ANTIGÜEDAD	1952	Años 60’s	Años 60’s
PROFUNDIDAD	132metros	193metros	157metros
GASTO MÁXIMO POR DÍA	35 l/s	92.8 l/s	45.3 l/s
CAPACIDAD DE LA BOMBA	125 HP	250 HP	250 HP

Fuente: Informe Final PUMAGUA, 2008

El mantenimiento que reciben anualmente es de limpieza, cada 5 años se realiza un mantenimiento completo, que implica tratamiento químico y eliminación de incrustaciones en el ademe (tubo de acero al carbono que se introduce dentro del pozo) mediante cepillado y limpieza. Mensualmente se miden los niveles dinámicos y estáticos de cada uno de los pozos con la finalidad de monitorear la recuperación de los mismos.

1.5.2. Almacenamiento

El almacenamiento de agua potable consta de tres tanques: tanque bajo, tanque alto, y tanque vivero alto (compuesto por 4 tanques), en total el sistema tiene una capacidad de almacenamiento de 12,000 m³, en la tabla 2 se muestran las características de los tanques y la capacidad de cada uno de ellos.

Tabla 1.2 Características de los tanques de almacenamiento

Tanque	Ancho (m)	Largo (m)	Altura (m)	Capacidad (m3)
Bajo	23	29	3	2,000
Alto	25	40	4	4,000
Vivero Alto (4)	20	25	3	6,000

Fuente: Informe Final PUMAGUA, 2008

El mantenimiento de los tanques se realiza dos veces por año, en periodo vacacional; y consiste en lavarlos, pintarlos y monitorear la calidad del agua por parte del Departamento de Servicios Médicos. Se lleva un registro de forma manual de los niveles en los mismos, el cual consiste en tomar la lectura visualmente, con ayuda de una regleta que está pintada en el interior del tanque y que tiene una precisión de 5 cm, estas mediciones se realizan frecuentemente a lo largo del año.

La forma de operar los pozos no es homogénea, puede enviarse el agua a los tanques o directamente a la red de distribución; el agua se envía a la red a criterio del operador y en ocasiones se manda el agua a la red para ejercer presión a manera de mantenimiento.

1.5.3. Distribución

La red de distribución de agua potable de Ciudad Universitaria tiene una longitud aproximada de 54 Km y consta de tuberías compuestas por diversos materiales: acero, asbesto, hierro fundido, PVC y PEAD, las tuberías de acero tienen 54 años de antigüedad.

La red de distribución, está dividida en diámetros comerciales de 1, 1½, 2 y 2½ pulgadas. Para algunas derivaciones hacia los edificios y tomas de riego se cuenta con tuberías que presentan diámetros entre 3 y 6 pulgadas; en las líneas de conducción primaria se presentan diámetros de 3 a 8 pulgadas y para las líneas de conducción, que van de los pozos a los tanques, existen diámetros de 10 y 12 pulgadas; sólo hay una línea de 20 pulgadas que va del tanque vivero alto a la red de distribución de la zona cultural.

1.5.4. Sistemas actuales de desinfección

Los sistemas de desinfección que operan actualmente, se encuentran instalados a pie pozo, los cuales son operados manualmente por personal de la Dirección General de Obras y

Conservación de la UNAM. La desinfección en los pozos Multifamiliar y Vivero alto, se lleva a cabo mediante gas cloro; en el pozo de Química se realiza con hipoclorito de sodio al 13%.

Tabla 1.3 Caracterización química de agua potable en el subsistema de suministro de acuerdo con la NOM-127-SSA1-2000, evaluada por un laboratorio externo certificado

PARÁMETRO	UNIDADES	LIMITE PERMISIBLE	POZO 1	POZO 2	POZO 3
Aluminio	mg/l	0,20	<0,15	<0,15	<0,15
Arsénico (Nota 2)	mg/l	0,05	0,0020	0,0016	0,0018
Bario	mg/l	0,70	<0,15	<0,15	<0,15
Cadmio	mg/l	0,005	<0,005	<0,005	<0,005
Cianuros (como CN-)	mg/l	0,07	<0,02	<0,02	<0,02
Cloro residual libre	mg/l	0,2-1,50	<0,06	<0,06	<0,06
Cloruros (como Cl-)	mg/l	250,00	74	45	49
Cobre	mg/l	2,00	<0,01	<0,01	<0,01
Cromo total	mg/l	0,05	<0,02	<0,02	<0,02
Dureza total (como CaCO ₃)	mg/l	500,00	112	130	107
Fenoles o compuestos fenólicos	mg/l	0,3	<0,001	<0,001	<0,001
Hierro	mg/l	0,30	<0,015	<0,015	<0,015
Fluoruros (como F-)	mg/l	1,50	0,42	0,16	0,68
Hidrocarburos aromáticos.	µg/l				
Benceno	µg/l	10,00	<0,10	<0,10	<0,10
Etilbenceno	µg/l	300,00	<0,10	<0,10	<0,10
Tolueno	µg/l	700,00	<0,01	<0,01	<0,10
Xileno (tres isómeros)	µg/l	500,00	<0,20	<0,20	<0,10
Manganeso	mg/l	0,15	<0,01	<0,01	<0,01
Mercurio	mg/l	0,001	<0,0005	<0,0005	<0,0005
Nitratos (como N)	mg/l	10,00	0,45	1,12	2,50
Nitritos (como N)	mg/l	1,00	0,002	0,002	0,002
Nitrógeno amoniacal (como N)	mg/l	0,50	0,32	0,49	0,32
pH (potencial de hidrógeno) en unidades de pH		6,5-8,5	7,00	7,08	6,97
Plaguicidas en microgramos/L:					
Aldrín y dieldrín (separados o combinados)	µg/l	0,03	<0,02	<0,02	<0,02
Clordano (total de isómeros)	µg/l	0,20	<0,10	<0,10	<0,10
DDT (total de isómeros)	µg/l	1,00	<0,5	<0,5	<0,5
Gamma-HCH (lindano)	µg/l	2,00	<1,00	<1,00	<1,00
Hexaclorobenceno	µg/l	1,00	<0,5	<0,5	<0,5
Heptacloro y epóxido de heptacloro	µg/l	0,03	<0,02	<0,02	<0,02

Metoxicloro	µg/l	20,00	<10,00	<10,00	<10,00
2,4 – D	µg/l	30,00	<10,00	<10,00	<10,00
Plomo	mg/l	0,01	<0,005	<0,005	<0,005
Sodio	mg/l	200,00	35,53	19,89	24.82
Sólidos disueltos totales	mg/l	1000,00	299	303	287
Sulfatos (como SO ₄ ⁼²)	mg/l	400,00	6	27	25
Sustancias activas al azul de metileno (SAAM)	mg/l	0,50	<0,01	<0,01	<0,01
Trihalometanos totales	mg/l	0,20	<0,10	<0,10	<0,10
Yodo residual libre	mg/l	0,2-0,5	<0,02	<0,02	<0,02
Zinc	mg/l	5,00	<0,01	<0,01	<0,01

Fuente: Informe Final PUMAGUA, 2008

Tabla 1.4 Determinación de cloro residual libre en la red de distribución de agua potable en el campus Ciudad Universitaria

<i>Punto de muestreo</i>	<i>PERIODO DE</i>	<i>PERIODO</i>
	<i>ACTIVIDADES ESCOLARES</i>	<i>VACACIONAL</i>
	<i>Fuera de normatividad</i>	<i>Fuera de normatividad</i>
1 Caseta de vigilancia 1	4 de 15 muestras (0.16 mg/l)	27 de 33 muestras(0.12 mg/l)
2 Posgrado de Odontología	2 de 15 muestras(0.04 mg/l)	19 de 33 muestras (0.10 mg/l)
Dirección General de		
3 Administración Escolar (DGAE)	3 de 15 muestras(0.006 mg/l)	24 de 24 muestras (0.07 mg/l)
4 Ciencias de la Atmósfera	0 de 15 muestras	1 de 30 muestras (0.13 mg/l)
5 Caseta de vigilancia 6	15 de 15 muestras(0.019 mg/l)	27 de 27 muestras (0.11 mg/l)
6 Tienda UNAM	0 de 15 muestras	5 de 27 muestras (0.09 mg/l)
7 Patrimonio Universitario	0 de 15 muestras	0 de 30 muestras
8 UNIVERSUM	0 de 15 muestras	9 de 33 muestras (0.09 mg/l)

Fuente: Informe PUMAGUA 2009

La caracterización refleja que no se rebasan los límites permisibles en ningún parámetro medido en ninguno de los pozos, sin embargo existen argumentos que fundamentan la necesidad de modificar el arreglo actual de los sistemas de desinfección, principalmente en la utilización de gas cloro como desinfectante:

- No existe una operación controlada de los sistemas de desinfección.

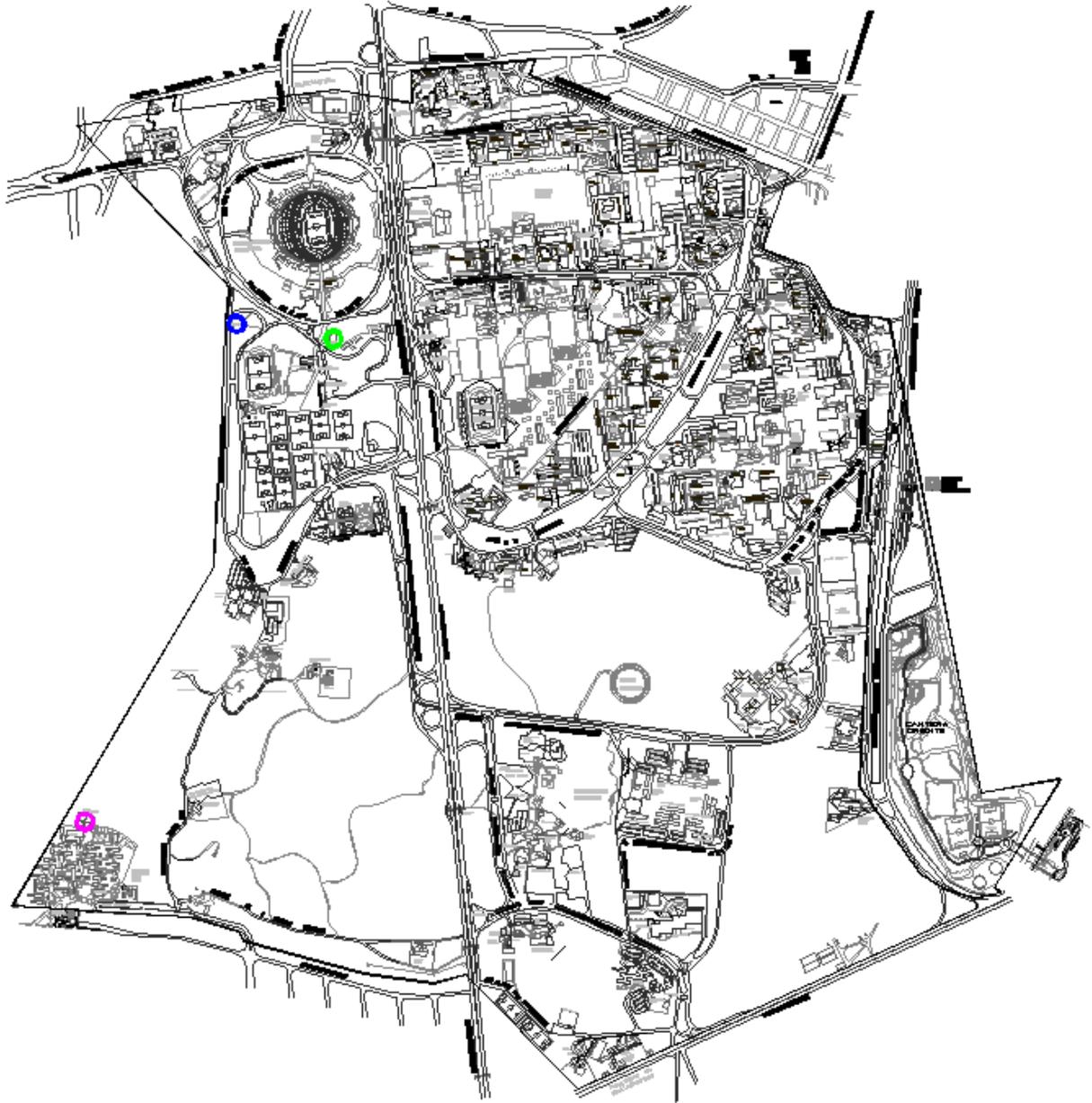
- No hay precisión de la manera en cómo se distribuye el agua potable en la red.
- No existe un documento oficial (diagrama) del sistema de distribución de agua potable.
- Se determinó en campo que hay inconsistencia en las concentraciones de cloro residual libre a lo largo de la red de distribución, detectándose un gran número de muestras fuera de la normatividad mexicana NOM-127-SSA1-2000 (0.2-1.5 mg/l); 33% de un total de 120 muestras analizadas en periodo de actividades escolares y 45% de un total de 237 muestras analizadas en periodo vacacional.
- La utilización de gas cloro como desinfectante está orientado principalmente para aguas con cargas de contaminantes considerables, debido a que se tiene en dosis más concentradas (99-100%).
- Presenta riesgos durante su manejo y transporte.
- Hay un antecedente de intoxicación por gas cloro en C.U., donde debido a una fuga del desinfectante a inicios de 2009 el operador del pozo tuvo que ser trasladado al hospital.
- Las fugas de gas cloro son de gran magnitud debido a que se mezcla con el aire y se expande muy rápidamente y en grandes áreas. La magnitud de una fuga de gas cloro se puede estimar multiplicando la fuga por 500 veces y esa es la magnitud del daño que produce.
- No se produce in situ, la secretaría de salud (SSA) promueve el uso de tecnología apropiada para desinfectar el agua, por medio de la generación in situ de gases oxidantes como el ozono (Juárez J., 1990, "Evaluación del sistema integral para el tratamiento del agua en un hospital general de la ciudad de México").

Es por esto que se propone la instalación de sistemas de desinfección con ozono a pie de pozos, ya que esto le daría seguridad a los consumidores porque garantiza la eliminación de una amplia gama de microorganismos, con la virtud de no dejar residuos químicos que puedan afectar las propiedades organolépticas del agua, mejorando la aceptación del consumidor. Esta justificante al ser difundida entre la comunidad universitaria, fomentaría eliminar el consumo de agua embotellada. Además, se asegura eficientar el sistema de desinfección del agua que se distribuye en el Campus Universitario, ya que se reducirán las concentraciones de cloro en los tanques de almacenamiento, lo que a su vez se traduce en el incremento del tiempo de vida útil

de los tanques y tuberías de distribución, logrando así los residuales de cloro necesarios a lo largo de la red.

Para mantener un residual en el trayecto pozo-tanques, será necesaria la desinfección con Hipoclorito de Sodio al 13% con una dosis significativamente menor a la actual, después de la desinfección con ozono. Si al operar de esta forma no se tiene el residual mínimo de 0.2 mg/L de cloro residual libre que estipula la NOM-127-SSA1-2000, será necesario identificar puntos de rechloración, los cuales pueden estar situados, antes o después de los tanques de almacenamiento o en la red de distribución.

Figura 1.2 Ubicación de los pozos del sistema de abastecimiento de agua potable de Ciudad Universitaria



Fuente: Informe final PUMAGUA, 2008

CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO

2.1 OZONO

2.1.1. Características generales

Química

El ozono existe en estado gaseoso a temperatura ambiente. Es un gas corrosivo y tóxico.

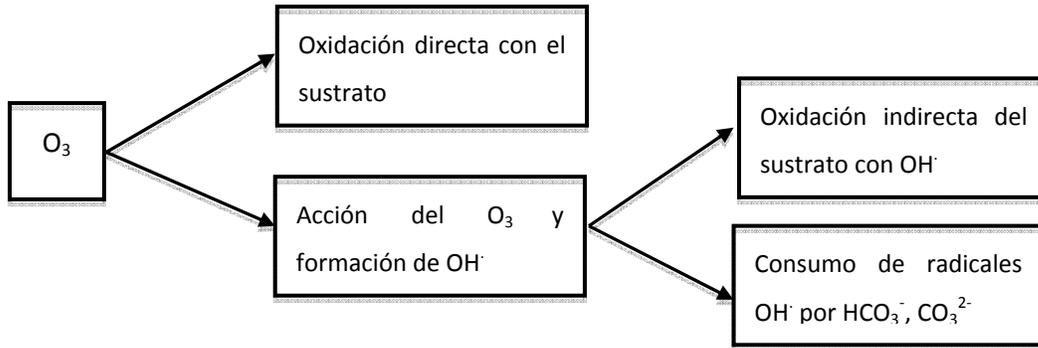
De los desinfectantes comúnmente utilizados en el tratamiento de agua es el oxidante más fuerte, el cual tiene un potencial de oxidación 1.5 veces mayor que el Cl_2 después del radical hidroxilo, el cual es 2.0 veces mayor que el Cl_2 (producto de la acción de oxidantes en agua). Es por esto que el ozono es capaz de descomponer una gran variedad de compuestos orgánicos e inorgánicos presentes en agua. Estas reacciones provocan una demanda de ozono, la cual debe ser cubierta antes de que aparezca una concentración residual en el agua.

El ozono es ligeramente soluble en agua, unas 14 veces menos soluble que el dióxido de cloro (otro desinfectante de uso común). La concentración utilizada típicamente en el tratamiento de agua es de alrededor de 14% v/v, lo cual limita la transferencia de masa a la fase líquida. Como consecuencia las concentraciones típicas de ozono en fase acuosa varían entre 0.1 y 1 mg/l.

El ozono reacciona en fase acuosa por dos vías principalmente:

- Por oxidación directa del ozono en su forma molecular
- Por oxidación indirecta de compuestos mediante radicales OH^\cdot

Figura 2.1: Reacciones de oxidación durante el proceso de ozonación de agua



Fuente: (Hoigné y Bader 1977)

2.1.2. Aplicaciones en la potabilización de agua

Propiedades Fisicoquímicas

El ozono es utilizado en plantas de potabilización por varias razones. La mayoría de las plantas de tratamiento instalan sistemas de ozonación para alcanzar objetivos específicos de desinfección. Sin embargo, se pueden obtener muchos beneficios secundarios a raíz de la ozonación como remoción de olor, sabor y color.

Todas las aplicaciones de ozono involucran reacciones de oxidación, tanto para desinfección como para oxidación de contaminantes específicos. En fase acuosa reacciona con los compuestos orgánicos e inorgánicos presentes en el agua. La mayoría de las reacciones que involucran compuestos inorgánicos ocurren de manera muy rápida, excepto las que involucran la formación de bromato. Las reacciones con productos orgánicos pueden ser muy rápidas, esto depende de las moléculas orgánicas involucradas y del pH. Las reacciones de oxidación avanzada con radicales OH son necesarias en algunos casos para remover contaminantes específicos difíciles de oxidar. Dentro de estos se encuentran algunos compuestos utilizados como solventes, la mayoría de los plaguicidas y los compuestos que generan olores y sabores en el agua como producto del crecimiento y descomposición de algas.

Es importante notar que la oxidación de componentes orgánicos mediante ozono puede aumentar la cantidad de carbono orgánico total presente en el agua (COT) la cantidad de compuestos orgánicos presentes en el agua, sin embargo, estos compuestos forman cadenas más pequeñas y pueden ser degradados con mayor facilidad.

Las principales aplicaciones del ozono para la potabilización de agua son:

- Desinfección: El ozono tiene un mayor poder de desinfección que los compuestos clorados, requiere de menores dosis y menor tiempo de contacto. Sin embargo el ozono no presenta una concentración de residual de desinfectante. Debido a esto, la ozonación tiene que ser complementada con una desafección secundaria por medio de cloro (aunque en menor dosis).
- Oxidación de contaminantes inorgánicos como sulfuro, hierro y manganeso
- Oxidación de microcontaminantes orgánicos como compuestos fenólicos y compuestos que imparten olor y sabor al agua
- Oxidación de macrocontaminantes orgánicos para aumentar la biodegradabilidad de los compuestos, remover color, disminuir la cantidad necesaria de cloro, eliminar los precursores de subproductos de la desinfección

2.1.3. Desinfección

De acuerdo a la United States Environmental Protection Agency (USEPA) el principal objetivo de la ozonación en un gran número de plantas de tratamiento es alcanzar la desactivación logarítmica para virus, *Giardia* y *Cryptosporidium* a niveles por debajo de lo establecido por los estándares de calidad. Para los estándares europeos se considera que un agua cumple con todos los requisitos de desinfección cuando se alcanza un residual de 0.4 mg/l en 4 min.

Desactivación logarítmica

La desactivación logarítmica se utiliza comúnmente para reportar la eficiencia de desinfección en los procesos de tratamiento de agua. Una desactivación 1-log representa una remoción del 90% de los patógenos presentes, una desactivación 2-log representa una remoción del 99% y así sucesivamente. La relación entre porcentaje de remoción y desactivación log se puede calcular de la siguiente manera:

$$\%d = \left(1 - \frac{1}{10^x}\right) \times 100$$

En donde:

%d = porcentaje de remoción

x = desactivación logarítmica del microorganismo

El contenido de patógenos presentes en agua puede ser reducido por medios físicos o mediante inactivación química. La remoción se refiere al mecanismo por el cual los patógenos pasan de un medio a otro (o de una fase a otra) ya sea por filtración, sedimentación o coagulación; bajo estas condiciones, se tiene la generación de un lodo que deberá ser posteriormente tratado para su disposición final. Con la inactivación química, el metabolismo y los procesos reproductivos de los patógenos son afectados a tal grado que, ya no representan un riesgo a la salud, debido a que son incapaces de realizar sus funciones vitales.

La ecuación para calcular el número de organismos viables después de cualquier proceso de desinfección es la siguiente:

$$N = N_0 \times 10^{-k_p CT}$$

En donde:

N = número de organismos viables después del proceso de desinfección

N_0 = número inicial de organismos viables

k_p = constante cinética de desactivación, k_g para *Giardia*, k_v para virus ó

k_c para *Cryptosporidium*

C = concentración residual del desinfectante en el agua en mg/l

T = tiempo de contacto en min.

Esta ecuación se conoce comúnmente como la ley de Chick la cual se puede reordenar de la siguiente manera para conocer el nivel de inactivación en base log del microorganismo en cuestión:

$$\log (N_0/N) = k_p(CT)$$

En donde:

$\log (N_0/N)$: desactivación log

k_p : constante cinética de inactivación del patógeno, k_g para *Giardia*, k_v para virus ó

CT : “poder de desinfección” que es el producto entre la concentración residual y el tiempo de contacto expresado en (mg min/l)

Las constantes de inactivación para virus y Giardia pueden ser obtenidas a partir de las siguientes ecuaciones:

$$k_g = 1.038 e^{0.0714 T}$$

$$k_v = 2.174 e^{0.0701 T}$$

En donde T representa la temperatura del agua en grados Celsius

Estas ecuaciones se ajustan a una lista de coeficientes dependientes de la temperatura utilizados para calcular las constantes cinéticas de inactivación de acuerdo al documento de la USEPA: Surface Water Treatment Rule Guidelines Apéndice O.

También existe una ecuación para el cálculo de la constante de inactivación para *Cryptosporidium* publicado por la USEPA en el 2003:

$$k_c = (0.0397)(1.09757)^T$$

En el caso del *Cryptosporidium*, la desinfección logarítmica se calcula de la siguiente manera de acuerdo a la USEPA:

$$\log\left(\frac{N_0}{N}\right) = \log_{10}(1 + 2.303 k_c CT)$$

2.1.4. Formación de subproductos

La ozonación no favorece la formación de trihalometanos (TTHM) ni ácidos haloacéticos (HAAs) como producto de la ozonación de materia orgánica natural (NOM). Sin embargo, si hay presencia de bromo, puede formar productos bromados, los cuales son carcinogénicos.

La adición de cloro como desinfectante secundario puede en algunos casos incrementar la formación subproductos de desinfección (DBP's, por sus siglas en Inglés) dependiendo de la naturaleza de la materia orgánica natural (MON) presente en el agua. En general, la ventaja de aplicar ozonación antes de cloración es la reducción de la formación de subproductos indeseables.

La formación de productos bromados debe ser de especial atención cuando la concentración de bromuro en el agua a tratar excede los 0.10 mg/l. En ese caso existen los siguientes métodos para mitigar la formación de compuestos bromados en el agua:

- La disminución del pH durante ozonación disminuye la formación de bromato en el agua, pero aumenta la formación de productos orgánicos bromados
- La adición de amoníaco durante la ozonación disminuye tanto la formación de bromato como y la formación de compuestos orgánicos bromados
- La adición de peróxido disminuye la formación de compuestos orgánicos bromados pero puede aumentar o disminuir la concentración de bromato dependiendo de las características naturales del agua
- Cantidades bajas de carbono orgánico disuelto resulta en valores bajos de compuestos bromados

Tabla 2.1 Principales subproductos de la ozonación

Subproductos de la desinfección con ozono	
Aldehídos	Ceto ácidos
Formaldehído	Ácido pirúvico
Acetaldehído	Compuestos bromados
Glioxal	Ión bromato
Metil glioxal	Bromoformo
Ácidos	Ácidos acéticos bromados
Ácido acético	Acetonitrilos bromados
Ácido oxálico	Bromopicrina
Ácido succínico	Otros
Ácido fórmico	Peróxido de hidrógeno

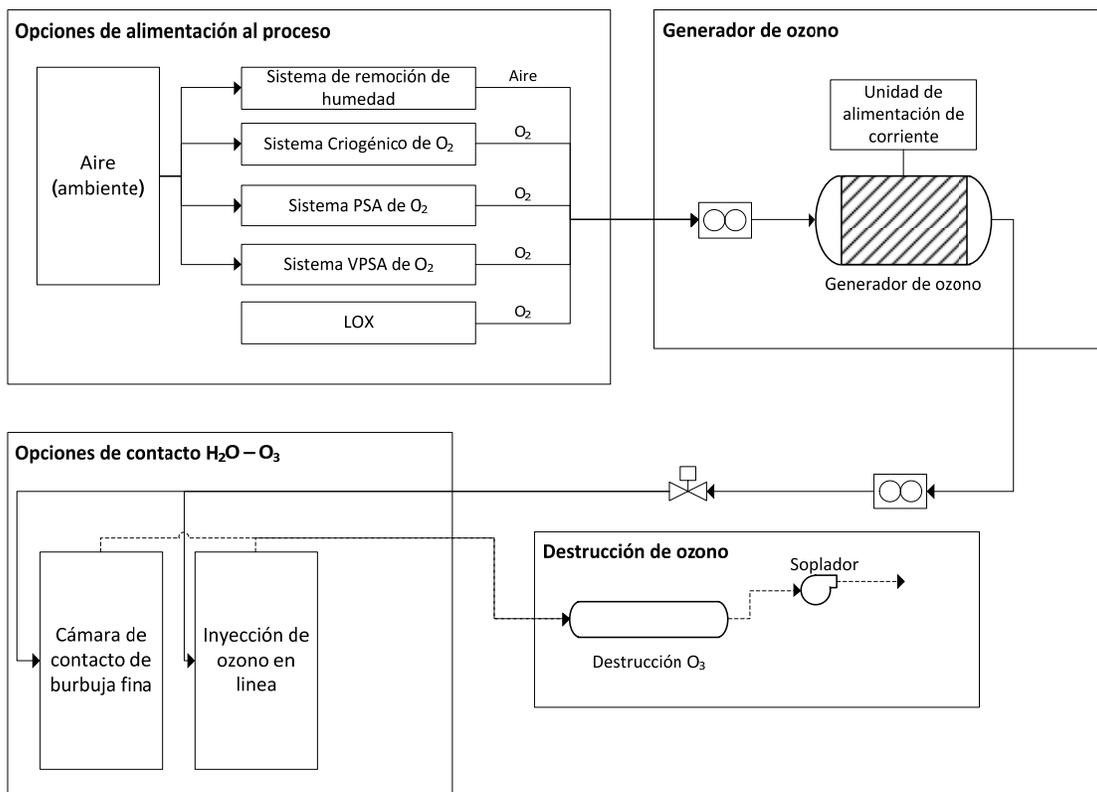
Fuente: Alternative Disinfectants and Oxidants Manual, USEPA, 1999

2.2 DISEÑO Y OPERACIÓN DE EQUIPOS Y PROCESOS DE OZONACIÓN

2.2.1. Componentes del sistema de ozonación

El proceso de ozonación para potabilización requiere de 4 componentes primarios: el generador de ozono, la fuente de gas de alimentación, el contactor de ozono gas-líquido y el destructor de ozono.

Figura 2.2 Proceso de ozonación



Fuente: *Ozone in Drinking Water Treatment: Process Design, Operation and Optimization*, AWWA, 2005

2.2.2. Preparación del gas de proceso

Existen diferentes métodos para preparar el gas de proceso, la elección depende en gran medida del gas de alimentación utilizado para la generación de ozono: oxígeno líquido, aire, o aire enriquecido con oxígeno. A su vez, la elección del tipo de gas de alimentación depende de la disponibilidad del mismo, de los requerimientos de ozono del proceso, y la elección entre menores costos de operación a una mayor inversión o viceversa. En general, se requiere que el

gas que entra a la corona de descarga esté libre de partículas y cuente con una temperatura de rocío menor a $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ a la presión de operación del sistema para asegurar un funcionamiento adecuado. A continuación se describen de manera general los procesos de preparación de gas de proceso dependiendo del tipo de gas de alimentación:

2.2.2.1. Sistemas de ozonación alimentados por aire

Secado por refrigeración

El sistema de secado por refrigeración disminuye la temperatura del gas a alrededor de $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ lo cual permite una reducción del contenido de humedad. Es necesario que este sistema de refrigeración funcione de manera óptima para evitar una sobrecarga en los desecantes, los cuales pueden reducir su tiempo de operación cuando se tiene un alto contenido de humedad.

Secado mediante el uso de desecantes de reactivación térmica

El uso de sistemas de secado es indispensable para el buen funcionamiento de los generadores de ozono. Generalmente se utilizan dos torres empacadas con alúmina para secar el aire proveniente del sistema de refrigeración. El uso de 2 torres es necesario para que se pueda cumplir con el ciclo de reactivación del desecante, el ciclo completo de secado y regeneración dura aproximadamente entre 16 y 24 horas. La instalación de filtros antes y después del secado es indispensable, el filtro previo al secado está diseñado para remover el exceso de humedad y el filtro post-secado está diseñado para remover las partículas provenientes del aire de alimentación y las presentes en el sistema de secado.

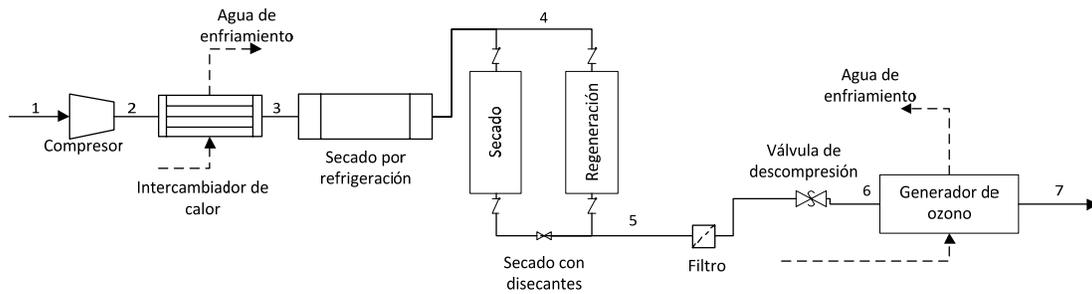
Existen 2 diseños principalmente en las torres de secado: torres de reactivación por calor internas, y torres de reactivación por calor externas. Las torres de reactivación interna utilizan aire de purga proveniente de la torre que se encuentra en operación (entre 5 y 15 % del aire), mientras que las de reactivación externa toman aire del ambiente que entra en contacto con el desecante por medio de un intercambiador de calor. El costo de operación de las torres de reactivación interna es mayor debido a los requerimientos de energía adicional (compresión y enfriamiento) que se requieren para compensar el aire de purga utilizado ya que el tiempo de vida del desecante es menor. Las torres de reactivación interna presentan ventajas en el costo de operación a una mayor inversión capital. Para el funcionamiento óptimo del generador de ozono es necesario que la temperatura de rocío del aire de alimentación no exceda los $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ a la presión de operación del sistema.

Los sistemas de secado con desecantes de reactivación térmica se utilizan comúnmente en sistemas de presión menor a 1.7 bar.

Sistema de secado con desecantes sin reactivación térmica

El secado sin intercambio de calor se utiliza principalmente en los sistemas de alimentación de presión alta (mayor a 6.9 bar). Al igual que en el caso anterior, es necesario que el proceso de secado cumpla con un ciclo de regeneración del desecante. El sistema de regeneración consiste en disminuir a presión ambiente la columna de secado y purgarla con aire seco de proceso proveniente de la columna que se encuentra en uso (15% a 20% del flujo volumétrico de la columna). Las partículas de agua presentes en el desecante se desorben debido a que el aire de purga tiene una menor presión de vapor. Es sumamente importante el diseño adecuado de las válvulas para el cambio de ciclo de secado, ya que la entrada de un exceso de humedad al sistema puede ocasionar el paro de la planta de generación.

Figura 2.3: Proceso de ozonación de baja presión alimentado por aire



Fuente: *Ozone in Drinking Water Treatment: Process Design, Operation, and Optimization*, AWWA, 2005

Tabla 2.2 Datos del proceso de ozonación

Etapa	1	2	3	4	5	6	7
O ₂ (%wt)	23.1	23.1	23.1	23.1	23.1	23.1	-
N ₂ (%wt)	75.6	75.6	75.6	75.6	75.6	75.6	-
Ar (%wt)	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	-
O ₃ (%wt)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2.0
Q (m ³ /min)	19.7	19.7	19.7	19.7	19.7	19.7	19.7
P (bar)	1.4	1.4	1.3	1.2	1.1	0.8	0.8
T (°C)	128	128	32	4	10	10	46
ppm H ₂ O	36.4	36.4	13.5	2.4	1.1	1.1	4.0
TR (°C _{sp})	35	35	18	-6	-73	-73	-64

Fuente: Ozone in Drinking Water Treatment: Process Design, Operation, and Optimization, AWWA, 2005

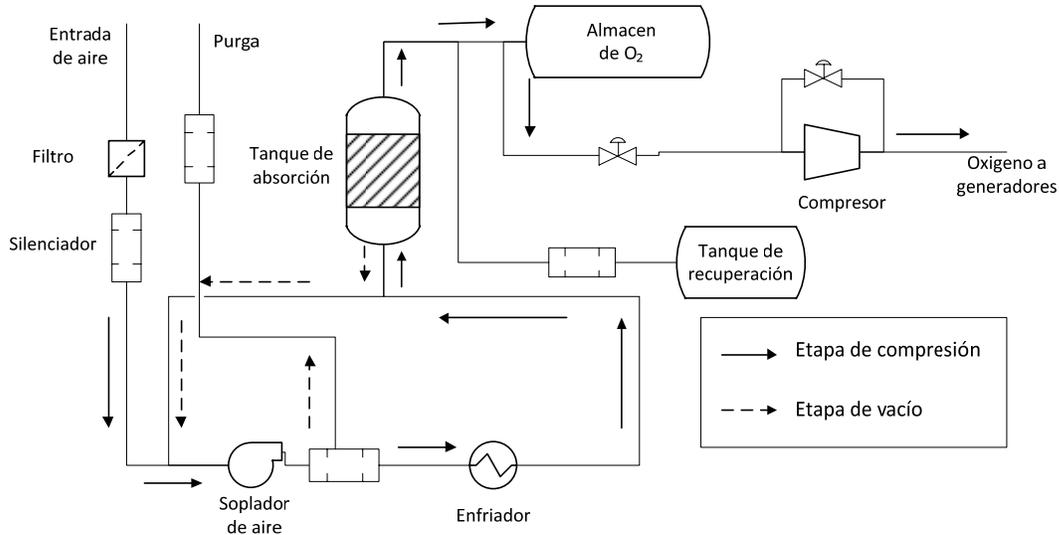
2.2.2.2. Sistemas de ozonación alimentados por oxígeno

Consisten en generar oxígeno de alta pureza a partir de aire del ambiente. Los procesos se dividen principalmente en criogénicos y no-criogénicos:

Sistema de adsorción de oscilación al vacío (VPSA – Vacuum-Pressure Swing Adsorption)

El VPSA es un método no criogénico para generar oxígeno. El proceso consiste en hacer pasar aire por mallas moleculares que remueven el dióxido de carbono, el nitrógeno y la humedad del aire. En una segunda etapa, se desorben los compuestos de las mallas moleculares mediante un proceso de vacío. A continuación se presenta un diagrama que muestra las etapas del proceso:

Figura 2.4: Proceso de ozonación alimentado por oxígeno



Fuente: *Ozone in Drinking Water Treatment: Process Design, Operation, and Optimization*, AWWA, 2005

Sistema de adsorción de oscilación de presión (PSA – Pressure Swing Adsorption)

Se trata de un sistema no-criogénico para generar oxígeno. El proceso es muy similar al VPSA ya que utiliza mallas moleculares para absorber y desorber el CO₂ y H₂O presente en el aire, aunque la desorción se lleva a cabo a una mayor presión (6.2 bar). En general, los sistemas PSA se recomiendan únicamente para escala menor con requerimientos de dosis < 3 mg/l. Los sistemas PSA son menos sofisticados que los VPSA, pero el costo de operación es un 50% más alto.

2.2.2.3. Sistemas de oxígeno líquido (LOX)

Desde mediados de la década de los 90's el oxígeno líquido ha sido adoptado preferentemente como gas de alimentación para los sistemas de ozonación para escalas desde <380 m³/día hasta 2,800 m³/día. La principal diferencia entre los sistemas LOX y los demás, es que el gas de

alimentación requiere de proveedores, en otras palabras, se deben comprar y/o reabastecer los tanques de oxígeno líquido.

En los sistemas LOX se alimenta oxígeno líquido proveniente de los tanques de almacenamiento el cual pasa por sistemas de vaporización antes de entrar al generador de ozono.

Tabla 2.3: Opciones de alimentación para los procesos de ozonación

Tipo de alimentación	Ventajas	Desventajas
Aire	<ul style="list-style-type: none"> - Equipo de uso común - Tecnología probada - Adecuado para sistemas a pequeña y mediana escala 	<ul style="list-style-type: none"> - Mayor consumo de energía por volumen de ozono generado - Mayores requerimientos de equipo para manejo de gases - Concentración máxima de ozono de 3% - 5% (%wt)
Oxígeno (general)	<ul style="list-style-type: none"> - Concentraciones de O₃ más elevadas (8 – 14%) - Adecuado para todo tipo de sistemas 	<ul style="list-style-type: none"> - Existen mayores riesgos de seguridad - Se requieren materiales resistentes al oxígeno
LOX	<ul style="list-style-type: none"> - Menores requerimientos de equipo - Fácil operación y mantenimiento - Se puede almacenar oxígeno para cumplir con demandas pico 	<ul style="list-style-type: none"> - Variación en los precios del LOX - Se requiere almacenar oxígeno en el sitio (supone mayores riesgos) - Pérdida de oxígeno cuando no está en uso (boil-off)
Oxígeno criogénico	<ul style="list-style-type: none"> - Equipo similar al utilizado para preparación de aire - Adecuado para sistemas de gran escala - Se puede almacenar oxígeno para cumplir con demandas pico 	<ul style="list-style-type: none"> - Equipo de mayor complejidad que el LOX - Se requiere de un alto nivel de sofisticación en el equipo de manejo de gas - Altos requerimientos de capital - Mantenimiento y operación compleja

Fuente: Alternative Disinfectants and Oxidants Guidance Manual USEPA

2.2.3. Generación de ozono

El generador de ozono es el componente central para la producción de ozono. Consiste en una unidad de alimentación de corriente y una unidad de generación la cual contiene los dieléctricos y el sistema de enfriamiento. El generador es diseñado por el proveedor con base a los parámetros de diseño (concentración de ozono requerida, flujo de agua nominal) establecidos

para la instalación. Los otros tres componentes del sistema de ozonación son más genéricos pero por lo general la misma empresa provee el equipo para todo el proceso.

Consideraciones para el diseño del generador de ozono

El generador puede funcionar a partir de tres tipos de gas de alimentación: aire, aire enriquecido, u oxígeno puro. La concentración de oxígeno a la entrada puede variar entre 23 y 100 % p/p mientras que la concentración de O₃ a la salida puede variar entre 1 y 16% p/p (1 a 4% para aire y 8 a 12% para oxígeno puro típicamente).

Las moléculas de ozono son generadas por el flujo de electrones a través de una corona de descarga en la presencia de oxígeno. Se requiere que el gas de alimentación esté libre de humedad y libre de partículas. La presencia de partículas puede causar interferencias en la descarga que dañen al equipo. Adicionalmente, la humedad genera ácido nítrico el cual puede causar corrosión. Como consecuencia, la presencia de componentes no deseados en el gas de alimentación disminuye la eficiencia energética del generador de ozono.

Eficiencia energética

Los generadores pueden ser de baja, media y alta frecuencia. La diferencia de potencial aplicada a los generadores puede ser de 3500 a 20000 Volts y operar a una frecuencia entre 60 y 6000 Hz. Los diseños más actuales permiten un mayor flujo de electrones sin incrementar de sobremano el voltaje aplicado. Esto puede causar daños a los equipos. A mayor flujo de electrones hay una mayor concentración de ozono y se requiere un menor flujo de oxígeno, lo cual hace que los sistemas alimentados por oxígeno puro sean más eficientes. Los sistemas de ozonación alimentados por oxígeno requieren un menor costo capital y de operación.

Flujo de agua de enfriamiento

Los generadores de ozono por corona de descarga son ineficientes por naturaleza. La energía específica requerida para formar ozono a partir de oxígeno es de 0.820 kWh/kgO₃. Sin embargo, los requerimientos energéticos a nivel de operación son 10 veces mayores para sistemas de mediana frecuencia alimentados por oxígeno, y hasta 20 veces mayores para sistemas de baja frecuencia alimentados por aire. Es por esto que se requiere agua de enfriamiento para remover el calor generado por disipación de energía. El flujo de agua de enfriamiento es una función de

la ganancia de calor (incremento en la temperatura del sistema) y la energía eléctrica perdida como calor.

2.2.4. Contacto de ozono en agua

Para transferir el ozono al agua a tratar se utilizan distintos tipos de contactores. El tipo de contactor a utilizar se selecciona en función del objetivo específico de la ozonación, éstos objetivos pueden agruparse en dos clases según la velocidad de las reacciones involucradas en los mismos:

- *Reacciones rápidas:* tales como las de inactivación de microorganismos, oxidación del hierro, manganeso y sulfuros.
- *Reacciones lentas:* tales como las de oxidación de plaguicidas, compuestos orgánicos volátiles y otros compuestos orgánicos complejos que, debido al tipo de cinética involucrada, tienden a requerir tiempos de reacción más prolongados.

Si el objetivo fundamental de la ozonación es la desinfección, lo que suele hacerse es agregar lo más rápidamente posible suficiente cantidad de ozono como para satisfacer la demanda de ozono y poder mantener un residuo de ozono durante un período de tiempo lo suficientemente largo como para asegurar la inactivación o destrucción de los microorganismos.

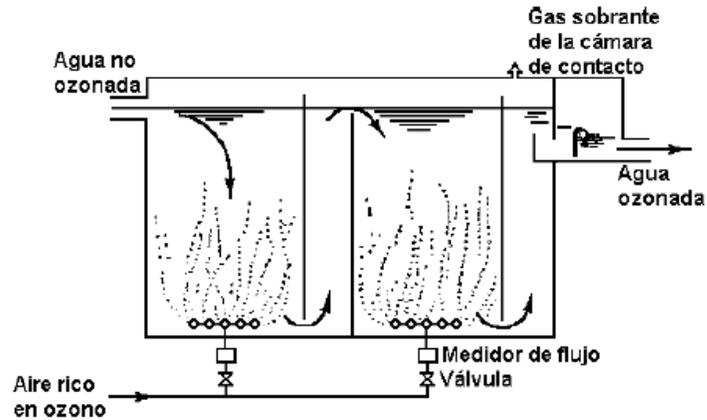
El diseño y calidad de construcción del generador es crítico y en general, determina el éxito o el fracaso de los procesos de desinfección con ozono.

2.2.4.1. Tipos de contactores

Cámara de contacto de burbuja fina

La cámara de contacto de burbuja fina consiste en un espacio el cual está separado por bafles para asegurar un flujo de tipo pistón. Comúnmente se utilizan entre 2 y 6 bafles y tienen una altura de 4 a 7 m.

Figura 2.5 Cámara de contacto de burbuja fina

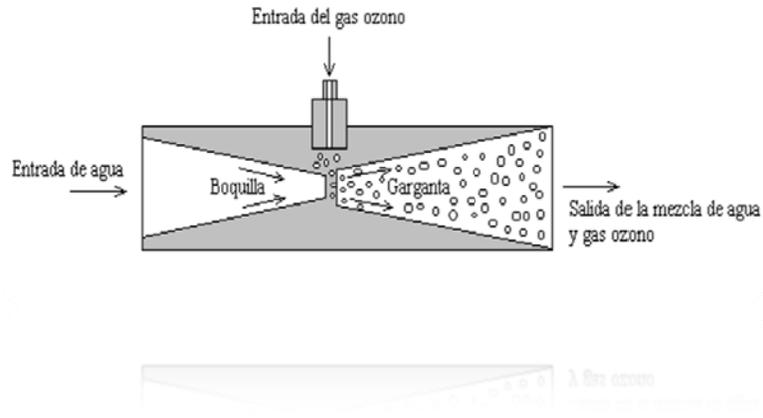


Ventajas	Desventajas
No tiene partes móviles	Cámaras de contacto muy profundas
Eficiencia alta de transferencia	Limitado a flujo ascendente de burbujas
Baja pérdida de carga hidráulica	Mantenimiento de cámara complicado
Facilidad de operación	

Inyección en línea de ozono

La inyección en línea consiste en hacer pasar la corriente de agua por una sección Venturi en la que se genera una presión negativa y con esto se inyecta el ozono al agua. Puede ser de inyección lateral o en línea. Posteriormente pasa a una cámara de mezcla estática.

Figura 2.6 Inyección en línea de ozono



Ventajas

- La inyección y la mezcla estática no tiene partes móviles
- Muy alta eficiencia de transferencia
- Las dimensiones del contactor son compactas

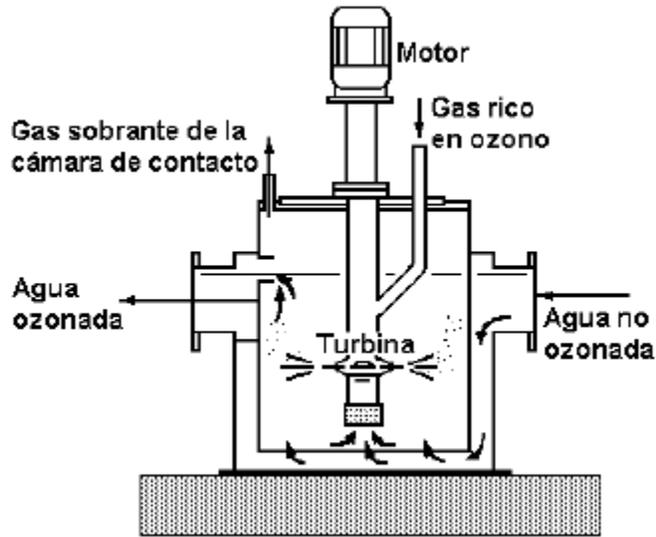
Desventajas

- Se requieren necesidades adicionales de bombeo debido a pérdidas de carga hidráulica
- Operación más compleja de alto costo

Turbinas de mezclado

Las turbinas de mezclado consisten de un motor rotatorio el cual dispersa el ozono dentro de una cámara de contacto. Cuenta con altas eficiencias de transferencia.

Figura 2.7 Contactor con turbinas de mezclado

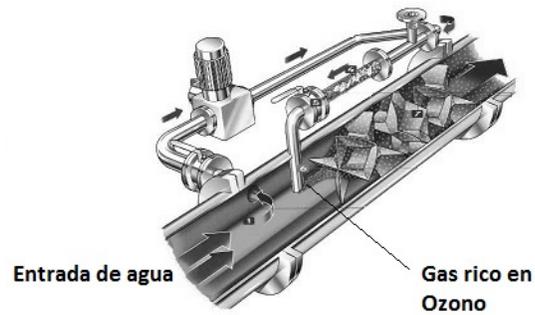


Ventajas	Desventajas
La alta turbulencia generada en la cámara favorece la formación de burbujas pequeñas que incrementan la transferencia de masa	Requiere de energía adicional
Las turbinas pueden reutilizar el ozono no transferido	Alto costo de mantenimiento del motor y la turbina
No se tienen problemas de obstrucción en los difusores	Se requiere mantener un flujo de gas constante

Contactores de mezcla estática

Los contactores de mezcla estática consisten en hacer pasar la corriente de agua por una sección tubular donde se pone en contacto con el ozono en línea, normalmente tiene un diámetro de 0.5 a 0.9 m, en la que se genera una presión negativa y con esto se inyecta el ozono al agua, velocidad del líquido de 0,5 – 1,7 m/s, relación gas/líquido de 1 – 10 % y se ubica en una derivación del flujo principal.

Figura 2.8 Contactor de mezcla estática



Ventajas

Alta mezcla radial y alcanza un 85 ó 98 % de eficiencia
Bajo mantenimiento y pocas partes móviles

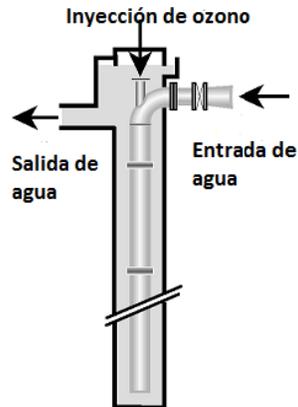
Desventajas

Altas pérdidas de presión (0,05- 0,3 bar por m de tubería)
Tiempo de contacto muy corto (1 a 6 seg)
Requiere un sistema de contacto posterior.

Tubo en U

Consiste en hacer pasar la corriente de agua por un tubo en U, mientras se inyecta en la curva del tubo el ozono al agua. Puede ser de inyección lateral o en línea.

Figura 2.9 Contactor de tubo en U



Ventajas	Desventajas
Permite tratar volúmenes grandes de líquido. Hidrodinámica tiene mayor acercamiento al patrón de flujo pistón Efecto de cortocircuito es casi nulo Eficiencia de transferencia de masa promedio: 95 %, puede alcanzar 98 a 99 %. Disuelve mayor cantidad de ozono a mayor velocidad (1,2 - 2 m/s) El tiempo de contacto es menor (2- 6 min) Relación gas- líquido de 1 a 6 %	Su altura es casi 10 veces mayor Su empleo está restringido a objetivos puntuales Costo de perforación y nueva tecnología Limitado intervalo de flujo de líquido

2.2.5. Destrucción de ozono

En una cámara de contacto o en cualquier tipo de proceso de ozonación es necesario tener un sistema de venteo que pase por un destructor de ozono para evitar cualquier tipo de contaminación al ambiente y con esto asegurar la seguridad de los operadores.

Debido a que las variaciones en el nivel de agua pueden presurizar o despresurizar el contactor, el sistema de venteo debe contar con un sistema de válvulas para mantener constante la presión dentro del sistema. En el destructor de ozono se genera un vacío debido a la presión de succión de la bomba de salida.

El aire de salida del contactor es húmedo debido al contacto con el agua a tratar. Dependiendo de la cantidad de humedad presente en el agua y la temperatura del medio ambiente se puede generar condensación en las tuberías del sistema de destrucción. Es muy importante drenar el agua condensada ya que puede generar daños al catalizador que se utiliza en el destructor.

El destructor de ozono consiste típicamente de un sistema de calentamiento y un catalizador, el cual comúnmente es MnO_2 . El sistema de calentamiento debe asegurar que no se generen condensados los cuales pueden desactivar el catalizador.

2.3 TIPOS DE PRUEBAS A ESCALA LABORATORIO UTILIZADAS PARA EL DIMENSIONAMIENTO DE CONTACTORES

2.3.1. Cinética del ozono en el agua

El ozono al entrar en contacto con el agua reacciona con los compuestos presentes en la misma, la velocidad a la cual este se descompone depende principalmente de la temperatura del agua, el pH, la cantidad de materia orgánica presente (MON) y la alcalinidad del agua.

Cuando el ozono presente en el agua no se ve afectado por reacciones de cinética lenta, o por reacciones secundarias con los compuestos presentes en el agua, su velocidad de descomposición se puede expresar como una ecuación de pseudo primer orden de la siguiente forma:

$$-\frac{d[O_3]}{dt} = k^* [O_3]$$

Desarrollando la ecuación queda de la siguiente forma:

$$-\ln \frac{[O_3]}{[O_3]_0} = k^* t$$

Es importante notar que cuando el ozono presenta estas características de descomposición se pueden utilizar las pruebas de residual a los 60 segundos y el tiempo de vida media para modelar el comportamiento del mismo dentro del contactor.

La descomposición de ozono no siempre se comporta como una ecuación cinética de primer orden, depende del tipo de materia oxidable presente en el agua.

Por ejemplo, se ha encontrado que a valores de pH entre 8 y 11 y en ausencia de radicales CO_3^{-2} (Gurol y Singer 1982) la ecuación cinética que describe la descomposición de ozono es una combinación entre primer y segundo orden de la siguiente forma:

$$-\frac{d[\text{O}_3]}{dt} = k_1[\text{O}_3] + k_2[\text{O}_3]^2$$

Existen ecuaciones cinéticas reportadas en la literatura para compuestos específicos tales como el hierro y el manganeso, el amoníaco, los compuestos bromados, los ácidos húmicos, hidrocarburos, entre otros.

2.3.2. Tiempo de vida media del ozono en el agua

La vida media del ozono en el agua se utiliza para estimar el coeficiente de primer orden de descomposición de ozono en el agua a una dosis de ozono transferida determinada. Se puede conocer el tiempo de vida media a partir de medir la concentración residual de ozono en el agua a tratar para diferentes dosis de ozono aplicadas y hacer una regresión lineal para una gráfica de $T_{1/2}$ vs dosis de ozono aplicada. Es importante mencionar que la demanda y la descomposición del ozono dependen de la dosis de ozono transferida y las características del agua como pH, temperatura, y tipo y cantidad de materia orgánica.

Para conocer el tiempo de vida media del ozono en el agua es necesario partir de una solución de ozono saturada, transferirla al agua problema (en este caso el agua del pozo multifamiliar de CU), y medir la concentración residual remanente a lo largo del tiempo. Para medir la concentración residual en el agua se utiliza el método del indigo.

Una vez que se tienen medidas las concentraciones a lo largo del tiempo se hace una gráfica del logaritmo del cociente entre la concentración medida y la concentración inicial del ozono transferido al agua problema en función del tiempo de reacción. Se ajusta una ecuación de regresión lineal a los puntos arriba de un minuto de tiempo de reacción (no se toma en cuenta la concentración antes del primer minuto de reacción ya que la descomposición del ozono en este tiempo se comporta de manera acelerada por cuestiones de mezclado y reacciones iniciales entre el ozono y el agua) de la siguiente forma:

$$\ln \left(\frac{[O_3]_r}{[O_3]_{r,0}} \right) = k^*t + b$$

En donde:

$[O_3]_r$: concentración residual del ozono medida al tiempo t (mg/l)

$[O_3]_{r,0}$: concentración residual del ozono al tiempo cero (mg/l)

t : tiempo de reacción (min)

k^* : pendiente de la ecuación de regresión y constante de primer orden de descomposición de ozono (min^{-1})

b : ordenada al origen

Si los datos experimentales se ajustan a la ecuación anterior con una alta correlación, entonces se puede suponer que la descomposición del ozono es de primer orden con respecto a la concentración de ozono inicial.

Una vez que se cuenta con esta ecuación el tiempo de vida media para cada dosis de ozono transferida se calcula de la siguiente manera:

$$T_{1/2} = \frac{\ln(2)(0.5)}{k^*}$$

En donde:

$T_{1/2}$ = tiempo de vida media de ozono en el agua (min)

k^* = pendiente de la ecuación de regresión y constante de primer orden de descomposición de ozono (min^{-1})

Una vez que se tienen mediciones del tiempo de vida media para diferentes dosis de ozono transferidas se puede elaborar una gráfica de $T_{1/2}$ vs DOT que se puede extrapolar para el cálculo del tiempo de vida media en una cámara de contacto.

2.3.3. Residual a los 60 segundos

El residual a los 60 segundos se utiliza para estimar la concentración de salida de un contactor de ozono de burbuja fina. La descomposición del ozono es más acelerada dentro de los primeros lapsos de tiempo de contacto con el agua debido a la demanda instantánea (v.gr., el ozono que reacciona de forma instantánea con los compuestos oxidables presentes en el agua). El residual a los 60 segundos de contacto es función de la dosis transferida al agua problema y se ve afectada por las condiciones del agua como pH, temperatura, tipo y cantidad de materia orgánica presente.

La concentración residual a los 60 segundos de reacción se utiliza para estimar la concentración de ozono en el agua a la salida de la primera cámara de disolución.

2.3.4. Demanda de ozono

La demanda de ozono de un agua es un parámetro que ha sido utilizado por varias décadas para el diseño de sistemas de ozonación y para el cálculo de la dosis requerida de oxidante para lograr algún objetivo, que es generalmente la desinfección.

El método utilizado para la determinación de la demanda es de suma importancia, ya que permite calcular parámetros clave que otorgan información valiosa relacionada con la calidad del agua a tratar.

Previo al cálculo de la demanda de ozono deben tomarse en cuenta dos factores importantes:

- El tiempo de contacto:

La cantidad de ozono consumido por el agua depende del tiempo de reacción, así que la demanda de ozono debe definirse a un tiempo de reacción determinado.

- La eficiencia de transferencia:

La demanda puede expresarse considerando la dosis de ozono aplicada (DOA) o la dosis transferida (DOT).

Anteriormente la demanda era determinada gráficamente después de establecer la curva de ozono residual contra la DOA. Para esto se inyectaban cantidades definidas crecientes de ozono a un recipiente que contenía una muestra del agua problema, a continuación el agua y el gas se agitaban y se medía la concentración residual después de un determinado tiempo de reacción. Dependiendo del tipo de recipiente, el contenido de agua, la cantidad de ozono inyectado y las condiciones de inyección y agitación la transferencia de ozono difiere; así que la demanda de ozono se determina con mayor precisión si se controla la dosis de ozono transferida real.

Sin embargo la determinación de la demanda utilizando la DOA es fácil de llevar a cabo y utilizando la experiencia de ingenieros de diseño, la información obtenida es útil para revisar variaciones en la demanda de ozono y para calcular los requerimientos del sistema de ozonación.

Ha habido progreso en la metodología para determinar la demanda de ozono, a continuación se mencionaran tres de los más utilizados:

2.3.4.1. Prueba de gas-ozono (GOT por sus siglas en inglés) o “Ozotest” propuesta por Roche et al (1994):

En esta prueba el ozono se inyecta en una muestra de un litro a través de una pared con una jeringa de vidrio seguido de un periodo de agitación. Posteriormente, se agrega nitrógeno bajo presión para remover el ozono no transferido al agua. Con esto se puede establecer un balance de materia y la demanda de ozono se puede calcular a partir de la DOT.

2.3.4.2. Prueba de ozono en solución (SOT por sus siglas en inglés) propuesta por Hoigné y Bader:

En esta prueba la cantidad total inicial de ozono se mezcla instantáneamente con el agua en un recipiente de reacción. El decaimiento de ozono depende de varios factores, como la composición química, la concentración inicial de ozono, la temperatura, el pH, entre otros, y puede apreciarse a través del tiempo utilizando el método del índigo o el de absorción de luz UV. En ésta prueba se pueden diferenciar dos fases como se muestra en la figura 2.10:

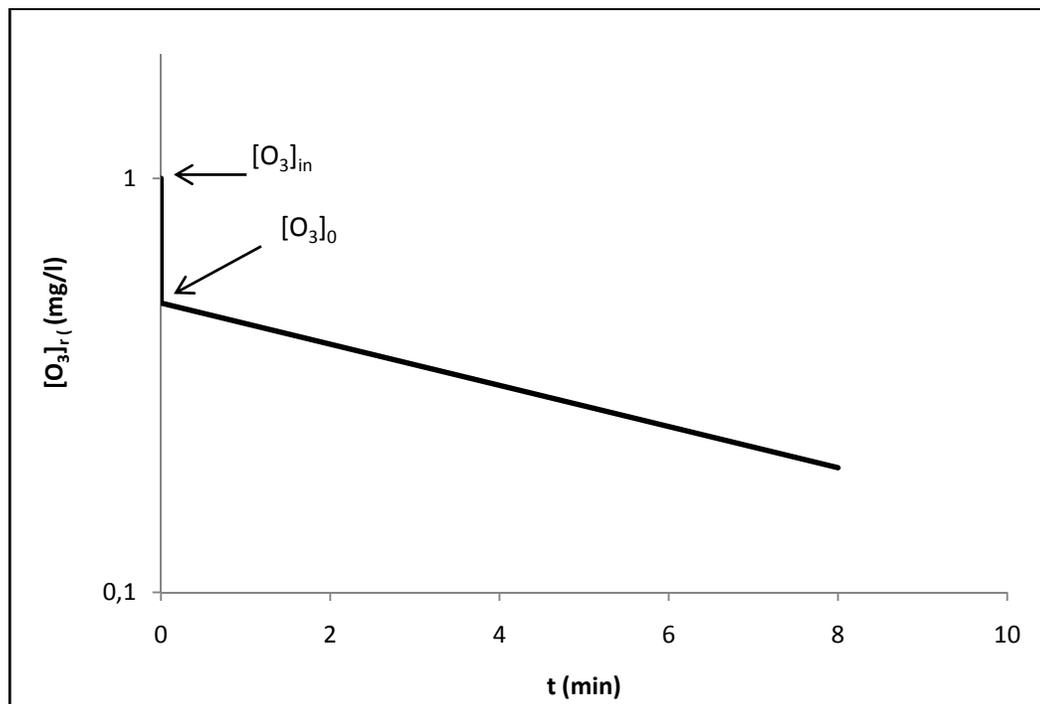
- La primera ocurre en los primeros segundos (0-20s) y es donde el ozono se involucra en reacciones rápidas como: las reacciones directas de ozono molecular con algunas

estructuras de matriz orgánica como polifenoles, la transformación de ozono en radical hidroxilo en presencia de promotores naturales, entre otras.

La demanda de ozono instantánea (X) corresponde a la diferencia entre la dosis de ozono introducida $[O_3]_{in}$ y el valor medido de residual $[O_3]_{r,0}$ varios segundos después de introducir el ozono ($X = [O_3]_{in} - [O_3]_{r,0}$).

- En la siguiente fase la concentración de ozono decrece de una manera más lenta debido a que en ésta se llevan a cabo reacciones moderadas o lentas. El decaimiento en esta fase puede expresarse como una reacción de pseudo-primer orden $C = [O_3]_{r,0} e^{-kt}$, caracterizada por la constante cinética (k) o el tiempo de vida media ($t_{1/2} = 0.69/k$)

Figura 2.10 Gráfica típica de decaimiento de ozono (semi-log)



Fuente: OZONE DEMAND OF WATERS, Jean-Pierre DUGUET

2.3.4.3. Método de flujo continuo por Roustan:

En este método se utiliza una columna de reacción en la que las dos fases (líquido y gas) se encuentran en flujo continuo, la columna mide 0.15 m de diámetro y 1 m de altura, el tiempo de retención hidráulico (τ) varía entre 5 y 30 minutos, y el ozono se dispersa en burbujas por un plato poroso en el fondo de la columna. Las concentraciones de ozono de entrada y salida en fase gas ($[O_3]_{ge}$, $[O_3]_{gs}$) y de la fase líquida ($[O_3]_{le}$, $[O_3]_{ls}$) se calculan utilizando métodos clásicos.

Con la hipótesis de que la fase líquida está perfectamente mezclada y que el ozono reacciona muy rápido (demanda instantánea, X), seguida de una lenta reacción de primer orden, el balance de masa puede explicarse de la siguiente forma:

Fase líquida: entrada + transferido = salida + consumido

Entrada: $Q_L [O_3]_{le}$, generalmente $[O_3]_{le}=0$

Salida: $Q_L [O_3]_r$

Cantidad de ozono transferido de la fase gas: $Q_G ([O_3]_{ge} - [O_3]_{go}) = T$

Consumo de ozono: $XQ_L + kC_R V_L$ (V_L : Volumen del líquido)

Ecuación de balance de masa:

$$(1) \quad T = Q_L [O_3]_r + XQ_L + k[O_3]_r V_L$$

$$(1a) \quad T/Q_L = [O_3]_r + k\tau [O_3]_r + X \quad (\tau = V/Q_L)$$

$$(2) \quad T/Q_L = [O_3]_r (1 + k\tau) + X$$

T/Q_L es la dosis de ozono transferida (DOT), que es igual a la dosis de ozono aplicada (DOA) multiplicada por la eficiencia de transferencia de ozono (E).

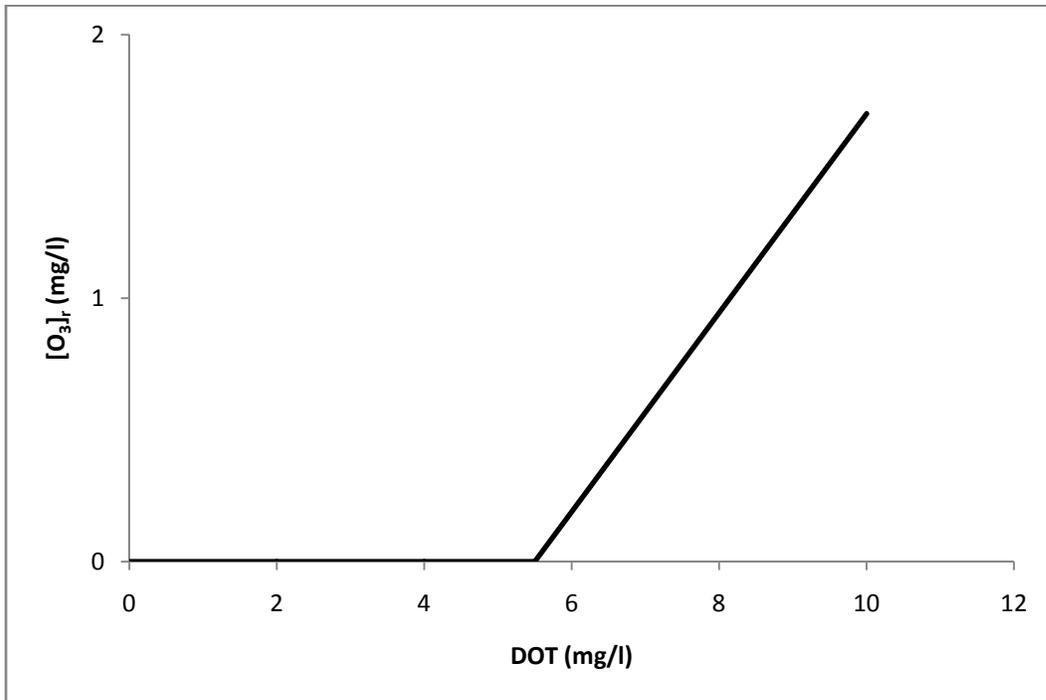
La ecuación (2) se convierte en:

$$(3) \quad DOT = C_R (1 + k\tau) + X$$

$$(4) \quad C_R = \frac{DOA}{1+k\tau} - \frac{X}{1+k\tau}$$

La ecuación (4) representa la relación entre la concentración de ozono residual y la dosis de ozono transferida (DOT), como se ejemplifica en la figura 2.

Figura 2.11 Concentración de ozono residual contra dosis de ozono transferida



Fuente: OZONE DEMAND OF WATERS, Jean-Pierre DUGUET

El punto donde intercepta la recta al eje de las equis define la demanda de ozono inmediata y la pendiente permite calcular el producto $k\tau$, también conocido como el número Damköhler (Da) y la constante cinética (k). Si la demanda instantánea es cero, la ecuación de la línea recta es:

$$C_R = \frac{TOD}{1+k\tau} \quad \text{pendiente} = \frac{1}{1+k\tau}$$

2.4 DIMENSIONAMIENTO DE UNA CÁMARA DE CONTACTO DE BURBUJA FINA

La metodología propuesta para el dimensionamiento de la cámara de contacto busca incorporar los resultados obtenidos de manera experimental mediante las pruebas de vida media del ozono en el agua, el residual a los 60 segundos de reacción, las pruebas de demanda de ozono, así como correlaciones experimentales relevantes obtenidas a partir de las pruebas de transferencia de masa.

Para el dimensionamiento de una cámara de contacto es necesario partir de criterios de diseño que determinan las características operativas de la cámara de contacto. Los principales criterios de diseño son los siguientes:

- Eficiencia de transferencia de masa: se refiere a la cantidad de ozono que se transfiere al agua, para cámaras de contacto de burbuja ascendente se reportan eficiencias entre 80% y 95%
- Relación G/L: se refiere a la proporción de gas que entra en contacto con el agua con respecto al flujo de agua a la entrada, comúnmente se reportan valores entre 0.05 y 0.20, es importante que la relación G/L no sea demasiado alta ya que puede provocar una eficiencia de transferencia de masa menor
- Temperatura del agua: cuando se efectúa el dimensionamiento de una cámara de contacto es necesario tomar en cuenta la temperatura del agua ya que la constante de desinfección de los microorganismos se ve afectada por la temperatura
- Elección del número de etapas: el número de etapas de una cámara de contacto es de suma importancia para cumplir con las condiciones de mezclado y el tiempo de retención hidráulica necesarios para poder asegurar una desinfección óptima del agua a tratar

Una vez que se han determinado los criterios operativos de la cámara de contacto, es necesario establecer los criterios de desinfección. Para la elección de los mismos, existen diferentes estándares de calidad internacional para la operación de sistemas de ozonación. La USEPA establece que para agua de consumo humano se deben de alcanzar remociones de 3-log y 4-log

para *Giardia* y virus respectivamente. Además, es necesario alcanzar para *Cryptosporidium* una desactivación 2-log en los casos en los que se encuentra una concentración mayor a 1.0 quistes/L o una desactivación 1-log para sistemas con una concentración menor a ésta. Cabe mencionar que los sistemas de tratamiento previos a la (s) etapas de desinfección pueden alcanzar una remoción log de tal manera que la remoción requerida por los sistemas de desinfección sea menor a la establecida por la USEPA. Los estándares de la Unión Europea establecen que es necesario mantener una concentración residual de ozono de 0.4 mg/l a lo largo de un tiempo de contacto de 4 minutos para asegurar una desinfección adecuada del agua.

2.4.1. Metodología para el dimensionamiento de la cámara de contacto de burbuja fina

Paso 1: Seleccionar un tiempo de retención hidráulica de acuerdo a las condiciones de flujo del agua a tratar

Paso 2: Seleccionar una relación de flujo gas-líquido, que significa el gasto de ozono que entrara en contacto con el agua a tratar. De acuerdo a la literatura los valores de G/L deben tener un valor entre 0.05 y 0.20

Paso 3: Seleccionar el número de etapas de la cámara de contacto. Comúnmente se construyen cámaras de contacto entre 4 y 12 etapas, dentro de las cuales pueden existir una o más etapas en las que se adiciona ozono a co-corriente o contracorriente. Es importante mencionar que para flujos pequeños puede ser suficiente una cámara de menos de cuatro etapas.

Paso 4: Seleccionar una concentración de ozono a la entrada de la etapa de adición de ozono y mediante la relación G/L y la eficiencia de transferencia de masa esperada calcular la dosis de ozono transferida.

Paso 5: Calcular la concentración de ozono residual estimada utilizando los resultados de las pruebas experimentales. La USEPA recomienda no calcular la desactivación logarítmica para *Giardia*, *Cryptosporidium* y virus a la salida de la primera etapa. La concentración a la salida de la etapa de disolución se obtiene utilizando las dos ecuaciones siguientes y sacando un promedio:

- a) Utilizando el tiempo de vida media y el residual a los 60 segundos de ozono en el agua:

$$[O_3]_r = \frac{[O_3]_{r=60s}}{[1 - k^*(\tau - 1)]}$$

En donde:

$[O_3]_r$: concentración de ozono residual a la salida de la etapa de ozonación (mg/l)

$[O_3]_{r=60s}$: concentración de ozono residual a los 60 segundos de reacción obtenidos de manera experimental (mg/l)

k^* : constante de pseudo primer orden de descomposición de ozono (min^{-1})

τ : tiempo de retención hidráulica de la etapa (min)

b) Utilizando una correlación multivariable de la siguiente forma:

$$[O_3]_r = a_1 \text{DOT} + a_2 \tau + a_3 \text{G/L} + b$$

En donde:

$[O_3]_r$: concentración de ozono residual a la salida de la etapa de ozonación (mg/l)

DOT : dosis de ozono transferida al agua

τ : tiempo de retención hidráulica de la etapa de disolución (min)

G/L : relación gas-liquido de la cámara de contacto

Paso 6: Calcular la concentración de ozono residual a la salida de la etapa 2 mediante la siguiente ecuación:

$$[O_3]_x = [O_3]_{x-1} e^{(k^* \tau_x)}$$

En donde:

$[O_3]_x$: concentración de ozono residual a la salida de la etapa x (mg/l)

$[O_3]_{x-1}$: concentración de ozono residual a la salida de la etapa x-1, es decir la etapa precedente (mg/l)

τ : tiempo de retención hidráulica de la etapa x (min)

k^* : constante de descomposición de ozono para la etapa

Paso 7: Calcular la desactivación logarítmica de *Cryptosporidium*, *Giardia* y Virus para la etapa utilizando los valores de concentración residual y el tiempo de retención hidráulica. Las ecuaciones para calcular la desactivación se encuentran descritas en la sección 2.1.3 de este documento.

Paso 8: Calcular la concentración de ozono residual y la desactivación logarítmica de las etapas subsecuentes utilizando la metodología propuesta en los pasos 6 y 7

Paso 9: Utilizar la función Solver de Excel para encontrar la concentración de ozono utilizada para alcanzar los objetivos de desinfección propuestos.

Paso 10: Calcular las dimensiones de la cámara de contacto utilizando las siguientes ecuaciones:

- a) Altura (H): se establece de acuerdo al criterio de diseño elegido
- b) Ancho: se calcula mediante la siguiente ecuación

$$A = \left[\frac{\tau Q}{H \frac{L}{A}} \right]^{1/2}$$

En donde:

A = ancho de la cámara de contacto (m)

Q = flujo volumétrico del agua (m³/min)

τ = tiempo de retención hidráulica de la etapa (min)

H = altura de la etapa (m)

L/A = relación longitud-altura establecida para el contactor

- c) Longitud: la longitud se despeja a partir de la relación L/A y el valor del ancho de la etapa

2.4.2. Monitoreo de la desinfección en un sistema con ozono

De acuerdo a la USEPA (incluido en el documento *Long-Term 2 Enhanced Surface Water Treatment Rule*), existen 3 metodologías para monitorear la desinfección en un proceso de ozonación:

Las metodologías son las siguientes:

T_{10} – se utiliza para calcular el CT a través de un contactor con condiciones de flujo similares a un reactor de flujo en pistón. T_{10} se refiere al tiempo que se tarda en recorrer el 90% del agua que entra al contactor. Incluso en contactores con el número de baffles adecuado, el T_{10} es normalmente menor al 65% del tiempo de retención hidráulica y por lo tanto esta metodología subestima el verdadero CT obtenido. Esta metodología es la más recomendable cuando se cuentan con estudios de trazado de los fluidos a través del contactor en cuestión, es decir, cuando se cuenta con un análisis específico de las condiciones hidrodinámicas de la cámara de contacto.

CSTR – se utiliza para calcular la desactivación logarítmica utilizando el tiempo de retención hidráulica. La USEPA recomienda utilizar esta metodología cuando no se cuenta con estudios de trazado para los contactores en cuestión.

CSTR-modificado – es una combinación del método CSTR con un análisis de flujo segmentado (SFA por sus siglas en inglés). Se utiliza para calcular la desactivación logarítmica incorporando el tiempo de retención hidráulica del agua y la constante de decaimiento del ozono en el agua. Esta metodología no se aplica en las cámaras en las que se aplica el ozono.

La selección del método para llevar a cabo el cálculo de la desinfección a lo largo del contactor depende primordialmente de la configuración del mismo y de que tan rigurosos se desean que sean los procesos de evaluación de la aplicación en cuestión. En general el CSTR modificado es el más complejo ya que se requieren por lo menos 3 puntos de medición dentro del contactor para el desarrollo de un perfil de concentraciones a lo largo del mismo. En general, el método más

comúnmente utilizado es el T_{10} , pero este únicamente puede ser utilizado si se cuenta con estudios de trazado.

La siguiente tabla presenta las recomendaciones para el uso de cada método de cálculo:

Tabla 2.4: Recomendaciones para cada método de cálculo en el contactor

	Sección del contactor	Terminología	Método para calcular la desactivación logarítmica	Restricciones
	Etapas con adición de ozono			
Sin datos de trazado	Primera etapa	Primera etapa de disolución	No se recomienda calcular el CT	Ninguna
	Otras etapas	Etapas de adición de ozono a co-corriente o contracorriente	Se recomienda el método de CSTR para calcular la desactivación logarítmica a partir de la concentración a la salida de la etapa	No se asigna una desactivación logarítmica a no ser que se genere una concentración residual detectable en una cámara previa
	Etapas de reacción			
	3 o más etapas de reacción consecutivas	Zona de CSTR modificado	Se utiliza el CSTR-modificado para cada una de las cámaras en esta sección	Debe haber una concentración de ozono residual detectable en por lo menos 3 cámaras consecutivas. De no ser así, se debe utilizar el método CSTR
< 3 etapas de reacción consecutivas	Etapas de reacción CSTR	Se recomienda el método de CSTR para calcular la desactivación logarítmica a partir de la concentración a la salida de la etapa	Ninguna	
	Etapas con adición de ozono			
Con datos de trazado	Primera etapa	Primera etapa de disolución	No se recomienda calcular el CT	Ninguna
	Otras etapas	Etapas de adición de ozono a co-corriente o contracorriente	Se recomienda utilizar el método T_{10} o el CSTR para cada cámara	No se asigna una desactivación logarítmica a no ser que se genere una concentración residual detectable en una cámara previa
	Etapas de reacción			

3 o más etapas de reacción consecutivas	Zona de CSTR-modificado	CSTR-modificado para cada una de las etapas	Debe haber una concentración de ozono residual detectable en por lo menos 3 cámaras consecutivas. De no ser así, se debe utilizar el método CSTR o el T_{10}
< 3 etapas de reacción consecutivas	Etapas de reacción CSTR o T_{10}	T_{10} o CSTR para cada una de las etapas	Ninguna

En el anexo de este documento se presenta un apartado con la metodología de cálculo y medición para monitorear un sistema de ozonación utilizando la metodología CSTR-modificado

2.5 TRANSFERENCIA DE MASA DEL OZONO EN AGUA

El ozono generado mediante una corona de descarga requiere grandes cantidades de energía eléctrica. La eficiencia con la cual se transfiere al agua para cumplir con sus propósitos de tratamiento es clave para asegurar un consumo mínimo de energía eléctrica. Durante el proceso de ozonación de agua, el ozono es transferido a la fase líquida (el agua a tratar) desde la fase gaseosa, por lo tanto, se puede decir que la ozonación es un proceso de absorción.

2.5.1. Teoría de la transferencia de masa

Cuando una sustancia se transfiere de una fase a otra a través de una interfase, las resistencias a la transferencia de masa provocan un gradiente de concentración en cada una de las fases

Lewis y Whitman (1924) propusieron que la resistencia a la transferencia de masa a través de una interfase es la suma de las resistencias en cada fase. A este concepto lo denominaron la teoría de las dos resistencias

2.5.2. Transferencia de masa en una sola fase

La resistencia a la transferencia de masa se compone de 2 partes: la resistencia difusiva en la capa laminar y la resistencia en el seno del fluido. La ley de difusión de Fick supone que la resistencia a la transferencia de masa en el seno del fluido es despreciable. Esta ley sienta las bases para las diferentes teorías propuestas para describir la transferencia de masa de la capa laminar a la interfase.

Las diferentes teorías sobre transferencia de masa en una sola fase convergen en la propuesta de que el coeficiente de transferencia de masa es proporcional al coeficiente de difusión molecular D elevado a una potencia n , la cual varía de acuerdo a la turbulencia del sistema (Nernst, 1904; Lewis and Whitman, 1924):

$$k \propto D^n$$

En donde:

k : coeficiente laminar de transferencia de masa

D : coeficiente de difusión molecular

n : 0.5 – 1.0 dependiendo de la turbulencia del sistema (Dobbins, 1956)

El flux de transferencia de masa N de una fase es el producto del coeficiente laminar y el gradiente de concentraciones en la capa laminar y es igual al flux en la segunda fase:

$$N = k_G(C_G - C_{Gi}) = k_L(C_L - C_{Li})$$

Las concentraciones de la sustancia que se difunda en las dos fases inmediatamente adyacentes a la interfase C_{Li} , C_{Gi} generalmente son diferentes, pero están relacionadas entre sí mediante las leyes de equilibrio termodinámico (v. gr., la ley de Henry, ver siguientes secciones)

Para calcular la velocidad específica de transferencia de masa al líquido se requiere conocer el coeficiente volumétrico de transferencia de masa $k_L a$ el cual está compuesto por el coeficiente laminar de transferencia de masa y del área interfacial específica:

$$m = k_L a (C_{Li} - C_L)$$

m : velocidad específica de transferencia de masa

a : A/V_L = área interfacial volumétrica

V_L : volumen del líquido

La medición del área interfacial específica resulta difícil debido a que la dispersión del ozono en el agua se presenta en forma de burbujas, las cuales varían en tamaño de acuerdo a las condiciones de flujo establecidas en el dispositivo de contacto. Es por esto que el área superficial y el coeficiente laminar de transferencia de masa se agrupan y forman el coeficiente volumétrico de transferencia de masa $k_L a$.

2.5.3. Concentración del gas al equilibrio

La ley de Henry se puede utilizar para describir la distribución al equilibrio entre la fase gas y la fase líquida mediante una relación lineal que se puede expresar de la siguiente manera:

$$H_C = \frac{C_G - C_{Gi}}{C_L^* - C_{Li}} = \frac{C_{Gi} - C_G}{C_{Li} - C_L}$$

H_C = constante de Henry (adimensional)

Si la función pasa por el origen la ecuación queda de la siguiente manera:

$$H_C = \frac{C_{Gi}}{C_{Li}} = \frac{C_G^*}{C_L} = \frac{C_G}{C_L^*}$$

Mediante esta relación las concentraciones al equilibrio se pueden calcular con H_C y las concentraciones del ozono en el gas y el líquido.

Experimentalmente, la constante de Henry se puede conocer mediante el inverso de la solubilidad del ozono, la cual cambia en función de la temperatura:

$$H_C = \frac{1}{S}$$

2.5.4. Teoría de la doble capa

La teoría de la doble capa, establece que la resistencia total a la transferencia de masa de un sistema es igual a la suma de las resistencias en cada fase. La teoría supone la existencia de dos láminas hipotéticas en la interfase entre los dos fluidos.

$$R_T = R_L + R_G = \frac{1}{K_L a} = \frac{1}{k_L a} + \frac{1}{H_C k_G a}$$

Si se acomoda la ecuación anterior se puede obtener la siguiente relación:

$$K_L a = \frac{k_L a}{1 + \frac{k_L a}{k_G a H_C}} = k_L a \frac{R_L}{R_T}$$

Debido a que el ozono es ligeramente soluble en el agua, la transferencia de masa esta controlada por la fase líquida, de tal manera que $\frac{R_L}{R_T} \approx 1$ y por lo tanto $K_L a \approx k_L a$.

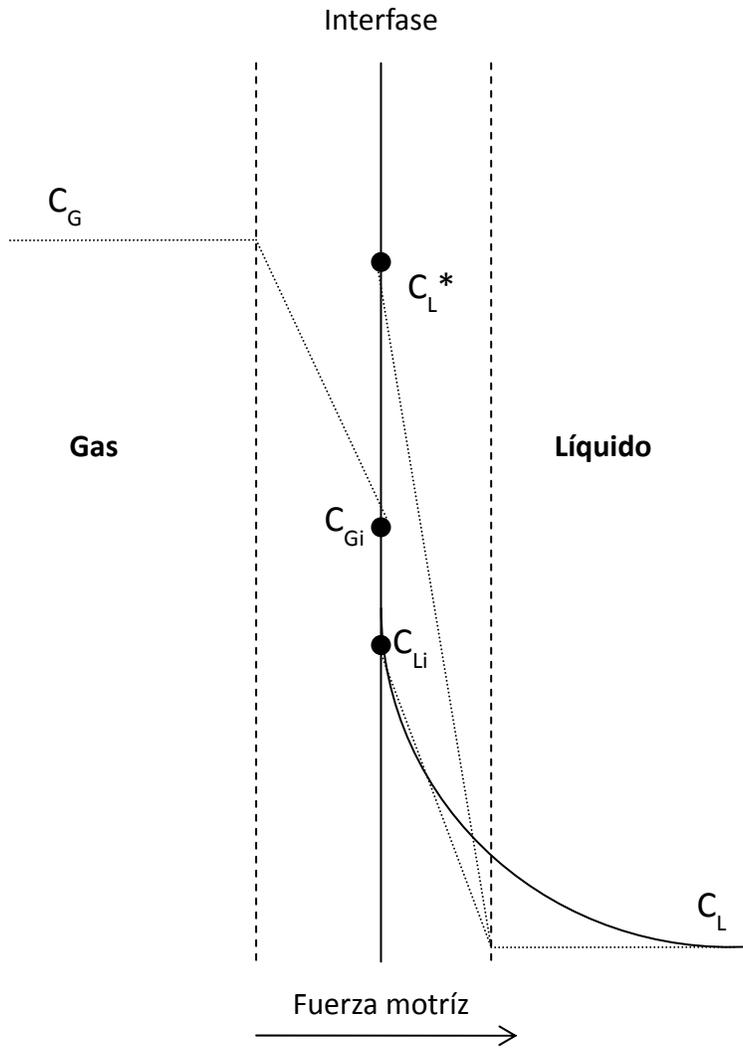
Esta relación permite que la ecuación de difusión equimolar se pueda escribir de la siguiente manera:

$$N_A = k_L a (C_L^* - C_L) V_L$$

Esta ecuación representa la estimación de la velocidad de transferencia para el diseño de cualquier tipo de intercambiador de masa. Para aplicar esta ecuación en la práctica es necesario conocer los siguientes parámetros:

- $k_L a$: el coeficiente volumétrico de transferencia de masa depende de las condiciones hidrodinámicas de la fase líquida en la cámara de contacto
- C_L : el perfil de concentraciones en la fase líquida en el contactor, este depende de las condiciones de mezclado del mismo
- C_L^* : concentración al equilibrio en la fase líquida

Figura 2.12 Modelo de la doble capa o doble resistencia con gradiente de concentración lineal (Lewis and Whitman, 1924)



2.5.5. Determinación experimental del $k_L a$ y de la concentración del ozono a la salida de la columna de difusión

El cálculo experimental del $k_L a$ se puede aproximar conociendo el valor medio logarítmico de la concentración al equilibrio entre la salida y la entrada de la columna de difusión:

$$(C^* - C_L)_{ML} = \frac{(C^* - C_L)_s - (C^* - C_L)_e}{\ln \frac{(C^* - C_L)_s}{(C^* - C_L)_e}}$$

Entonces,

$$Q_G (C_{Gi} - C_{Go}) = (K_L a) (V_L) \frac{(C^* - C_L)_s - (C^* - C_L)_e}{\ln \frac{(C^* - C_L)_s}{(C^* - C_L)_e}}$$

La concentración al equilibrio se puede conocer a partir de la presión parcial del gas, la presión total del sistema y la constante de Henry a las condiciones experimentales:

$$C^* = \frac{P_{O_3}}{H} 10^6 \frac{M_{O_3}}{M_{H_2O}}$$

En donde:

$$P_{O_3} = \frac{\text{Moles de } O_3}{\text{Moles totales}} P$$

En donde P es la presión total del sistema.

2.6 ESTIMACIÓN DE COSTOS DE LOS SISTEMAS DE OZONACIÓN

Antes de examinar los costo, es necesario tomar en cuenta la optimización del uso de ozono en un sistema de ozonación y el mantenimiento del mismo; por cada gramo de ozono producido, se debe obtener la mejor calidad de agua posible al menor costo. Esto implica que el diseño de la cámara de contacto debe propiciar que se utilice la mínima cantidad de ozono para lograr el objetivo deseado.

Obtener estimados de los costos de capital y de operación requeridos para un sistema de ozonación es una acción clave para el desarrollo del mismo. Los costos de capital son los más difíciles de estimar, ya que existen muchos variables que los afectan; como el nivel de instrumentación y automatización, los costos locales de construcción, la cantidad de tubería de acero inoxidable, entre otros.

Se pueden obtener aproximaciones a partir de datos teóricos reportados en la literatura como a continuación se describe.

Las figuras que presentan los estimados de costos de capital y operación, se obtuvieron de *Ozone in Water Treatment: Application and Engineering* (Langlais et al., 1991) y se han considerado actualmente aplicables para dicho fin.

Los costos estimados de operación son generalmente más acertados que los de capital, debido a que los costos de energía (\$/kWh) pueden obtenerse específicamente para el sitio donde van a aplicarse. También puede estimarse que la energía consumida por los equipos excluyendo al generador significa una contribución menor (+5% a +10%) a la demanda total de energía del sistema.

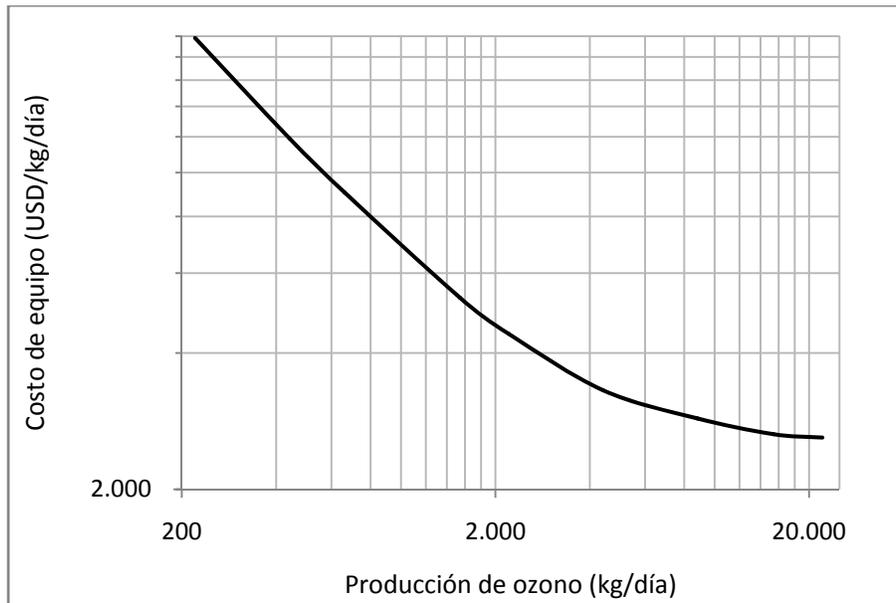
Los costos de capital estimados pueden obtenerse recabando la información del formato de la Tabla 2.5, la cual puede ser usada en dos formas. La primera es utilizarla como apoyo para un estimado de costo desarrollado independientemente, en el que se consideren los aspectos citados en el formato; la segunda es usando el formato junto con las figuras 2.13 y 2.14, como se explica a continuación.

Tabla 2.5 Formato sin datos del orden de magnitud de los costos de capital

Nombre de la planta:		_____	
1. Diseño	Flujo de agua	_____	mgd
	Dosis de ozono	_____	mg/L
	Producción de ozono	_____	lb/día
	Capacidad de generación instalada	_____	lb/día
2. Costo de la unidad de ozonación		_____	US\$/lb/día
3. Costo pronosticado del equipo			US\$ _____
4. Tiempo de retención hidráulico del contactor		_____	min
5. Costo pronosticado del contactor			US\$ _____
6. Área de construcción estimada		_____	ft ² /lb/día
7. Área de construcción calculada		_____	ft ² /lb/día
8. Costo de construcción estimado		_____	ft ² /lb/día
9. Costo pronosticado de construcción			US\$ _____
10. Costo total estimado del sistema de ozonación			US\$ _____

Fuente: Langlais et al., 1991

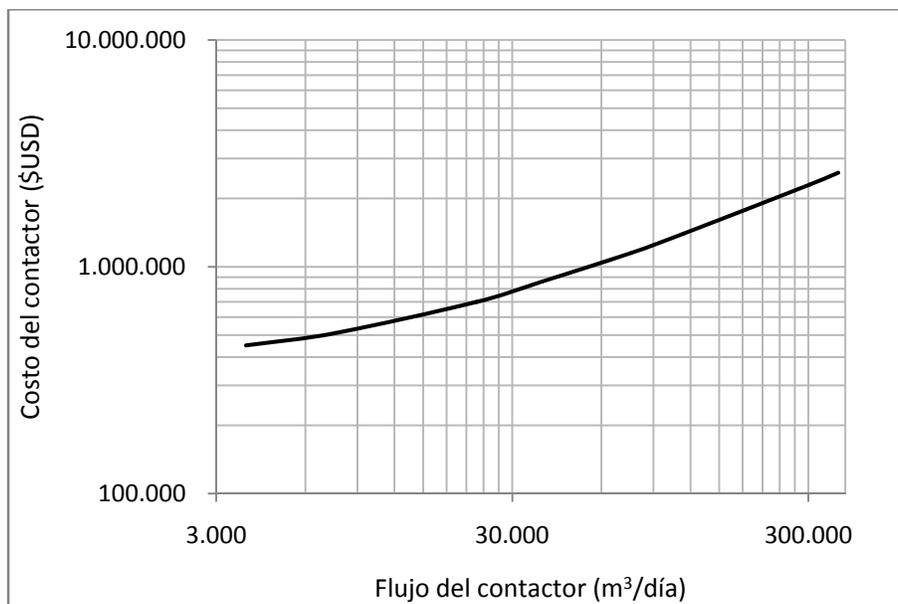
Figura 2.13 Orden de magnitud de los costos de sistemas de ozonación basados capacidad de generación instalada



Fuente: Langlais et al., 1991

Por ejemplo, para una planta de 113,562 m³/día con una dosis de ozono de 3 mg/L, una producción de ozono de 340 kg/día y una capacidad de generación total estimada de 454 lb/d; se puede estimar con el apoyo de la figura tabla 2.5 (utilizando la capacidad de generación total estimada) que el costo de equipamiento, incluyendo la instalación, es de 4,409 US\$/kg/día, lo cual da un costo total de equipo instalado de US\$ 2,000,000.

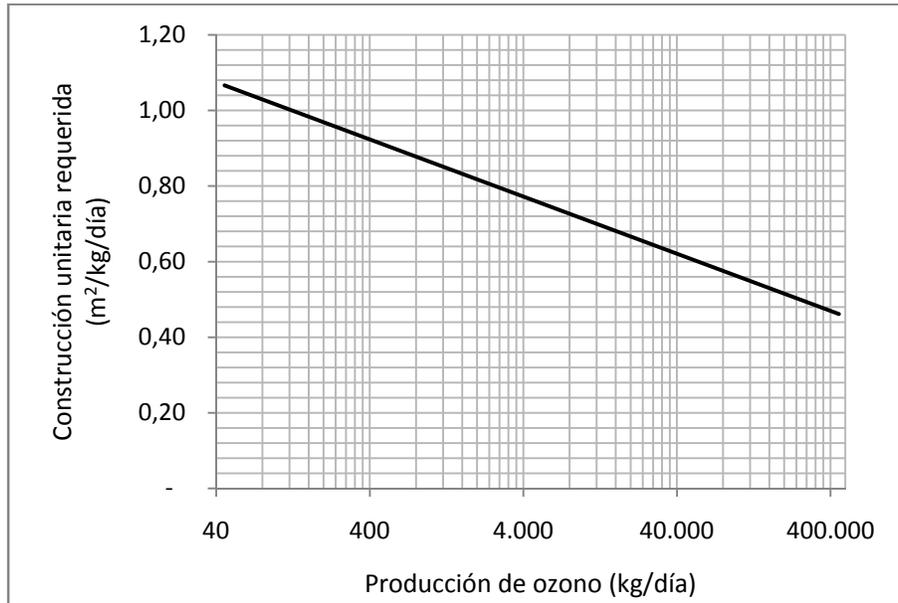
Figura 2.14 Orden de magnitud de los costos de contactores de ozono (asumiendo 10 minutos de tiempo de residencia)



Fuente: Langlais et al., 1991

Se proyecta que el tiempo de retención en el reactor sea de 10 minutos, por lo que con la figura 2.14 puede calcularse el costo del mismo. Ésta gráfica fue desarrollada asumiendo que se instalarían dos contactores de la misma capacidad, por lo tanto para leer el costo equivalente en ella es necesario utilizar el flujo de sólo uno de ellos, es decir 56,781 m³/día, lo cual es el 50% del flujo total (113,562 m³/día). Tomando esto en consideración el costo del contactor proyectado es de US\$ 1,000,000. Cabe aclarar que los costos crecen si en tiempo de retención aumenta y viceversa; es decir, si el tiempo de retención se aumentara a 20 minutos, el costo podría elevarse en un 50% y si éste se redujera a 5 minutos el costo podría reducirse en un 25%.

Figura 2.15 Área de construcción requerida para los equipos del sistema de ozonación



Fuente: Langlais et al., 1991

Conociendo que la capacidad de generación total estimada es de 454 kg/día, podemos observar en la tabla 2.6 que el área de construcción requerida es de 0.73 m²/kg/día, utilizando la figura 2.15 para llevar a cabo la estimación; lo cual nos da un área total de 327 m². Asumiendo que el precio de construcción es de 1,612 USD/m², el costo total de construcción del sistema sería de US\$ 540,000.

Tabla 2.6 Formato con datos del orden de magnitud de los costos de capital

Nombre de la planta:			
1. Diseño	Flujo de agua	<u>113,562</u>	m ³ /día
	Dosis de ozono	<u>3</u>	mg/L
	Producción de ozono	<u>340</u>	kg/día
	Capacidad de generación instalada	<u>454</u>	kg/día
2.	Costo de la unidad de ozonación	<u>4,409</u>	US\$/kg/día
3.	Costo pronosticado del equipo		US\$ <u>2,000,000</u>
4.	Tiempo de retención hidráulico del contactor	<u>10</u>	min
5.	Costo pronosticado del contactor		US\$ <u>1,000,000</u>
6.	Área de construcción estimada	<u>0.72</u>	m ² /kg/día
7.	Área de construcción calculada	<u>327</u>	m ²
8.	Costo de construcción estimado	<u>1,612</u>	\$USD/ft ²
9.	Costo pronosticado de construcción		US\$ <u>540,000</u>
10.	Costo total estimado del sistema de ozonación		US\$ <u>3,540,000</u>

Fuente: Langlais et al., 1991

En la tabla 2.6 se puede observar el formato de costos de capital completado y que el costo total estimado del sistema de ozono es de US\$ 3,540,000, para este ejemplo; en el que se toman en cuenta los costos de los equipos para ozonación, el contactor y la construcción, sin embargo se excluyen otros como el trabajo de campo, servicios de administración de construcción, diseño y servicios legales, entre otros.

Tabla 2.7 Formato sin datos del orden de magnitud de los costos de operación

Nombre de la planta:			_____
1. Producción de ozono			
Flujo anual promedio	_____	m ³ /día	
Dosis anual promedio	_____	mg/L	
Producción anual promedio	_____	kg/día	
2. Energía específica estimada requerida por el sistema	_____	kWh/kg	
3. Promedio de energía consumida por día	_____	kWh/día	
4. Costo estimado de energía	_____	US\$/kWh	
5. Costo promedio de energía por día	_____	US\$/día	
6. Costo promedio anual de energía			_____ US\$/año
7. Porcentaje estimado del costo de solo la energía	_____ %		
8. Estimado de "otros" costos de operación y mantenimiento			_____ US\$/año
9. Costo total estimado de operación y mantenimiento			_____ US\$/año
10. Costo total estimado del sistema de ozonación			

Fuente: Langlais et al., 1991

Como en los costos de capital, los costos de operación estimados pueden obtenerse completando un formato, en este caso la tabla 2.7. Por ejemplo, se supone una planta de 75,708 m³/día con una dosis de ozono de 2.5 mg/L y una producción anual promedio de 189 kg/día. Teniendo la producción anual se selecciona una cantidad específica de energía requerida por el sistema de ozonación; normalmente un sistema de tratamiento a baja presión, requiere entre 22 y 26 kWh/kg y para este caso se han seleccionado 25 kWh/kg. Utilizando esta cantidad de energía y la producción anual promedio obtenemos que el consumo de energía promedio es de 4795 kWh/día.

Suponiendo que el costo de la energía es de US\$ 0.06/kWh podemos calcular que se gastarán en ella US\$ 287.7 diarios, lo cual da un total de US\$ 105,010 al año (operando 365 días). En estos sistemas generalmente los costos de energía ocupan de un 65 a 80% de los costos totales anuales de operación y mantenimiento; siendo 75% la cantidad más común, por lo que ésta será la utilizada para el cálculo total de los costos.

Conociendo el costo de energía anual y tomando en cuenta que constituye el 75% del costo total, podemos calcular que se gastarán US\$ 140,000 al año en el mantenimiento y la operación del sistema de ozonación, lo cual se desglosa en el formato de la Tabla 2.8.

Tabla 2.8 Formato con datos del orden de magnitud de los costos de operación

Nombre de la planta:		
1. Producción de ozono		
Flujo anual promedio	<u>75,708</u>	m ³ /día
Dosis anual promedio	<u>2.5</u>	mg/L
Producción anual promedio	<u>189</u>	kg/día
2. Energía específica estimada requerida por el sistema		
	<u>25.6</u>	kWh/lb
3. Promedio de energía consumida por día		
	<u>4795</u>	kWh/día
4. Costo estimado de energía		
	<u>0.06</u>	US\$/kWh
5. Costo promedio de energía por día		
	<u>287.7</u>	US\$/día
6. Costo promedio anual de energía		
		<u>105,010</u> US\$/año
7. Porcentaje estimado del costo de solo la energía		
	<u>75</u>	%
8. Estimado de "otros" costos de operación y mantenimiento		
		<u>35,000</u> US\$/año
9. Costo total estimado de operación y mantenimiento		
		<u>140,010</u> US\$/año
10. Costo total estimado del sistema de ozonación		

Fuente: Langlais et al., 1991

2.7 OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO DE REDES DE DISTRIBUCIÓN DE AGUA POTABLE

El sistema de distribución de agua se refiere al conjunto de tuberías, tanques de almacenamiento, bombas, y válvulas que se encuentran entre la planta de potabilización y las tomas de agua para consumo humano. El agua sufre cambios a lo largo de su recorrido por el sistema de distribución debido a fluctuaciones de pH, temperatura, cambios en la concentración residual del desinfectante, y contaminación por microorganismos; estos factores pueden traer como consecuencias enfermedades entéricas y/o sabores y color desagradables en el agua. Para asegurar la desinfección del agua de las redes de distribución es necesario aplicar una concentración de desinfectante tal que se mantenga un residual adecuado en dichas redes, y con esto se asegure la inocuidad del agua para el usuario. Existen muchas complicaciones que pueden alterar la desinfección en redes de distribución a pesar del mantenimiento y de una concentración residual de desinfectante secundario, algunas de estas complicaciones se describen a continuación.

2.6.1 Crecimiento microbiológico

El crecimiento microbiano en las redes de distribución se refiere al incremento en la cantidad de microorganismos presentes ya sea de manera suspendida o formando una biopelícula en las paredes de las tuberías. La biopelícula está constituida por un conjunto de microorganismos diversos y sus productos metabólicos, residuos orgánicos, depósitos e incrustaciones minerales. Se desarrolla como resultado de una acumulación de nutrientes y microorganismos en una interfase los cuales pasan por una etapa de crecimiento metabólico, formación de productos y desprendimiento de dicha interfase. La velocidad de formación se debe a las características termodinámicas y químicas de la interfase, la rugosidad de la superficie y las características fisiológicas de los microorganismos adheridos. La formación de biopelículas en las redes de distribución disminuye la eficiencia del desinfectante secundario ya que es más difícil que este penetre las diferentes capas presentes en la misma, es por esto es que a pesar de usar fuertes dosis de desinfectante se puede presentar contaminación por microorganismos en las tomas de agua para consumo humano.

Los coliformes fecales (son indicadores de contaminación microbiológica que se encuentran especificados en la normatividad mexicana NOM 127 SSA), son un grupo de microorganismos sensibles a dosis muy pequeñas de desinfectante comparados con otros patógenos, su presencia en las redes de distribución se atribuye a un mal mantenimiento de las mismas y/o a una dosis de desinfectante secundario inadecuada.

2.6.2 Factores que afectan el crecimiento microbiológico

Factores ambientales

Los principales factores ambientales que afectan el crecimiento microbiano en las redes de distribución de agua son la temperatura y la precipitación, aunque la lluvia únicamente afecta a aguas superficiales o aguas subterráneas expuestas a canales abiertos. El crecimiento y la actividad microbiológica en general aumentan con el incremento en la temperatura del agua. Se ha observado que el crecimiento microbiológico se ve favorecido conforme aumenta el carbono orgánico total (COT) debido al aumento de la turbiedad del agua después de fuertes lluvias (Lowther y Moser, 1984). La lluvia también introduce grandes cantidades de

Aerobacter aerogenes, la cual no es un coliforme como tal, pero aparece en los conteos de coliformes totales.

Disponibilidad de nutrientes

Los microorganismos obtienen todas las sustancias esenciales para su crecimiento del medio ambiente. Si se limita la presencia de estos nutrientes se disminuyen las poblaciones de microorganismos. Sin embargo, los coliformes y las bacterias HPC (Heterotrophic Plate Count) requieren de pocos macronutrientes (fósforo, carbono y nitrógeno) que se encuentran normalmente en el agua (aunque sea de muy buena calidad). Se ha encontrado que el carbono asimilable orgánico también es un nutriente limitante y que este disminuye conforme avanza en las redes de distribución (LeChevalier, 1990).

Aplicación de desinfectantes secundarios

El crecimiento microbiológico ocurre principalmente debido a que no se puede mantener un residual en toda la línea de suministro, esto se puede deber a los tiempos de residencia prolongados entre algunos puntos de suministro y la planta de tratamiento o por incorporación de otras líneas de suministro provenientes de otras plantas. Para asegurar un residual uniforme a lo largo de las redes de distribución es necesario en algunos casos incluir estaciones de aplicación de desinfectante alejados de la planta de tratamiento. Este problema no es recomendable resolverlo de manera puntual en la planta de tratamiento con mayores concentraciones de desinfectante ya que el agua puede formar un exceso de subproductos y/o la concentración residual de desinfectante que puede estar por encima de lo establecido por la norma en los puntos de suministro próximos a la planta de tratamiento de agua.

Tipo y concentración de desinfectante residual

Muchos investigadores han encontrado que el mantener niveles considerables de cloro libre en el agua de suministro no siempre trae como resultado una disminución satisfactoria en la cantidad de microorganismos presentes en las redes de distribución. De acuerdo con estudios realizados en el acueducto de Los Ángeles, una concentración residual de 1-2 mg/l de cloro provocó una disminución 2-log en las bacterias presentes en la biopelícula, sin embargo, fue necesaria una disminución 3-log y una concentración residual de 3-5 mg/l para lograr niveles microbiológicos adecuados (Nagy 1982). Se ha observado que el cloro libre debido a su alta

velocidad de reacción con compuestos oxidables presentes en el agua, se agota rápidamente antes de penetrar las biopelículas presentes en las tuberías. Debido a la baja reactividad de las monocloramias, estas pueden penetrar con mayor facilidad a las biopelículas y lograr una desactivación de los microorganismos de manera más eficiente y por lo que es un desinfectante secundario más favorable.

Corrosión y acumulación de sedimentos

Los subproductos generados por corrosión pueden proteger a los microorganismos del ataque de los desinfectantes. El cloro libre reacciona fácilmente con el ión Fe^{2+} para formar sales de hierro insolubles las cuales pueden encapsular y proteger a los microorganismos presentes en las biopelículas. La aplicación de inhibidores de corrosión tal como el polifosfato y ortofosfato de zinc reducen hasta 100 veces la formación de biopelículas en tuberías de acero (LeChevalier, 1990). El problema que se presenta con estos inhibidores es que pueden provocar un incremento en la concentración de plomo y cobre en el agua a niveles por encima de los establecidos por las normas o estándares de calidad.

Efectos hidráulicos

Es importante mantener las velocidades superficiales del agua en las redes de distribución a un nivel que asegure el transporte adecuado de desinfectante, y una fuerza de corte que reduzca las posibilidades de formación de biopelículas.

2.6.3 Control del tiempo de residencia en las redes de distribución

En sistemas con altos flujos y redes de distribución cortas, el tiempo de residencia del agua es de 24-48 h. Los sistemas de distribución con mayores tiempos de residencia sufren un deterioro en la calidad del agua que suministran debido a:

- La presencia de cloro libre en el agua continua reaccionando con la materia orgánica presente en el agua y trae como consecuencia una mayor formación de trihalometanos
- Crecimiento microbiológico y formación de biopelículas
- Mayor corrosión
- Mayor turbidez

Es importante que los operadores de las redes de distribución comprendan bien su funcionamiento para no tener que tratar y bombear cantidades de agua excesivas lo cual provoca un mayor tiempo de residencia en las mismas.

2.6.4 Residuales de los desinfectantes secundarios

La operación de los sistemas de distribución mediante la aplicación de un desinfectante residual (cloro o cloraminas) tiene un impacto directo en la calidad del agua en la misma. El mantener una concentración residual a lo largo de la red es una meta importante en cualquier sistema de distribución de agua. Las monocloraminas presentan mayor eficiencia para remover biopelículas que el cloro libre, sin embargo estas tienen un menor poder oxidativo que el cloro (Ej. Remoción de hierro y manganeso) es por esto que muchas redes de distribución optan por tener residuales de cloro combinados.

Mantenimiento de los residuales de la desinfección

La prevención total del crecimiento microbiológico en las redes de distribución es imposible, sin embargo, mantener la concentración residual de desinfectante es una de las maneras de cumplir con la satisfacción de los usuarios en los puntos de suministro. Para mantener la concentración residual de desinfectante se requiere un conocimiento amplio del funcionamiento de la red (tiempo de residencia, puntos muertos), así como de los factores que contribuyen al deterioro de la concentración residual de desinfectante.

Uno de los principales factores que afectan la persistencia de la concentración de cloro en las redes de distribución es la temperatura del agua. Las fluctuaciones estacionales alteran la cantidad de desinfectante necesario para mantener un residual adecuado, esto se presenta principalmente en aquellas redes que se encuentran en contacto con el ambiente (tuberías externas). La solución a los problemas de deterioro de la concentración residual es mediante la incorporación de una estación de re-cloración que sirve como relevo para mantener una concentración adecuada en las redes. Estas estaciones de relevo deben contar con un sistema de monitoreo de flujo y concentración de cloro residual para dosificar la cantidad precisa, de tal manera que no esté por debajo de las concentraciones adecuadas ni por encima de la máximo permitido por la norma o estándares de calidad.

En caso de que se presenten dificultades para mantener la concentración residual en las redes, los operadores pueden realizar uno de los siguientes procedimientos para identificar la raíz del problema:

- Medir el oxígeno disuelto, el pH, la alcalinidad y la concentración de cloro residual en diferentes puntos de las redes de distribución
- Implementar programas de depuración (Flushing) en las zonas de la red de distribución en donde el agua es de menor calidad.
- Buscar mantener una concentración residual uniforme de 0.5-1 mg/l de cloro combinado o una concentración de 1.5-2.0 mg/l de cloro libre.
- Comparar los niveles de cloro residual entre las tomas de agua y sus redes de suministro adyacentes
- Mantener una memoria de quejas e irregularidades en el servicio

CAPÍTULO 3: RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 DEMANDA DE OZONO

Se trabajó con un sistema de ozonación a escala laboratorio compuesto por el gas de alimentación, un generador de ozono, una unidad de contacto gas-líquido (columna de burbujeo), un analizador de ozono en fase gas y una unidad de destrucción de ozono. El sistema utiliza como gas de alimentación aire enriquecido con oxígeno ($90\% \pm 5\%$) el cual se obtiene a partir de un separador de aire (Airsep modelo AS-12, Corporation USA). El ozono se produce haciendo pasar el gas de alimentación a través de un generador Labo 76 (Emery Trailigaz, USA) con capacidad de producción de 19 g de O_3/h . La unidad de contacto gas-líquido es una columna de burbujeo de vidrio (110 cm de altura y 5.5 cm de diámetro interno) de 2 l de capacidad, la cual cuenta con tres puertos de muestreo (a los 30, 60 y 90 cm de altura). El oxidante es inyectado en el fondo de las unidades de contacto por medio de difusores de vidrio de placa porosa (10-15 μm de tamaño de poro). El ozono que proviene del reactor sin reaccionar pasa por un analizador de ozono en fase gas (Teledyne API Model 465H Ozone Monitor) y finalmente es enviado a una unidad de destrucción catalítica para la liberación segura del gas de salida. La cuantificación del ozono en fase líquida (ozono residual), se utilizó el método de Índigo [Standard Methods, 1992], cuyo principio es la disminución de la absorbancia con el aumento de la concentración del ozono.

Se saturó con ozono un volumen de 1.7 L de agua destilada obteniendo en esta una concentración mayor a dos miligramos por litro. Se realizaron tres pruebas por pozo y en cada una de estas se tomaron diez muestras del agua a tratar con un volumen de 30 ml a una temperatura entre $18^{\circ}C$ y $19^{\circ}C$; a las cuales se les fue agregando una cantidad creciente de 0.1 ml de agua saturada, es decir a la primera 0.1 a la segunda 0.2, y así sucesivamente. Para la cuantificación de ozono se utilizó el método de índigo mencionado anteriormente. Teniendo la concentración de ozono en el agua saturada y en las muestras fue posible identificar con precisión los puntos donde aparecieron los primeros residuales de ozono en los distintos casos, resultados que muestran la demanda de ozono en el agua, ya que al aparecer la primera concentración de ozono residual, la demanda de ozono ha sido cumplida.

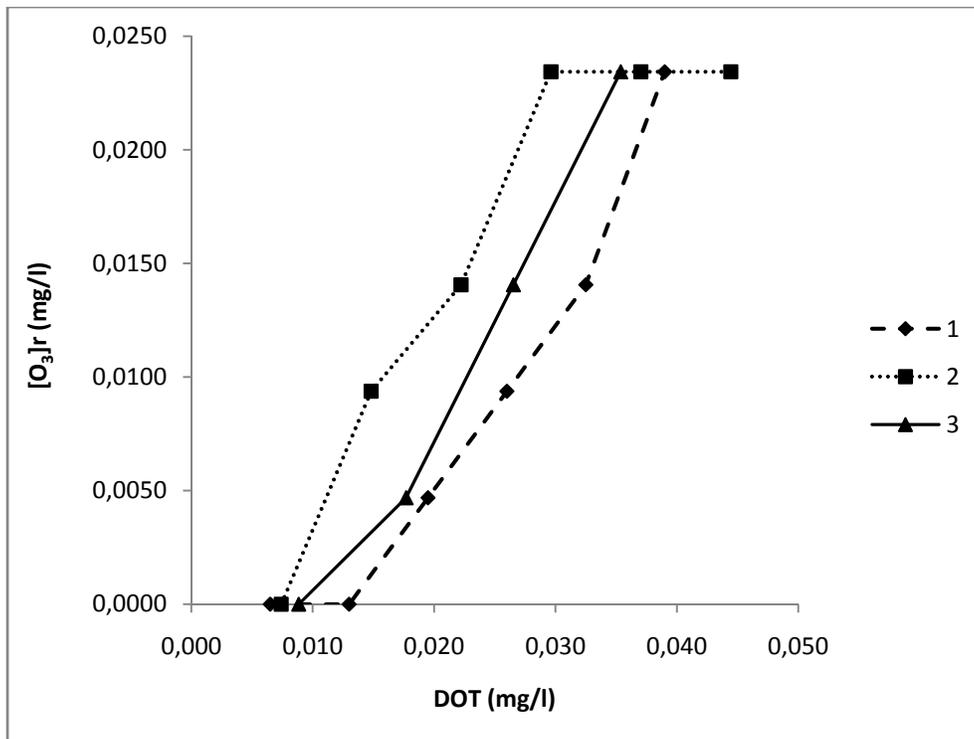
A continuación se muestran los resultados obtenidos para cada pozo de CU:

Pozo 1 (Química)

Tabla 3.1 Demanda de ozono Pozo 1 (Química)

	Prueba 1	Prueba 2	Prueba 3
Concentración de saturación del agua (mg/l)	1.950	2.222	2.653
Volumen de agua saturada adicionada a la muestra (l)	0.0001	0.0001	0.0001
Volumen de la muestra (ml)	30	30	30
Dosis de ozono transferida (mg/l)	0.0065	0.0074	0.0088
Temperatura (°C)	18	19	18.5
Demanda de ozono (mg/l)	0.008	0.009	0.013
Demanda de ozono promedio (mg/l)	<u>0.01</u>		

Figura 3.1 Demanda de ozono Pozo 1 (Química)

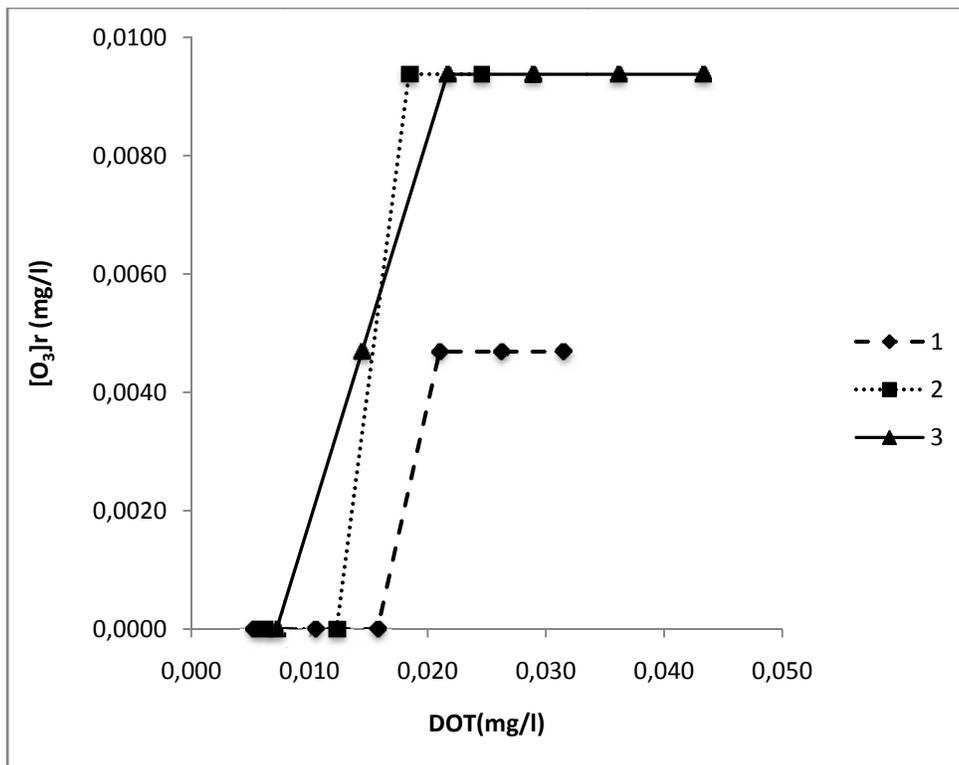


Pozo 2 (Multifamiliar)

Tabla 3.2 Demanda de ozono Pozo 2 (Multifamiliar)

	Prueba 1	Prueba 2	Prueba 3
Concentración de saturación del agua (mg/l)	1.575	1.842	2.165
Volumen de agua saturada adicionada a la muestra (l)	0.0001	0.0001	0.0001
Volumen de la muestra (ml)	30	30	30
Dosis de ozono transferida mg/l)	0.0052	0.0061	0.0072
Temperatura (°C)	19	18.5	18
Demanda de ozono (mg/l)	0.015	0.012	0.009
Demanda de ozono promedio (mg/l)	<u>0.012</u>		

Figura 3.2 Demanda de ozono Pozo 2 (Multifamiliar)

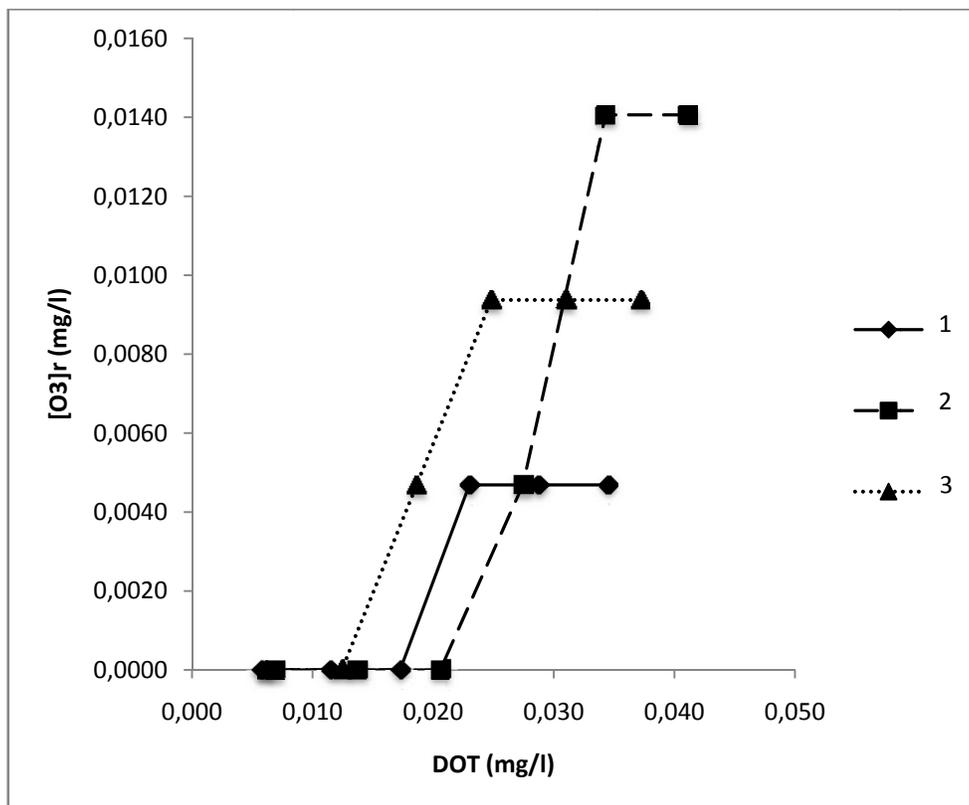


Pozo 3 (Vivero Alto)

Tabla 3.3 Demanda de ozono Pozo 3 (Vivero Alto)

	Prueba 1	Prueba 2	Prueba 3
Concentración de saturación del agua (mg/l)	2.058	2.053	1.725
Volumen de agua saturada adicionada a la muestra (l)	0.0001	0.0001	0.0001
Volumen de la muestra (ml)	30	30	30
Dosis de ozono transferida (mg/l)	0.0069	0.0068	0.0057
Temperatura (°C)	18	18.5	18.5
Demanda de ozono (mg/l)	0.016	0.012	0.02
Demanda de ozono promedio (mg/l)	<u>0.016</u>		

Figura 3.3 Demanda de ozono Pozo 3 (Vivero Alto)



Análisis de resultados

En todas las pruebas presentadas, las condiciones de operación y características del agua saturada fueron muy similares. El criterio utilizado para calcular la demanda fue que ésta se cumpliera cuando el valor de ozono residual obtenido por colorimetría $[O_3]_r$ fuera diferente de cero, ya que esto nos indica que el ozono transferido ya no está reaccionando con los componentes ajenos al agua.

La razón por la cual se eligió empezar agregando 0.1 ml de agua saturada y aumentar el volumen de cada muestra con la misma magnitud, fue que una dosis de ozono transferida (DOT) aproximada de 0.007 mg/L era lo suficientemente pequeña para notar el momento en el cual aparecería el primer residual.

Como se puede observar la demanda de ozono en el agua de los tres pozos es relativamente baja, se encuentra alrededor de 0.014 mg/L, la cual coincide con el tipo de fuente de agua. Generalmente el agua de origen subterráneo es de mejor calidad y es menos susceptible a la contaminación en comparación con las superficiales, donde el contenido de materia orgánica natural y de contaminantes oxidables, es mayor. Al margen de esta condición particular, el agua de dichos pozos, requiere de ser desinfectada para garantizar su calidad microbiológica.

Es importante mencionar que después de desinfectada el agua con ozono, se debe preservar su calidad microbiológica entre el punto de desinfección y el punto de consumo, para ello es necesario complementar dicha desinfección con el uso de hipoclorito de sodio, debido a que el cloro presenta la característica de mantener un efecto residual en el agua.

3.2 TRANSFERENCIA DE MASA

Para las pruebas de transferencia de masa se utilizó agua del pozo Multifamiliar. Las pruebas consistieron en una serie de 36 experimentos en los que se buscó obtener distintas relaciones de flujo gas-líquido, así como diferentes concentraciones de ozono en el gas de entrada a la columna de burbujeo.

El arreglo experimental fue un sistema de ozonación continuó igual al utilizado en las pruebas de demanda (ver sección 3.2 para más detalles). Durante las pruebas de transferencia se tomaron muestras de agua a la salida de la columna de burbujeo y en el perfil vertical de la misma a diferentes alturas para cuantificar la concentración de ozono transferido en el líquido. El cálculo de los parámetros de transferencia de masa se hizo de acuerdo a la metodología propuesta en la sección 2.6.5 de esta tesis.

Resultados y análisis:

Tabla 3.4 Resultados de los experimentos de transferencia de masa realizados con el agua del pozo Multifamiliar (1/3)

No. De experimento	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Qg (l/min)	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.30	0.30	0.30
Ql (l/min)	0.50	0.50	0.50	0.30	0.30	0.30	0.20	0.20	0.20	0.50	0.50	0.50
τ (min)	3.60	3.60	3.60	6.00	6.00	6.00	9.00	9.00	9.00	3.60	3.60	3.60
[O ₃]ge (mg/l)	2.00	5.00	10.00	2.00	5.00	10.00	2.00	5.00	10.00	2.00	5.00	10.00
[O ₃]gs (mg/l)	0.42	1.08	3.00	0.24	1.56	3.42	0.60	1.80	3.96	0.72	2.04	3.90
[O ₃]r (mg/l)	0.13	0.32	0.74	0.16	0.39	0.77	0.16	0.38	0.82	0.17	0.17	0.45
[O ₃]r A (mg/l)	0.13	0.30	0.72	0.13	0.36	0.71	0.13	0.38	0.77	0.11	0.17	0.42
[O ₃]r B (mg/l)	0.08	0.21	0.50	0.06	0.31	0.54	0.02	0.35	0.67	0.09	0.11	0.19
[O ₃]r C (mg/l)	0.05	0.09	0.27	0.03	0.16	0.33	-	0.18	0.40	0.02	0.05	0.11
Usg (m/s)	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.003	0.003	0.003
Usl (m/s)	0.004	0.004	0.004	0.003	0.003	0.003	0.002	0.002	0.002	0.004	0.004	0.004
% transferido	79.0	78.4	70.0	88.0	68.8	65.8	70.0	64.0	60.4	64.0	59.2	61.0
DOT (mg/l)	0.632	1.568	2.800	1.173	2.293	4.387	1.400	3.200	6.040	0.768	1.776	3.660
NO ₃ (mg/min)	0.316	0.784	1.400	0.352	0.688	1.316	0.280	0.640	1.208	0.384	0.888	1.830
PO ₃ s (atm)	0.0010	0.0025	0.0050	0.0010	0.0025	0.0050	0.0010	0.0025	0.0050	0.0010	0.0025	0.0050
PO ₃ e (atm)	0.0002	0.0005	0.0015	0.0001	0.0008	0.0017	0.0003	0.0009	0.0020	0.0004	0.0010	0.0020
C*s	0.5454	1.3614	2.7160	0.5454	1.3614	2.7160	0.5454	1.3614	2.7160	0.5454	1.3614	2.7160
C*e	0.1146	0.2946	0.8177	0.0655	0.4255	0.9319	0.1637	0.4909	1.0788	0.1965	0.5563	1.0625
(C*-C)mLn	0.2342	0.5919	1.3114	0.1807	0.6611	1.3760	0.2604	0.7069	1.4511	0.2743	0.8320	1.5909
k ₁ a (1/min)	0.7495	0.7359	0.5931	1.0822	0.5782	0.5313	0.5974	0.5029	0.4625	0.7777	0.5930	0.6391
Usg (m/h)	6.1115	6.1115	6.1115	6.1115	6.1115	6.1115	6.1115	6.1115	6.1115	9.1673	9.1673	9.1673
Usl (m/h)	15.2789	15.2789	15.2789	9.1673	9.1673	9.1673	6.1115	6.1115	6.1115	15.2789	15.2789	15.2789
ln(k ₁ a)	- 0.2884	- 0.3067	- 0.5224	0.0790	- 0.5479	- 0.6324	- 0.5151	- 0.6873	- 0.7711	- 0.2514	- 0.5226	- 0.4478
Ln(Usg)	1.8102	1.8102	1.8102	1.8102	1.8102	1.8102	1.8102	1.8102	1.8102	2.2156	2.2156	2.2156
Ln(Usl)	2.7265	2.7265	2.7265	2.2156	2.2156	2.2156	1.8102	1.8102	1.8102	2.7265	2.7265	2.7265

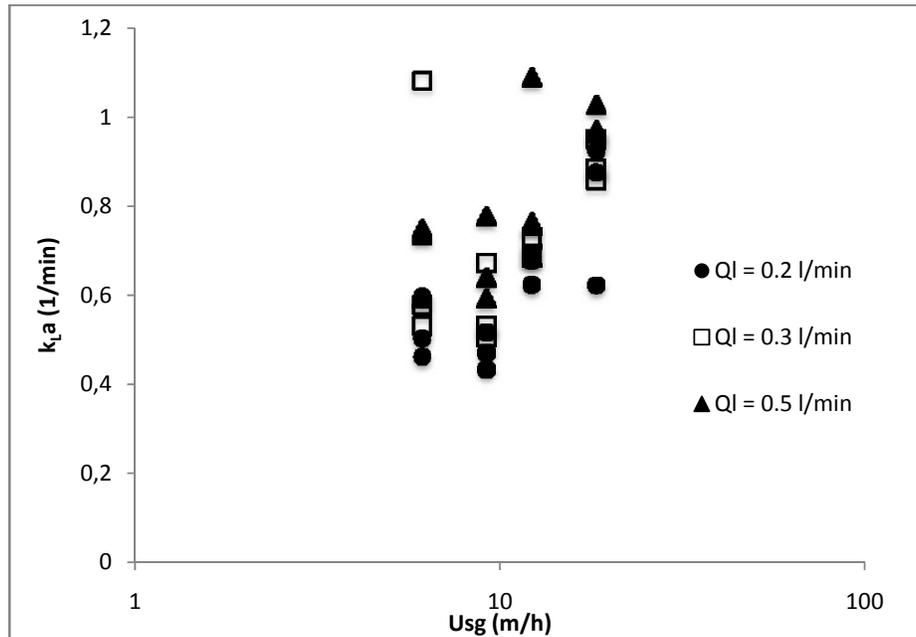
Tabla 3.5 Resultados de los experimentos de transferencia de masa realizados para el agua del pozo Multifamiliar (2/3)

No. De experimento	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
Qg (l/min)	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40
Ql (l/min)	0.30	0.30	0.30	0.20	0.20	0.20	0.50	0.50	0.50	0.30	0.30	0.30
τ (min)	6.00	6.00	6.00	9.00	9.00	9.00	3.60	3.60	3.60	6.00	6.00	6.00
[O₃]ge (mg/l)	2.00	5.00	10.00	2.00	5.00	10.00	2.00	5.00	10.00	2.00	5.00	10.00
[O₃]gs (mg/l)	0.90	2.34	4.62	1.02	2.64	5.07	0.84	2.22	3.00	0.96	2.40	4.80
[O₃]r (mg/l)	0.24	0.20	0.52	0.19	0.23	0.54	0.07	0.29	0.43	0.17	0.31	0.58
[O₃]r A (mg/l)	0.24	0.20	0.47	0.20	0.26	0.52	0.05	0.27	0.39	0.16	0.28	0.57
[O₃]r B (mg/l)	0.18	0.16	0.38	0.17	0.22	0.42	0.04	0.22	0.30	0.14	0.20	0.46
[O₃]r C (mg/l)	0.17	0.10	0.13	0.14	0.13	0.15	0.07	0.11	0.10	0.07	0.16	0.27
Usg (m/s)	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003
Usl (m/s)	0.003	0.003	0.003	0.002	0.002	0.002	0.004	0.004	0.004	0.003	0.003	0.003
% transferido	55.0	53.2	53.8	49.0	47.2	49.3	58.0	55.6	70.0	52.0	52.0	52.0
DOT (mg/l)	1.100	2.660	5.380	1.470	3.540	7.395	0.928	2.224	5.600	1.387	3.467	6.933
NO₃ (mg/min)	0.330	0.798	1.614	0.294	0.708	1.479	0.464	1.112	2.800	0.416	1.040	2.080
PO₃s (atm)	0.0010	0.0025	0.0050	0.0010	0.0025	0.0050	0.0010	0.0025	0.0050	0.0010	0.0025	0.0050
PO₃e (atm)	0.0005	0.0012	0.0023	0.0005	0.0013	0.0025	0.0004	0.0011	0.0015	0.0005	0.0012	0.0024
C*s	0.5454	1.3614	2.7160	0.5454	1.3614	2.7160	0.5454	1.3614	2.7160	0.5454	1.3614	2.7160
C*e	0.2456	0.6380	1.2582	0.2783	0.7197	1.3804	0.2292	0.6053	0.8177	0.2619	0.6543	1.3071
(C*-C)mLn	0.2726	0.8757	1.6857	0.3164	0.9085	1.7479	0.3373	0.8167	1.4278	0.3165	0.8382	1.6866
k₁a (1/min)	0.6724	0.5063	0.5319	0.5162	0.4330	0.4701	0.7642	0.7564	1.0895	0.7302	0.6893	0.6851
Usg (m/h)	9.1673	9.1673	9.1673	9.1673	9.1673	9.1673	12.2231	12.2231	12.2231	12.2231	12.2231	12.2231
Usl (m/h)	9.1673	9.1673	9.1673	6.1115	6.1115	6.1115	15.2789	15.2789	15.2789	9.1673	9.1673	9.1673
ln(k₁a)	- 0.3969	- 0.6807	- 0.6312	- 0.6613	- 0.8371	- 0.7548	- 0.2690	- 0.2791	0.0857	- 0.3145	- 0.3721	- 0.3781
Ln(Usg)	2.2156	2.2156	2.2156	2.2156	2.2156	2.2156	2.5033	2.5033	2.5033	2.5033	2.5033	2.5033
Ln(Usl)	2.2156	2.2156	2.2156	1.8102	1.8102	1.8102	2.7265	2.7265	2.7265	2.2156	2.2156	2.2156

Tabla 3.6 Resultados de los experimentos de transferencia de masa realizados para el agua del pozo Multifamiliar (3/3)

No. De experimento	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36
Qg (l/min)	0.40	0.40	0.40	0.40	0.60	0.60	0.60	0.60	0.60	0.60	0.60	0.60
Ql (l/min)	0.30	0.20	0.20	0.20	0.50	0.50	0.50	0.30	0.30	0.30	0.20	0.20
τ (min)	6.00	9.00	9.00	9.00	3.60	3.60	3.60	6.00	6.00	6.00	9.00	9.00
[O₃]e (mg/l)	10.00	2.00	5.00	10.00	2.00	5.00	10.00	2.00	5.00	10.00	2.00	5.00
[O₃]s (mg/l)	4.80	1.08	2.52	4.80	0.99	2.52	4.68	1.08	2.70	5.04	1.08	3.24
[O₃]r (mg/l)	0.58	0.18	0.41	0.63	0.11	0.31	0.45	0.12	0.35	0.55	0.13	0.35
[O₃]r A (mg/l)	0.57	0.17	0.35	0.59	0.16	0.31	0.44	0.14	0.32	0.53	0.14	0.34
[O₃]r B (mg/l)	0.46	0.14	0.31	0.52	0.13	0.29	0.37	0.10	0.30	0.49	0.12	0.30
[O₃]r C (mg/l)	0.27	0.07	0.21	0.40	0.06	0.17	0.22	0.03	0.20	0.37	0.07	0.22
Usg (m/s)	0.003	0.003	0.003	0.003	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005
Usl (m/s)	0.003	0.002	0.002	0.002	0.004	0.004	0.004	0.003	0.003	0.003	0.002	0.002
% transferido	52.0	46.0	49.6	52.0	50.5	49.6	53.2	46.0	46.0	49.6	46.0	35.2
DOT (mg/l)	6.933	1.840	4.960	10.400	1.212	2.976	6.384	1.840	4.600	9.920	2.760	5.280
NO₃ (mg/min)	2.080	0.368	0.992	2.080	0.606	1.488	3.192	0.552	1.380	2.976	0.552	1.056
PO₃s (atm)	0.0050	0.0010	0.0025	0.0050	0.0010	0.0025	0.0050	0.0010	0.0025	0.0050	0.0010	0.0025
PO₃e (atm)	0.0024	0.0005	0.0013	0.0024	0.0005	0.0013	0.0023	0.0005	0.0014	0.0025	0.0005	0.0016
C*s	2.7160	0.5454	1.3614	2.7160	0.5454	1.3614	2.7160	0.5454	1.3614	2.7160	0.5454	1.3614
C*e	1.3071	0.2946	0.6870	1.3071	0.2701	0.6870	1.2745	0.2946	0.7360	1.3723	0.2946	0.8830
(C*-C)mLn	1.6866	0.3282	0.8138	1.6651	0.3465	0.8573	1.7249	0.3573	0.8671	1.7404	0.3496	0.9443
k_{1a} (1/min)	0.6851	0.6230	0.6772	0.6940	0.9717	0.9643	1.0281	0.8584	0.8841	0.9500	0.8772	0.6213
Usg (m/h)	12.2231	12.2231	12.2231	12.2231	18.3346	18.3346	18.3346	18.3346	18.3346	18.3346	18.3346	18.3346
Usl (m/h)	9.1673	6.1115	6.1115	6.1115	15.2789	15.2789	15.2789	9.1673	9.1673	9.1673	6.1115	6.1115
ln(k_{1a})	- 0.3781	- 0.4732	- 0.3897	- 0.3653	- 0.0287	- 0.0364	0.0277	- 0.1527	- 0.1232	- 0.0513	- 0.1311	- 0.4759
Ln(Usg)	2.5033	2.5033	2.5033	2.5033	2.9088	2.9088	2.9088	2.9088	2.9088	2.9088	2.9088	2.9088
Ln(Usl)	2.2156	1.8102	1.8102	1.8102	2.7265	2.7265	2.7265	2.2156	2.2156	2.2156	1.8102	1.8102

Figura 3.4 Coeficiente global de transferencia de masa en función de la velocidad superficial del gas

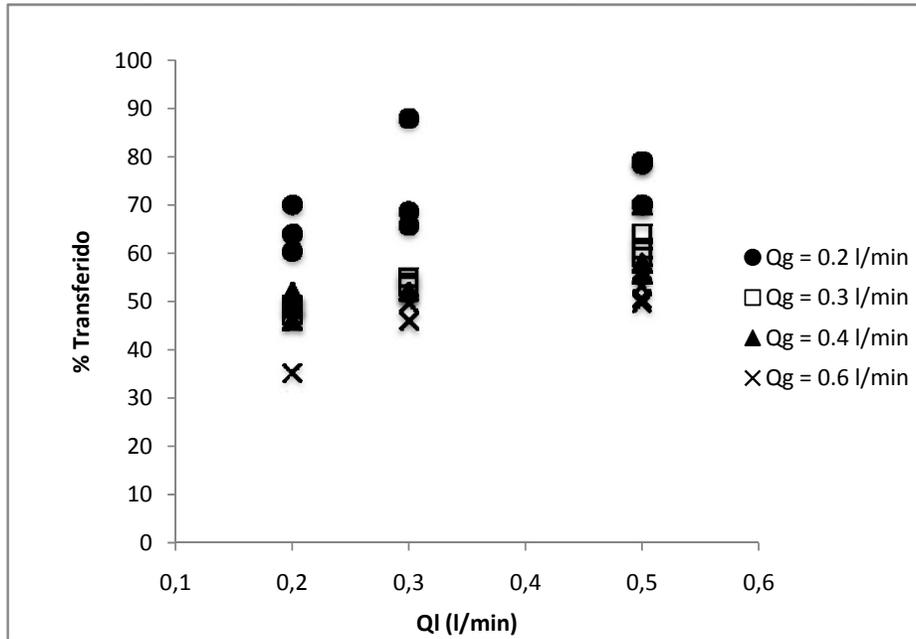


La gráfica anterior muestra la correlación que existe entre el coeficiente global de transferencia de masa y la velocidad superficial del gas, se hizo una correlación multivariable utilizando Excel entre el $k_{L,a}$ y las velocidades superficiales del gas y del líquido y se llegó a la siguiente ecuación empírica:

De la misma manera se realizó una correlación multivariable en Excel utilizando el logaritmo del $k_{L,a}$ y los logaritmos de la velocidad superficial del líquido (U_{sl}) y la velocidad superficial del gas (U_{sg}), y se llegó a la siguiente ecuación:

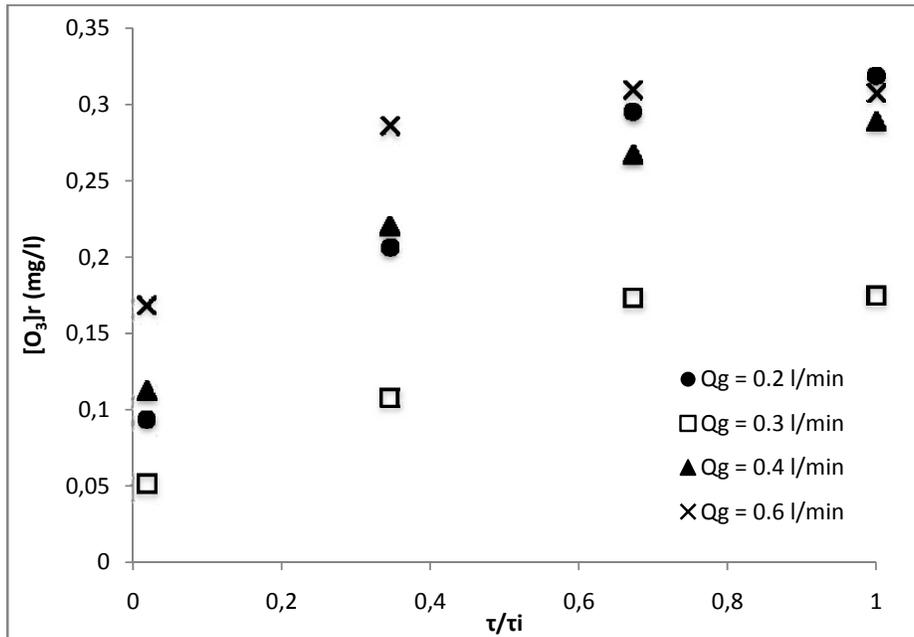
Se puede observar que para ambas correlaciones existe una mayor dependencia de la velocidad superficial del gas en la transferencia de masa entre el ozono y el agua, lo cual indica que los patrones de flujo seguidos por el gas durante el ascenso en la columna tienen un impacto importante en la transferencia de masa entre el agua y el ozono.

Figura 3.5 Porcentaje de ozono transferido en función del flujo volumétrico del agua



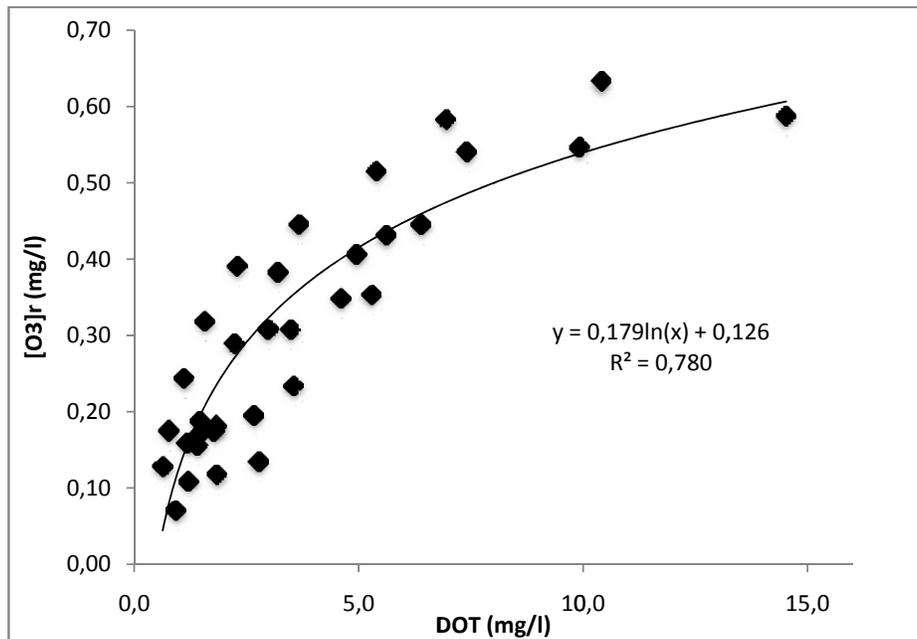
En la figura 3.4, se pueden observar las condiciones de flujo en las que se alcanza un mayor porcentaje de transferencia de masa entre el ozono y el agua. El mayor porcentaje alcanzado fue alrededor de 90% para una relación G/L de 0.66, lo cual está por encima del rango reportado en la literatura para el diseño de una cámara de contacto (0.10 a 0.25).

Figura 3.6 Concentración de ozono a lo largo del perfil vertical de la torre para diferentes flujos de gas



En esta gráfica se puede observar el perfil de concentraciones a lo largo de la torre de contacto, fue necesario normalizar el tiempo de retención hidráulica para hacer comparables los resultados entre los diferentes flujos volumétricos propuestos. Para este comparativo se escogieron pruebas con un flujo volumétrico de agua de 0.5 l/min y una concentración de ozono en fase gas a la entrada del reactor de 5 mg/l. Se puede observar que la mayor concentración residual se alcanza con el flujo de gas de 0.2 l/min, esto se debe a que a flujos menores de gas, el tamaño de burbuja es menor lo que se traduce en una mayor área superficial de contacto y a un mayor tiempo de residencia del gas.

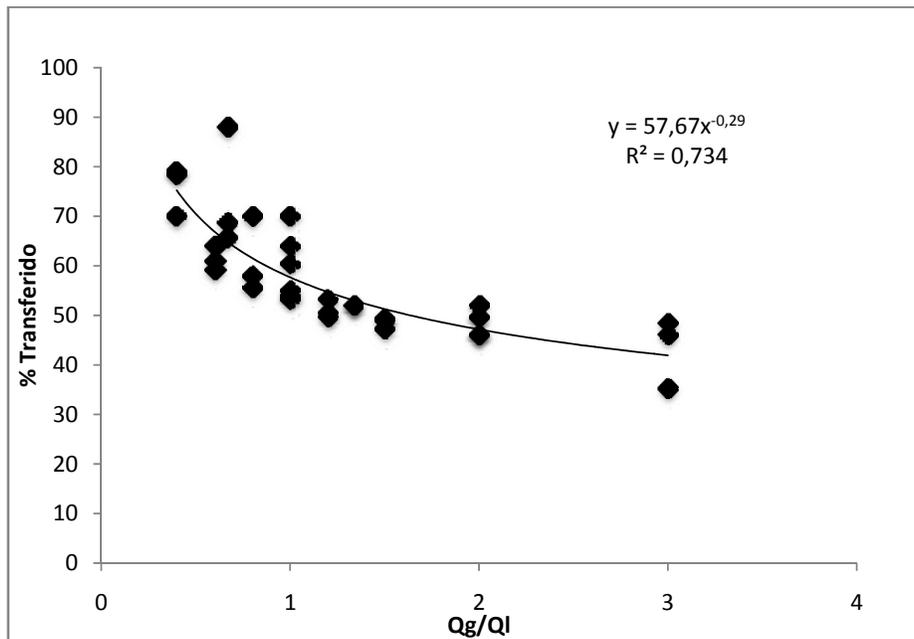
Figura 3.7 Correlación entre la concentración de ozono residual a la salida de la torre y la dosis de ozono transferida



En la figura 3.7 se puede observar la relación que guarda la concentración de ozono residual con la dosis de ozono transferida. Este factor, en combinación con el tiempo de retención hidráulica y la relación entre el flujo del gas y el flujo del líquido se utilizaron para poder predecir la concentración de ozono residual a la salida de la etapa de disolución en el contactor propuesto para la desinfección del agua del pozo Multifamiliar de Ciudad Universitaria.

.....

Figura 3.8 Porcentaje de ozono transferido en función de la relación de flujo gas-líquido



Aquí se puede observar que a una menor relación gas-líquido (G/L o Qg/Ql) se favorece la transferencia de masa entre el ozono gas y el agua

El $k_L a$ no tiene un impacto directo en el dimensionamiento de la cámara de contacto, sin embargo estos experimentos de transferencia de masa sirven para llevar a cabo una caracterización del agua a tratar. Es importante señalar, que si bien el comportamiento hidrodinámico que se tiene en un modelo escala laboratorio, difiere de lo que ocurrirá en una cámara de contacto convencional, los resultados obtenidos en este trabajo son un primer acercamiento de los fenómenos de transferencia de masa que se tendrán en agua de estud

.....
.
.....

3.3 VIDA MEDIA DEL OZONO EN EL AGUA Y RESIDUAL A LOS 60 SEGUNDOS

Para el cálculo de vida media del ozono en agua y el ozono residual a los 60 segundos de reacción se utilizó agua del pozo multifamiliar de Ciudad Universitaria y una muestra de solución saturada de ozono en agua. Se escogieron tres diferentes muestras de agua problema y tres de solución saturada y se midieron las concentraciones residuales de ozono en el agua a lo largo del tiempo. Los resultados obtenidos se muestran a continuación:

Experimento 1:

Parámetros experimentales:

Tabla 3.7 Parámetros experimentales del experimento 1 de vida media del ozono

Volumen de H ₂ O del pozo multifamiliar:	900 ml
Volumen de solución saturada de O ₃	100 ml
[O ₃] solución saturada	2.67 mg/l
DOT	0.267 mg

Resultados

Tabla 3.8 Resultado del experimento 1 de vida media del ozono

T (min)	[O ₃] _r	Ln(C/C _o)
0	0.24	0
1	0.19	0.26
2	0.18	0.31
6	0.17	0.37
8	0.16	0.42
10	0.14	0.55

Figura 3.9 Concentración de ozono residual en función del tiempo de reacción para una DOT = 0.267 mg/l

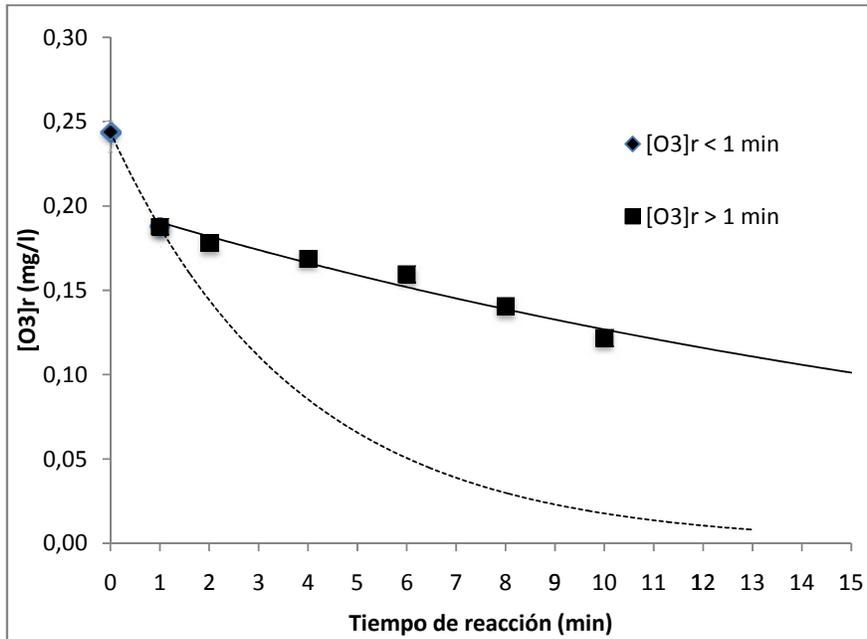
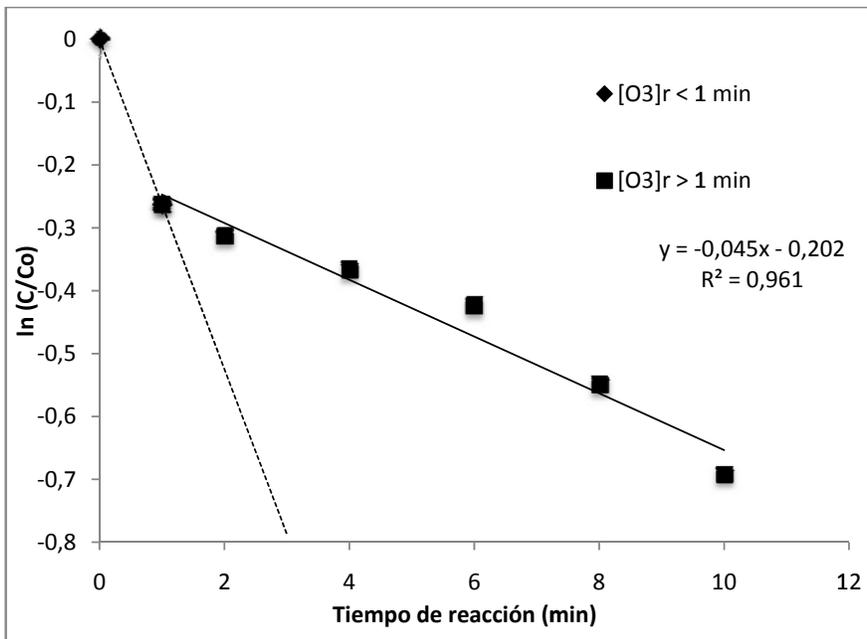


Figura 3.10 Logaritmo de la concentración al tiempo x sobre la concentración al tiempo 0 en función del tiempo de reacción para una DOT = 0.267 mg/l



$R_{60} = 0.19 \text{ mg/l}$

$k^* = -0.0452 \text{ min}^{-1}$

$$T_{1/2} = \frac{\ln\left(\frac{C_0}{C}\right)(0.5)}{-0.0452} = 15.34 \text{ min}$$

Experimento 2:

Parámetros experimentales:

Tabla 3.9 Parámetros experimentales del experimento 2 de vida media del ozono

Volumen de H ₂ O del pozo multifamiliar:	600 ml
Volumen de solución saturada de O ₃	400 ml
[O ₃] solución saturada	2.33 mg/l
DOT	0.934 mg

Resultados

Tabla 3.10 Resultado del experimento 2 de vida media del ozono

T (min)	[O ₃] _r	Ln(C/C ₀)
0	0.88	0
1	0.80	0.10
2	0.79	0.11
4	0.78	0.12
6	0.76	0.15
8	0.74	0.17
10	0.73	0.19

Figura 3.11 Concentración de ozono residual en función del tiempo de reacción para una DOT = 0.934 mg/l

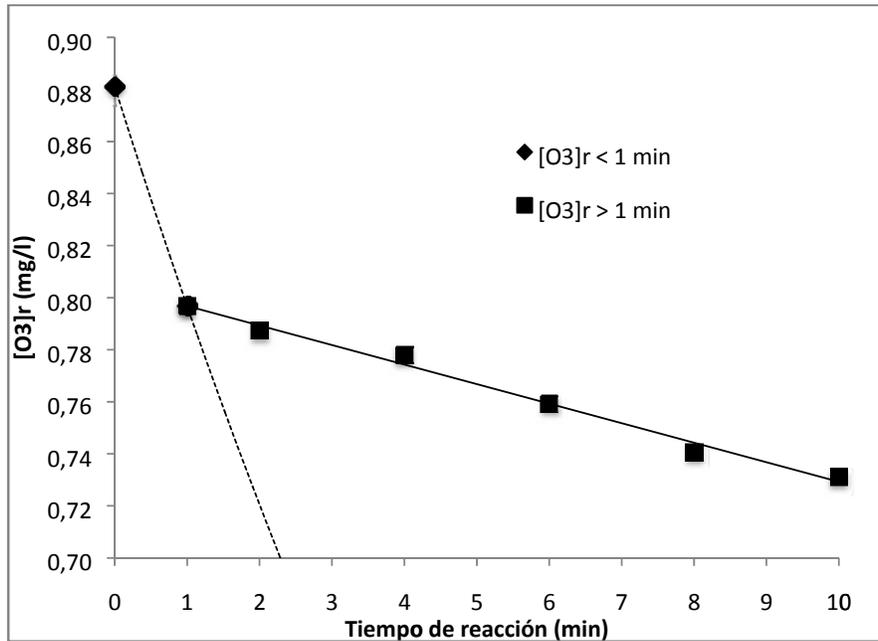
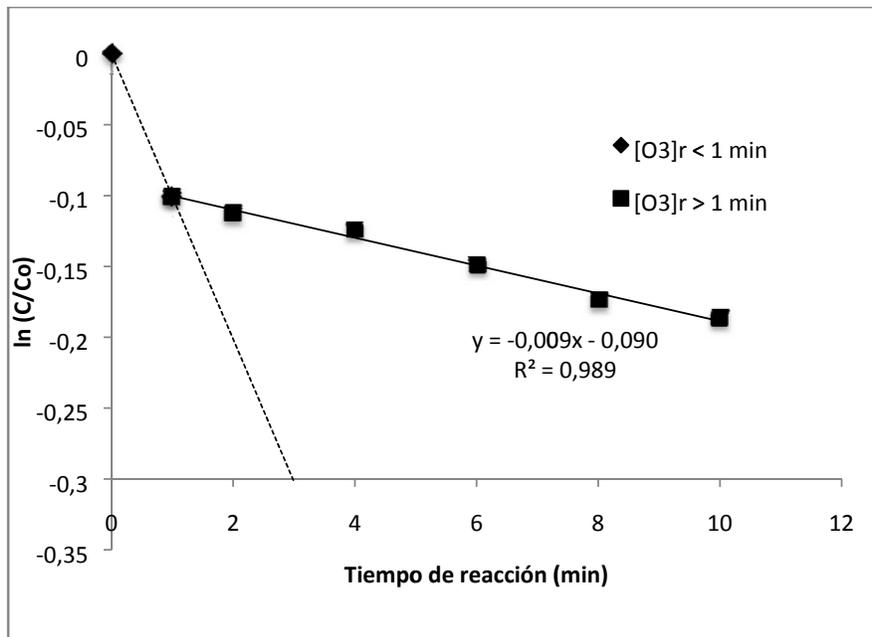


Figura 3.12 Logaritmo de la concentración al tiempo x sobre la concentración al tiempo θ en función del tiempo de reacción para una DOT = 0.934 mg/l



$R_{60} = 0.80 \text{ mg/l}$

$k^* = -0.0098 \text{ min}^{-1}$

$$T_{1/2} = \frac{\ln(0.5)}{-0.0098} = 70.73 \text{ min}$$

Experimento 3:

Parámetros experimentales:

Tabla 3.11 Parámetros experimentales del experimento 3 de vida media del ozono

Volumen de H ₂ O del pozo multifamiliar:	800 ml
Volumen de solución saturada de O ₃	200 ml
[O ₃] solución saturada	2.48 mg/l
DOT	0.497 mg

Resultados

Tabla 3.12 Resultado del experimento 3 de vida media del ozono

T (min)	[O ₃] _r	Ln(C/C ₀)
0	0.46	-
1	0.37	- 0.23
2	0.36	- 0.25
4	0.34	- 0.31
6	0.33	- 0.34
8	0.32	- 0.37
10	0.30	- 0.43

Figura 3.13 Concentración de ozono residual en función del tiempo de reacción para una DOT = 0.497 mg/l

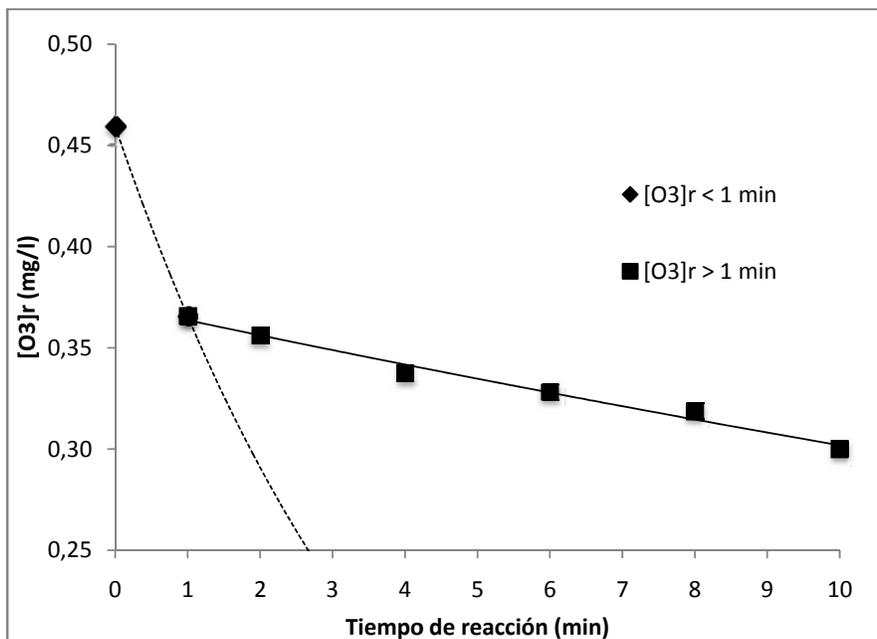
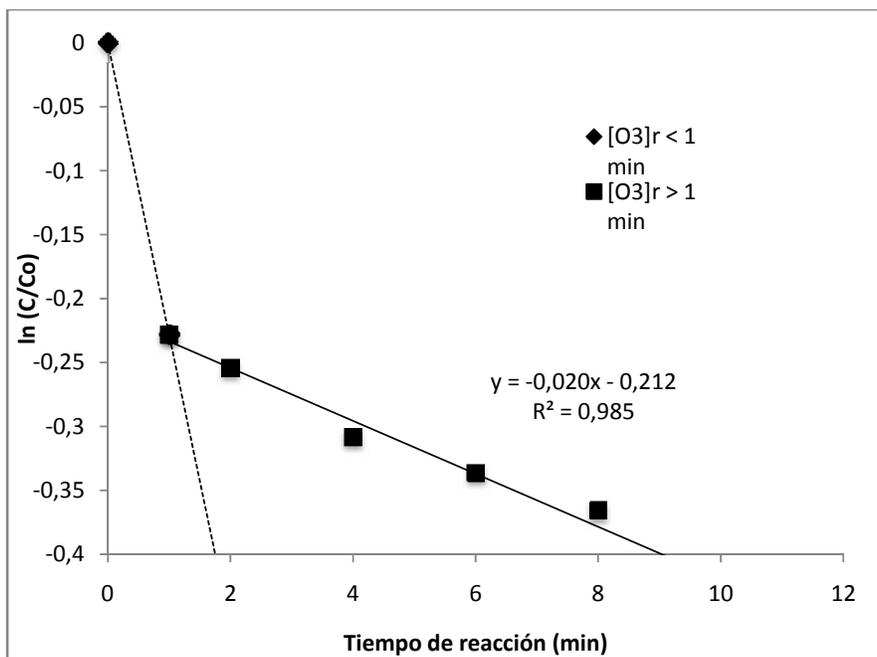


Figura 3.14 Logaritmo de la concentración al tiempo x sobre la concentración al tiempo 0 en función del tiempo de reacción para una DOT = 0.497 mg/l



$R_{60} = 0.37 \text{ mg/l}$

$$k^* = -0.0207 \text{ min}^{-1}$$

Gráficas de regresión:

Figura 3.15 Concentración de ozono residual a los 60 segundos de reacción en función de la dosis de ozono transferida

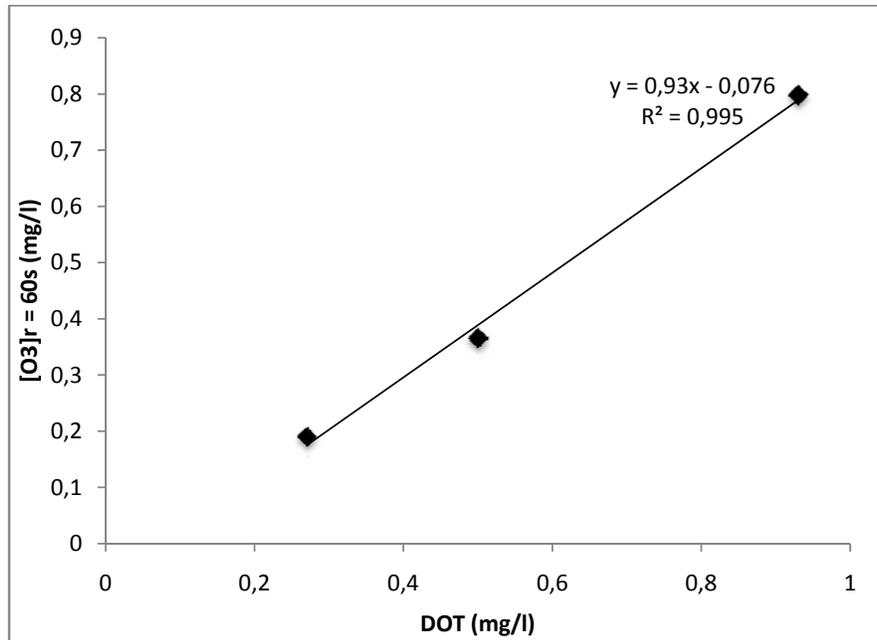
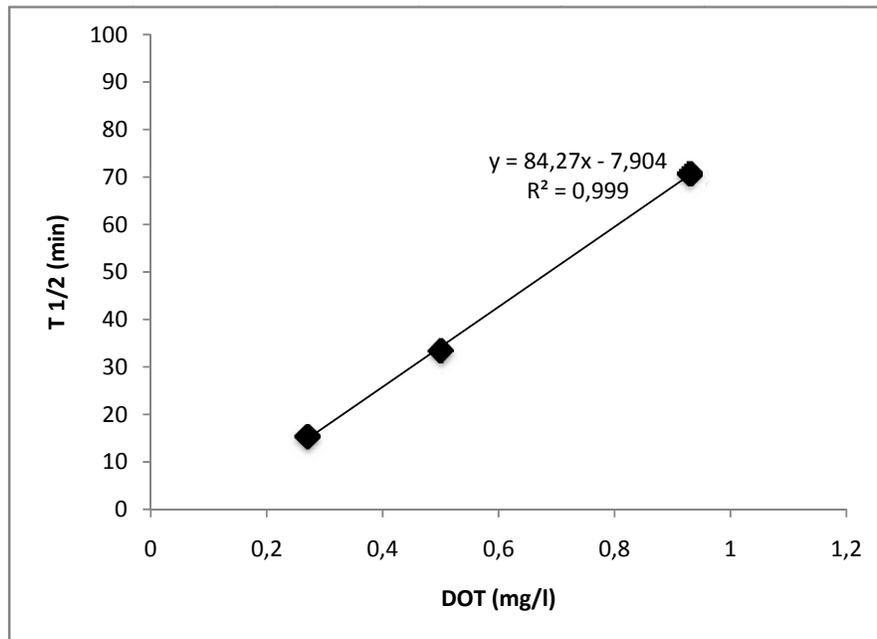


Figura 3.16 Tiempo de vida media del ozono en el agua en función de la dosis de ozono transferida



Estas gráficas de regresión para el tiempo de vida media y el residual a los 60 segundos se utilizaron para el diseño de la cámara de contacto.

Análisis de resultados:

Para el cálculo del tiempo de vida media del ozono en el agua se consideró una constante de decaimiento del ozono de primer orden debido al comportamiento lineal de la descomposición del ozono a partir de los primeros 60 segundos de reacción. De acuerdo a los resultados obtenidos, se puede observar que la calidad del agua del pozo Multifamiliar medida como el tiempo de descomposición del ozono en el agua a tratar es consistente con el tipo de fuente de abastecimiento, e indican que tiene una muy baja concentración de compuestos oxidables. Además, se puede observar que el ozono sufre una descomposición de primer orden con respecto a la concentración de ozono debido a la alta correlación que existe entre los datos experimentales y la ecuación cinética de utilizada.

Se puede observar que a medida que se aumenta la dosis transferida de ozono en el agua, se incrementa el tiempo de vida media del ozono de manera lineal. Como se observará a continuación, estos bajos niveles de descomposición favorecen una

desinfección del agua a tratar que excede los estándares internacionales en términos del CT obtenido para alcanzar una desactivación de *Giardia*, *Cryptosporidium* y virus, sin la necesidad de utilizar dosis demasiado elevadas de ozono que pudieran comprometer la viabilidad del proyecto.

3.4 DISEÑO DE LA CÁMARA DE CONTACTO

Para el diseño de la cámara de contacto se siguieron los criterios citados en la literatura y se incorporaron las correlaciones experimentales obtenidas a partir de los experimentos de transferencia de masa. Los resultados obtenidos de las pruebas a escala de laboratorio, fueron utilizados para el dimensionamiento de las etapas de dicha cámara de contacto.

Los parámetros experimentales utilizados fueron los siguientes:

- Pruebas de demanda de ozono, la demanda de ozono observada de manera experimental en los pozos de Ciudad Universitaria fue casi nula, lo cual indica una baja presencia de compuestos oxidables, de haber sido alta la demanda de oxidante, sería necesario establecer los mecanismos de oxidación que intervienen en el tratamiento del agua para poder determinar y optimizar el tiempo de retención, la dosis y las condiciones hidrodinámicas necesarias para poder llevar a cabo el tratamiento de manera viable.
- Residual de ozono a los 60 segundos, el residual a los 60 segundos permitió identificar una descomposición de ozono de primer orden para poder estimar la concentración a la salida de la primera cámara de disolución.
- Tiempo de vida media del ozono, el tiempo de vida media del ozono resultó ser elevado, lo cual indica una muy baja presencia de contaminantes en el agua de los pozos. Este tiempo de vida media permite estimar la concentración residual de ozono a la salida de la (s) etapas del contactor en las que se lleva a cabo la adición de ozono. La concentración residual se estima mediante las siguientes ecuaciones:

$$k^* = \frac{\log_{10}(0.5)}{T_{1/2}}$$

En donde:

k^* : constante de pseudo primer orden de descomposición de ozono (min^{-1})

$T_{1/2}$: tiempo de vida media del ozono en el agua (min) calculado mediante la siguiente correlación experimental:

$$T_{1/2} = 84.273 \text{DOT} - 7.9049$$

En donde DOT es la dosis de ozono transferida en mg/l

Entonces:

$$[\text{O}_3]_r = \frac{[\text{O}_3]_{r=60s}}{[1 - k^* (\tau - 1)]}$$

En donde:

$[\text{O}_3]_r$: concentración de ozono residual a la salida de la etapa de ozonación (mg/l)

$[\text{O}_3]_{r=60s}$: concentración de ozono residual a los 60 segundos de reacción obtenidos de manera experimental (mg/l)

k^* : constante de pseudo primer orden de descomposición de ozono (min^{-1})

τ : tiempo de retención hidráulica de la etapa (min)

- Pruebas de transferencia de masa, las pruebas de transferencia de masa no se utilizaron de manera directa para el dimensionamiento de la cámara de contacto, sin embargo gracias a la gran cantidad de observaciones experimentales, fue posible desarrollar una ecuación empírica para el cálculo de la concentración residual a la salida de la etapa del contactor en la cual se adiciona ozono. Dicha correlación incorpora los parámetros de dosis de ozono transferido o DOT, G/L y el tiempo de retención hidráulica, la ecuación fue encontrada mediante una regresión multivariable utilizando Excel, y es la siguiente:

$$[\text{O}_3]_r = 0.179 - 0.095 \text{G/L} + 0.053 \text{DOT} + 0.010 \tau$$

En donde:

$[\text{O}_3]_r$: concentración de ozono residual a la salida de la etapa de disolución (mg/l)

G/L : relación de flujo gas-líquido

DOT : dosis de ozono transferida (mg/l)

τ : tiempo de retención hidráulica de la etapa (min)

La ordenada al origen de la ecuación tiene un valor de 0.179

Resultados:

Se tomaron en cuenta 3 escenarios de desinfección objetivo para el dimensionamiento de las cámaras de contacto y se diseñaron de acuerdo a la metodología establecida en la sección 2.4.1:

Escenario 1. Dentro del primer escenario se utilizó el requerimiento establecido por la USEPA de una desactivación 1-log de *Cryptosporidium* para aguas sin pre-tratamiento físico y cuya concentración de *Cryptosporidium* estimada es de menos de 1 quiste por L de agua.

Las características operativas del sistema de desinfección encontradas fueron las siguientes:

Tabla 3.13 Características de operación de la cámara de contacto bajo el escenario 1 de desinfección

Flujo volumétrico nominal de agua (l/s)	95
Flujo volumétrico nominal de agua (m ³ /día)	4,104
Temperatura del agua (°C)	19
Relación gas-líquido (G/L)	0.15
Flujo volumétrico del gas (l/s)	14.3
Concentración de ozono a la entrada (mg/l)	6.44
Producción de ozono (kg/h)	0.33
Eficiencia de transferencia de masa	90%
Dosis de ozono aplicada (mg/l)	0.97
Dosis de ozono transferida (mg/l)	0.87
Tiempo de vida media del ozono en el agua (min)	65.36
Constante de descomposición del ozono en el agua k* (min ⁻¹)	-0.0046
Residual a los 60 segundos del ozono (mg/l)	0.76
Tiempo de retención hidráulica del contactor (min)	14
Número de etapas	6

La desinfección alcanzada por etapas fue la siguiente (no se considera que existe una desinfección en la primera etapa de acuerdo a los criterios establecidos por la USEPA):

Tabla 3.14 Desinfección por etapas para *Cryptosporidium*, *Giardia* y Virus bajo el escenario 1 de desinfección

Etapa	TRH (min ⁻¹)	[O ₃] _r (mg/l)	CT (mg/l min)	Desactivación log		
				<i>Cryptosporidium</i>	<i>Giardia</i>	Virus
1	2.33	0.480	-	-		
2	2.33	0.475	1.11	0.20	4.47	11.40
3	2.33	0.473	1.10	0.20	4.45	11.35
4	2.33	0.468	1.09	0.20	4.40	11.23
5	2.33	0.463	1.08	0.20	4.36	11.11
6	2.33	0.458	1.07	0.20	4.31	10.99
Total	14.00	NA	5.45	1.00	21.99	56.08
Porcentaje de remoción acumulado				90%	100%	100%

Para el dimensionamiento del contactor se tomó en cuenta una altura de 4 metros para cada una de las etapas y una relación de longitud entre ancho (L/A) de 1.5. Las dimensiones de cada una de las etapas son las siguientes:

Tabla 3.15 Dimensionamiento por etapas para la cámara de contacto bajo el escenario 1 de desinfección

Etapa	Altura (m)	Ancho (m)	Longitud (m)	Volumen (m ³)
1	4.00	1.49	2.23	13.30
2	4.00	1.49	2.23	13.30
3	4.00	1.49	2.23	13.30
4	4.00	1.49	2.23	13.30
5	4.00	1.49	2.23	13.30
6	4.00	1.49	2.23	13.30
Total	4.00	1.49	13.4	79.80

Escenario 2. En el segundo escenario se implementó el requerimiento de desactivación de *Giardia* y virus de 3-log y 4-log respectivamente, que son los mínimos aceptables por la USEPA para sistemas de agua sin pre-tratamiento físico. Es importante mencionar que los parámetros de desinfección alcanzados fueron mayores a los propuestos por la

USEPA debido a que se consideró adecuado utilizar una concentración de ozono a la entrada no menor a los 5 mg/l, ya que los generadores de ozono comerciales difícilmente trabajan a concentraciones menores los generadores para laboratorio pueden resultar inconvenientes si la demanda de ozono de los pozos sufre incrementos abruptos.

Las características operativas del sistema de desinfección encontradas fueron las siguientes:

Tabla 3.16 Características de operación de la cámara de contacto bajo el escenario 2 de desinfección

Flujo volumétrico nominal de agua (l/s)	95
Flujo volumétrico nominal de agua (m ³ /día)	4,104
Temperatura del agua (°C)	19
Relación gas-líquido (G/L)	0.15
Flujo volumétrico del gas (l/s)	14.3
Concentración de ozono a la entrada (mg/l)	5.34
Producción de ozono (kg/h)	0.27
Eficiencia de transferencia de masa	90%
Dosis de ozono aplicada (mg/l)	0.80
Dosis de ozono transferida (mg/l)	0.72
Tiempo de vida media del ozono en el agua (min)	52.85
Constante de descomposición del ozono en el agua k* (min ⁻¹)	-0.0057
Residual a los 60 segundos del ozono (mg/l)	0.59
Tiempo de retención hidráulica del contactor (min)	8
Número de etapas	4

La desinfección alcanzada por etapas fue la siguiente (no se considera que existe una desinfección en la primera etapa de acuerdo a los criterios establecidos por la USEPA):

Tabla 3.17 Desinfección por etapas para *Cryptosporidium*, *Giardia* y Virus bajo el escenario 2 de desinfección

Etapa	TRH (min ⁻¹)	[O ₃], (mg/l)	CT (mg/l min)	Desactivación log		
				<i>Cryptosporidium</i>	<i>Giardia</i>	Virus
1	2.00	0.406	-	-		
2	2.00	0.402	0.80	0.16	3.24	8.26
3	2.00	0.400	0.80	0.15	3.22	8.22
4	2.00	0.395	0.79	0.15	3.18	8.12
Total	8.00	NA	2.39	0.46	9.64	24.6
Porcentaje de remoción acumulado				66%	100%	100%

Para el dimensionamiento del contactor se tomó en cuenta una altura de 4 metros para cada una de las etapas y una relación de longitud entre ancho (L/A) de 1.5. Las dimensiones de cada una de las etapas son las siguientes:

Tabla 3.18 Dimensionamiento por etapas para la cámara de contacto bajo el escenario 2 de desinfección

Etapa	Altura (m)	Ancho (m)	Longitud (m)	Volumen (m ³)
1	4.00	1.38	2.07	11.40
2	4.00	1.38	2.07	11.40
3	4.00	1.38	2.07	11.40
4	4.00	1.38	2.07	11.40
Total	4.00	1.38	8.27	45.60

Escenario 3. En el tercer escenario se utilizó únicamente el criterio de desinfección de 4-log para virus. Si bien este criterio de desinfección cae fuera de los requerimientos establecidos por la USEPA, se considera que por la fuente de originación y la calidad del agua reportada en los informes de PUMAGUA, establecer un criterio adicional de 3-log para *Giardia* y 1-log para *Cryptosporidium* resultaría conservador. De elegirse trabajar bajo este escenario de desinfección se podría trabajar con un generador de ozono escala planta piloto, sin embargo de existir un deterioro importante en la calidad del agua del pozo este tipo de generadores podrían resultar inconvenientes.

Las características operativas del sistema de desinfección encontradas fueron las siguientes:

Tabla 3.19 Características de operación de la cámara de contacto bajo el escenario 3 de desinfección

Flujo volumétrico nominal de agua (l/s)	95
Flujo volumétrico nominal de agua (m ³ /día)	4,104
Temperatura del agua (°C)	19
Relación gas-líquido (G/L)	0.15
Flujo volumétrico del gas (l/s)	14.3
Concentración de ozono a la entrada (mg/l)	1.11
Producción de ozono (kg/h)	0.06
Eficiencia de transferencia de masa	90%
Dosis de ozono aplicada (mg/l)	0.17
Dosis de ozono transferida (mg/l)	0.15
Tiempo de vida media del ozono en el agua (min)	4.74
Constante de descomposición del ozono en el agua k* (min ⁻¹)	-0.0635
Residual a los 60 segundos del ozono (mg/l)	0.06
Tiempo de retención hidráulica del contactor (min)	6
Número de etapas	2

La desinfección alcanzada por etapas fue la siguiente (no se considera que existe una desinfección en la primera etapa de acuerdo a los criterios establecidos por la USEPA):

Tabla 3.20 Desinfección por etapas para *Cryptosporidium*, *Giardia* y Virus bajo el escenario 3 de desinfección

Etapa	TRH (min ⁻¹)	[O ₃] _r (mg/l)	CT (mg/l min)	Desactivación log		
				<i>Cryptosporidium</i>	<i>Giardia</i>	Virus
1	2.00	0.125	-	-		
2	4.00	0.097	0.39	0.08	1.57	4.00
Total	6.00	NA	0.39	0.08	1.57	4.00
Porcentaje de remoción acumulado				17%	97%	100%

Para el dimensionamiento del contactor se tomó en cuenta una altura de 4 metros para cada una de las etapas y una relación de longitud entre ancho (L/A) de 1.5. Las dimensiones de cada una de las etapas son las siguientes:

Tabla 3.21 Dimensionamiento por etapas para la cámara de contacto bajo el escenario 3 de desinfección

Etapa	Altura (m)	Ancho (m)	Longitud (m)	Volumen (m ³)
1	4.00	1.38	2.07	11.40
2	4.00	1.38	4.14	22.80
Total	4.00	1.38	6.20	34.20

Como se puede observar, la concentración de ozono necesaria para alcanzar los dos primeros escenarios de desinfección propuestos no varían mucho, el tercer escenario presenta una disminución significativa en la dosis de ozono aplicada y por lo tanto una menor concentración de ozono a la entrada del contactor. El volumen de la cámara de contacto también es proporcional al nivel de desinfección objetivo ya que para alcanzar la desactivación de microorganismos como *Cryptosporidium* y *Giardia*, es necesario un mayor tiempo de residencia o una mayor concentración de ozono para alcanzar los valores de CT requeridos. Desde el punto de vista de los criterios de desinfección establecidos por la USEPA para agua potable, el escenario más adecuado es el primero, sin embargo el tercer escenario puede ser suficiente para alcanzar una desinfección total del agua del pozo multifamiliar debido a las características fisicoquímicas y bacteriológicas del agua. Es importante mencionar que al tratarse de agua con presencia de ozono disuelto, para todos los casos sería indispensable un cambio de tubería en la zona mas cercana a la planta de tratamiento. Se considera que los tres escenarios son adecuados para el tratamiento del agua del pozo multifamiliar, pero al tratarse de agua subterránea, el escenario 3 representa una ventaja en términos del área de construcción requerida y el costo del equipo de la planta. El escenario 1 y 2 presentan una ventaja ya que se encuentran diseñados bajo criterios USEPA y en el caso de que hubiera una alteración en la calidad del agua, no se requerirían alteraciones en la dosis de ozono aplicada. En todos los casos es recomendable llevar a cabo un constante monitoreo de la calidad del agua, así como el tiempo de vida media del ozono y la demanda para asegurar una operación adecuada de la planta de tratamiento.

3.5 ANÁLISIS DE COSTOS

Para la estimación de los costos operativos y de instalación del sistema de ozonación se utilizó la metodología descrita en el marco teórico apartado 2.6 (Langlais, 1991) y pueden variar con el tiempo. En los costos de capital se ajustaron los costos por inflación con respecto a la fecha para la cual esta propuesta dicha metodología y se utilizó el valor de 12.1 pesos mexicanos por dólar. Con respecto a los costos de operación esto no fue necesario, ya que se utilizaron los valores actuales de energía y se consideró que ésta sigue representando aproximadamente el 75% de los costos totales de operación.

Tabla 3.22 Costos de capital de la planta (Escenario 1)

Nombre de la planta: Pozo Multifamiliar CU		
1. Diseño	Flujo de agua	4,104.00 m ³ /día
		4.10 miles de m ³ /día
	Dosis de ozono	0.97 mg/L
	Producción de ozono	3.96 kg/día
	Capacidad de generación instalada	6.00 kg/día
2. Costo de la unidad de ozonación		9,068.88 US\$/kg/día
3. Costo pronosticado del equipo		54,413.26 US\$
4. Tiempo de retención hidráulico del contactor		14.00 min
5. Costo pronosticado del contactor		324,971.48 US\$
6. Área de construcción estimada		1.07 m ² /kg/día
7. Área de construcción calculada		6.40 m ²
8. Costo de construcción estimado		1,612.00 \$USD/m ²
9. Costo pronosticado de construcción		10,315.13 US\$
10. Costo total estimado del sistema de ozonación (1991)		389,699.87 US\$
10. Costo total estimado del sistema de ozonación (2010)		614,986.31 US\$
10. Costo total estimado del sistema de ozonación		7,441,334.33 \$

Tabla 3.23 Costos de operación de la planta (Escenario 1)

Nombre de la planta: Pozo Multifamiliar CU		
1. Producción de ozono		
Flujo anual promedio	4,104.00	m ³ /día
Dosis anual promedio	0.97	mg/L
Producción anual promedio	3.96	kg/día
2. Energía específica estimada requerida por el sistema		
	26.00	kWh/kg
3. Promedio de energía consumida por día		
	103.08	kWh/día
4. Costo estimado de energía		
	0.75	\$/kWh
5. Costo promedio de energía por día		
	77.31	\$/día
6. Costo promedio anual de energía		
	28,217.07	\$/año
7. Porcentaje estimado del costo de solo la energía		
	75.00	%
8. Estimado de "otros" costos de operación y mantenimiento		
	9,405.69	\$/año
9. Costo total estimado de operación y mantenimiento		
	37,622.76	\$/año

Tabla 3.24 Costos de capital de la planta (Escenario 2)

Nombre de la planta: Pozo Multifamiliar CU			
1. Diseño	Flujo de agua	4,104.00	m ³ /día
		4.10	miles de m ³ /día
	Dosis de ozono	0.80	mg/L
	Producción de ozono	3.29	kg/día
	Capacidad de generación instalada	5.00	kg/día
2. Costo de la unidad de ozonación		9,844.02	US\$/kg/día
3. Costo pronosticado del equipo		49,220.12	US\$
4. Tiempo de retención hidráulico del contactor		10.00	min
5. Costo pronosticado del contactor		324,971.48	US\$
6. Área de construcción estimada		1.07	m ² /kg/día
7. Área de construcción calculada		5.33	m ²
8. Costo de construcción estimado		1,612.00	\$USD/m ²
9. Costo pronosticado de construcción		8,595.95	US\$
10. Costo total estimado del sistema de ozonación (1991)		382,787.55	US\$
10. Costo total estimado del sistema de ozonación (2010)		604,077.96	US\$
10. Costo total estimado del sistema de ozonación		7,309,343.28	\$

Tabla 3.25 Costos de operación de la planta (Escenario 2)

Nombre de la planta: Pozo Multifamiliar CU		
1. Producción de ozono		
Flujo anual promedio	4,104.00	m ³ /día
Dosis anual promedio	0.80	mg/L
Producción anual promedio	3.29	kg/día
2. Energía específica estimada requerida por el sistema		
	26.00	kWh/kg
3. Promedio de energía consumida por día		
	85.47	kWh/día
4. Costo estimado de energía		
	0.75	\$/kWh
5. Costo promedio de energía por día		
	64.11	\$/día
6. Costo promedio anual de energía		
	23,398.59	\$/año
7. Porcentaje estimado del costo de solo la energía		
	75.00	%
8. Estimado de "otros" costos de operación y mantenimiento		
	7,799.53	\$/año
9. Costo total estimado de operación y mantenimiento		
	31,198.12	\$/año

Tabla 3.26 Costos de capital de la planta (Escenario 3)

Nombre de la planta: Pozo Multifamiliar CU			
1. Diseño	Flujo de agua	4,104.00	m ³ /día
		4.10	miles de m ³ /día
	Dosis de ozono	0.17	mg/L
	Producción de ozono	0.68	kg/día
	Capacidad de generación instalada	2.00	kg/día
2. Costo de la unidad de ozonación		19,578.60	US\$/kg/día
3. Costo pronosticado del equipo		39,157.21	US\$
4. Tiempo de retención hidráulico del contactor		6.00	min
5. Costo pronosticado del contactor		324,971.48	US\$
6. Área de construcción estimada		1.07	m ² /kg/día
7. Área de construcción calculada		2.13	m ²
8. Costo de construcción estimado		1,612.00	\$USD/m ²
9. Costo pronosticado de construcción		3,438.39	US\$
10. Costo total estimado del sistema de ozonación (1991)		367,567.08	US\$
10. Costo total estimado del sistema de ozonación (2010)		580,058.49	US\$
10. Costo total estimado del sistema de ozonación		7,018,707.74	\$

Tabla 3.27 Costos de operación de la planta (Escenario 3)

Nombre de la planta: Pozo Multifamiliar CU		
1. Producción de ozono		
Flujo anual promedio	4,104.00	m ³ /día
Dosis anual promedio	0.17	mg/L
Producción anual promedio	0.68	kg/día
2. Energía específica estimada requerida por el sistema		
	26.00	kWh/kg
3. Promedio de energía consumida por día		
	17.79	kWh/día
4. Costo estimado de energía		
	0.75	\$/kWh
5. Costo promedio de energía por día		
	13.34	\$/día
6. Costo promedio anual de energía		
	4,868.93	\$/año
7. Porcentaje estimado del costo de solo la energía		
	75.00	%
8. Estimado de "otros" costos de operación y mantenimiento		
	1,622.98	\$/año
9. Costo total estimado de operación y mantenimiento		
	6,491.91	\$/año

Análisis de resultados

Bajo la metodología propuesta el escenario más adecuado para la implementación del sistema de ozonación es el primero. Éste se justifica debido a que asegura una desinfección más eficiente y cumple con los estándares de calidad establecidos por la USEPA, aunque el costo es más elevado

Se considera que el escenario 3, es una opción para países como el nuestro en donde los recursos son limitados y puesto que se requiere de una menor producción de ozono se prevee un menor costo. Esta tecnología podría instalarse por etapas cubriendo con esta propuesta solo las necesidades para los próximos 5 años.

Por otra parte, se tendrá que vigilar con un programa de monitoreo si la calidad del agua de la fuente de suministro conserva sus características dentro de la norma correspondiente. Como podemos observar el gasto principal en la implementación del sistema de ozonación son los costos de capital, es decir los costos que se dan al inicio, en la construcción del sistema.

Los costos de operación representan un gasto relativamente bajo, ya que la materia prima es aire y 75% de estos costos se dan por la energía consumida, esto implica también que sean más acertados que los de capital, debido a que los costos de energía (\$/kWh) pueden

obtenerse específicamente para el sitio donde van a aplicarse. Debido a que la energía es el parámetro central de ésta estimación, para calcular los costos totales de operación, las variables principales son: la producción anual promedio de ozono, la cantidad de energía requerida para producirlo, que es generalmente 26 kWh/kg; y el costo estimado de energía expresado en que actualmente en México es de 0.75 \$/KWh.

Es sumamente importante mencionar que la metodología aquí propuesta es preliminar y que se basa exclusivamente en las condiciones de flujo de agua y de producción de ozono de las plantas, se puede observar que el costo del contactor para ambos escenarios es el mismo debido a que este se calcula con el flujo de agua y no con el tiempo de retención hidráulica. Será sumamente importante que en caso de implementarse el sistema se realice una cotización con empresas especializadas para conocer el costo exacto del sistema de ozonación. Este trabajo se considera un ejercicio preliminar y no definitivo para la implementación del sistema de ozonación en el pozo multifamiliar.

CAPÍTULO 4: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Demanda de ozono

La demanda de ozono del agua es un parámetro de suma importancia para el diseño de un sistema de ozonación, cuando el objetivo principal es la desinfección, debido a que incide significativamente en los requerimientos de ozono para el proceso. En el caso del agua de abastecimiento de Ciudad Universitaria, se concluye que ésta se caracteriza por la baja demanda de ozono que presenta, atribuible a su excelente calidad y bajo contenido de materia oxidable, características de las fuentes de agua subterránea.

Las reacciones que ocurren en esta agua de abastecimiento muestran una cinética rápida (demanda inmediata), atribuible en parte a que el potencial de oxidación de ozono es muy alto y que este puede reaccionar no solo en forma directa como ozono molecular sino también en forma indirecta en radicales libres OH^\cdot . En aguas naturales, parte de los radicales OH^\cdot reaccionan con bicarbonatos o con solutos orgánicos no específicos, que actúan como scavengers (atrapadores), y otra fracción reacciona con los contaminantes específicos. Podemos concluir que el agua a desinfectar en este caso de estudio, es una agua “limpia”, ya que la segunda reacción se llevó a cabo rápidamente, lo que se traduce en una baja concentración de scavengers y contaminantes específicos.

En este caso la baja demanda de oxidante obtenida concuerda con los resultados de las pruebas de vida media del ozono, los cuales muestran que ésta es relativamente larga. Al tener una demanda de ozono baja, implica que hay pocas impurezas disponibles en agua para reaccionar, y por lo tanto el ozono permanece estable por un mayor tiempo.

A pesar de que en este momento la demanda de ozono del agua de abastecimiento de CU es muy baja, lo cual implica que es de muy buena calidad y la cantidad de contaminantes orgánicos e inorgánicos sea prácticamente nula, no hay forma de asegurar que permanecerá de esta forma en el futuro, por lo que se considera necesario contar con un sistema de desinfección como el propuesto que nos permita tener agua de excelente calidad para el consumo humano y establecer objetivos de desinfección de acuerdo con los límites establecidos por otros países con criterios más estrictos (como la USEPA por ejemplo), ya que mientras menos permisivos sean estos límites mayor será la confianza en la calidad del agua y en el consumo seguro de ésta.

Transferencia de masa

La transferencia de masa juega un papel sumamente importante en la aplicación de sistemas de tratamiento de agua por ozonación, especialmente en los que existe presencia de contaminantes que tienen una cinética de reacción rápida con el ozono en fase acuosa.

En el caso del agua del pozo multifamiliar, las pruebas de transferencia de masa reflejaron una dependencia fuerte entre el coeficiente global de transferencia de masa y la velocidad superficial del gas en la columna de ozonación, pero también se encontró que la velocidad superficial del líquido juega un papel importante.

Las pruebas de transferencia de masa permitieron establecer correlaciones importantes entre la concentración de ozono residual esperada en función de tres parámetros clave para el diseño de una cámara de contacto; la dosis de ozono transferida, la relación de flujo gas-líquido o G/L, y el tiempo de retención hidráulica dentro de la cámara de contacto

Vida media del ozono en el agua y residual a los 60 segundos de reacción

La vida media del ozono en el agua y el residual a los 60 segundos de reacción son pruebas a escala laboratorio esenciales para poder llevar a cabo una caracterización del agua a tratar en un proceso de potabilización. El tiempo de vida media del ozono en el agua permite conocer la constante de descomposición de primer orden y con eso -en conjunto con el valor esperado de concentración residual a los 60 segundos de reacción- estimar la concentración residual del ozono a la salida de la primera cámara de contacto.

El tiempo de vida media del ozono en las pruebas efectuadas sobre el agua del pozo multifamiliar reflejan la baja presencia de contaminantes que esta tiene.

Es importante mencionar que la constante de descomposición de ozono no siempre resulta ser de primer orden, en dichos casos es necesario llevar a cabo un análisis más profundo del comportamiento cinético del ozono con los contaminantes específicos presentes en el agua.

Para poder asegurar un buen funcionamiento y monitoreo de una planta de ozonación es recomendable llevar a cabo este tipo de pruebas de manera periódica, ya que la presencia de oxidables en el agua puede variar a lo largo del tiempo.

Diseño de la cámara de contacto

Se propusieron tres opciones para el diseño de la cámara de contacto tomando en cuenta estándares de desinfección establecidos por la USEPA y aplicando criterios de concentración de ozono residual establecidos por la Unión Europea. Si bien el agua de los pozos de Ciudad Universitaria presenta ausencia de contaminantes microbiológicos, es importante seguir los lineamientos establecidos para garantizar su calidad microbiológica.

La dosis de ozono, y por lo tanto la producción de ozono en kg/h necesario para la desinfección del agua del pozo Multifamiliar de Ciudad universitaria resulto ser muy baja, esto se debe a la calidad y el tipo de fuente de abastecimiento (subterránea). Las pruebas a nivel laboratorio tales como la demanda, el tiempo de vida media y el residual a los 60 segundos de ozono en el agua, indican que se puede mantener una concentración residual por periodos largos de tiempo sin la necesidad de aplicar una dosis demasiado elevada.

Es importante mencionar que el dimensionamiento de la cámara de contacto ha de servir como un ejercicio preliminar para evaluar la viabilidad de aplicar un sistema de ozonación para la potabilización de agua en Ciudad Universitaria. En caso de aceptarse dicha aplicación sería necesario consultar y hacer una cotización con una empresa especializada en la instalación de plantas de ozonación.

Un inconveniente que se presenta para instalar un proceso de ozonación en el pozo Multifamiliar de Ciudad Universitaria es que la extracción de agua no es un proceso continuo. El pozo multifamiliar opera de manera intermitente durante aproximadamente 12 horas al día, posteriormente el agua que se extrae del pozo se almacena en el tanque alto. Esto presenta un problema para la instalación de un sistema de ozonación por 2 principales razones:

- a) La operación de una cámara de contacto requiere alcanzar un estado estacionario para asegurar una concentración residual de ozono constante a la salida del mismo. Este problema se puede solucionar incrementando la dosis de ozono durante la etapa de arranque para asegurar una desinfección adecuada, pero es difícil de controlar y monitorear
- b) El agua que permanece en los tanques de almacenamiento pierde la concentración de ozono residual a lo largo del tiempo y puede sufrir una re-contaminación

Se recomienda que este trabajo se complemente con un análisis para determinar la ubicación de la aplicación del desinfectante secundario, con el fin de asegurar que el agua

no se contamine entre el punto de extracción y el punto de consumo. Una de las principales razones por las cuales se propuso la instalación de ozono como reemplazo al sistema actual es porque este no altera el sabor del agua. Si se determina que la concentración de cloro aplicada deberá ser la misma que se aplica actualmente, consideramos que la aplicación de un sistema de ozonación resultara redundante, y sus beneficios no se verán reflejados para la comunidad de Ciudad Universitaria que consume el agua de la red.

Análisis de costos

Los costos de capital son los más difíciles de estimar, ya que se deben tomar en cuenta factores tales como: el nivel de instrumentación y automatización, los costos locales de construcción, la cantidad de tubería, entre otros. Sin embargo el método utilizado es simple y cercano al real ya que toma en cuenta los parámetros que más impactan estos costos, que son: el equipo de ozonación, el contactor y la construcción. Para estimar el costo del equipo de ozonación las variables principales son la producción de ozono por día y la capacidad de generación instalada; para el del contactor el flujo de agua y el tiempo de retención hidráulico; y para el de construcción el área, basada en la capacidad de generación instalada.

El costo de total de capital, o de implementación del sistema estimado es de alrededor de 7.44 millones de pesos para el escenario 1 y de 7 millones para el escenario 3, lo cual es relativamente alto con respecto a otros sistemas de desinfección como la adición de hipoclorito de sodio como único desinfectante, debido a que se requiere construir un contactor, los generadores de ozono tienen un costo elevado y el sistema en sí es más complejo. Sin embargo el costo total de operación y mantenimiento estimado anual cercano a los 38 mil pesos para el escenario 1 y 6,500 pesos para el escenario 3, es muy bajo ya que no se necesita comprar materia prima, manejo de inventarios, ni costos de almacenamiento.

Tomando lo anterior en cuenta, la implementación del sistema de ozonación es viable en el aspecto de costos, siempre y cuando el agua se utilice realmente para el consumo humano. Con esta implementación se podría eliminar paulatinamente el consumo de agua embotellada, lo cual implica una reducción en el impacto ambiental y un ahorro significativo para la UNAM y su comunidad.

Durante el tiempo que se realizó la experimentación se trató de obtener cotizaciones de sistemas de ozonación de empresas especializadas, pero no se logró obtener información. Se

recomienda partir de una cotización actualizada estableciendo los siguientes criterios de operación: flujo de agua 1080 m³/día, dosis de ozono requerida: 1.20 mg/L y capacidad de generación instalada de 5 Kg de ozono por día.

Recomendaciones para la implementación adecuada del sistema de ozonación

En caso de aceptarse la implementación de un proceso de ozonación para la desinfección del agua proveniente del pozo multifamiliar de Ciudad Universitaria, será de suma importancia llevar a cabo un monitoreo constante de este sistema y será necesario llevar a cabo una capacitación adecuada para los operadores. La desinfección con ozono presenta características específicas a diferencia de otros desinfectantes por las cuales es importante el monitoreo constante de este tipo de sistemas:

- a) La generación del ozono se hace *in situ* y el equipo utilizado para tal propósito (v.gr., corona de descarga) se puede ver afectado por condiciones externas tales como la humedad del aire, trayendo como consecuencia una disminución en la concentración de ozono generada
- b) La presencia de compuesto tales como bicarbonatos alteran la cinética de reacción del ozono en el agua, lo cual puede traer como consecuencia una concentración de ozono residual menor a la esperada
- c) La temperatura del agua altera la solubilidad y el tiempo de vida media del ozono en el agua, esto no ocurre con desinfectantes como el hipoclorito de sodio
- d) En general, los sistemas de ozonación requieren un mayor nivel de instrumentación que los otros tipos de desinfectantes y por lo mismo requieren de personal calificado para operarlos.

La USEPA, así como los países de la Unión Europea tienen diferentes lineamientos para el monitoreo de los sistemas de desinfección por ozono, en este trabajo se presenta la metodología propuesta por la USEPA dentro del anexo A3.

Conclusiones generales

- a. Es importante hacer énfasis en que la aplicación del sistemas de ozonación en los pozo de Ciudad Universitaria solo se justifican si la aplicación de dichos sistemas está acompañado de una fuerte promoción en el uso del agua de la red para consumo, en lugar del agua embotellada.
- b. Para lograr los propósitos de consumo de agua proveniente de los pozos de Ciudad Universitaria será de gran importancia un manejo adecuado de las redes de distribución así como la instalación de sistemas de dosificación de desinfectantes secundarios para asegurar la calidad del agua entre el punto de desinfección primaria y el consumo humano
- c. A largo plazo el uso de agua potable para inodoros es recomendable que se sustituya por agua de reúso.
- d. La ozonación es un método muy eficiente para la desinfección de agua, ya que requiere un tiempo de contacto corto para eliminar a los microorganismos presentes en ésta y no es propenso a la formación de subproductos en la desinfección; es económico en el mantenimiento ya que la materia prima del mismo es aire; sin embargo la inversión inicial es fuerte y debido a las características del mismo no es capaz de dejar un residual por lo que es conveniente complementarlo con cloro, que como bien se sabe, es capaz de hacerlo. Es importante mencionar también que la implementación del sistema de desinfección a base de ozono es mucho menos riesgoso que otros, como los que son a base de cloro gas, lo cual junto con sus las propiedades desinfectantes lo hacen una buena opción.

ANEXOS

ANEXO 1. UBICACIÓN DE LOS POZOS DE C.U.

Figura A.1: Ubicación de los pozos del sistema de abastecimiento de agua potable de Ciudad Universitaria



ANEXO 2. DETALLE DE RESULTADOS DE LAS PRUEBAS DE DEMANDA DE OZONO

Pozo 1 Química

Prueba 1 $T=18^{\circ}C$

Tabla A.2.1 Demanda de ozono del pozo de Química, prueba 1

CONDICIONES EXPERIMENTALES	
Concentración de saturación del agua (mg/l)	1.950
Volumen de agua saturada adicionada a la muestra (l)	0.0001
Cantidad de ozono (mg)	0.000194976
Volumen de la muestra (ml)	30
Dosis de ozono transferida (mg/l)	0.0065

ABSORBANCIAS (UV 254 nm)	
Blanco Indigo 1	0.047
Blanco Indigo 2	0.334
Solución saturada	0.107
	0.145
Concentración	2.128
	1.772
Promedio	1.9498

Volumen de agua saturada adicionada (ml)	Absorbancia (UV 254 nm)	CR (mg/l)	DOT (mg/l)	DOT acum.(mg/l)
0.1	0.047	0.0000	0.0065	0.006
0.2	0.047	0.0000	0.0065	0.013
0.3	0.046	0.0047	0.0065	0.019
0.4	0.045	0.0094	0.0065	0.026
0.5	0.044	0.0141	0.0065	0.032
0.6	0.042	0.0234	0.0065	0.039

Donde:

C_R = Ozono residual obtenido por colorimetría (mg/L)

DOT= Dosis de ozono transferido (mg/L)

Prueba 2 $T=19^{\circ}C$

Tabla A.2.2 Demanda de ozono del pozo de Química, prueba 2

CONDICIONES EXPERIMENTALES	
Concentración de saturación del agua (mg/l)	2.222
Volumen de agua saturada adicionada a la muestra (l)	0.0001
Cantidad de ozono (mg)	0.00022216
Volumen de la muestra (ml)	30

Dosis de ozono transferida (mg/l)	0.0074
-----------------------------------	--------

ABSORBANCIAS (UV 254 nm)	
Blanco Índigo 1	0.045
Blanco Índigo 2	0.318
Solución saturada	0.094
	0.1
	2.250
Concentración	2.193
Promedio	2.2216

Volumen de agua saturada adicionada (ml)	Absorbancia (UV 254 nm)	CR (mg/l)	DOT (mg/l)	DOT acum.(mg/l)
0.1	0.045	0.0000	0.0074	0.007
0.2	0.043	0.0094	0.0074	0.015
0.3	0.042	0.0141	0.0074	0.022
0.4	0.04	0.0234	0.0074	0.030
0.5	0.04	0.0234	0.0074	0.037
0.6	0.04	0.0234	0.0074	0.044

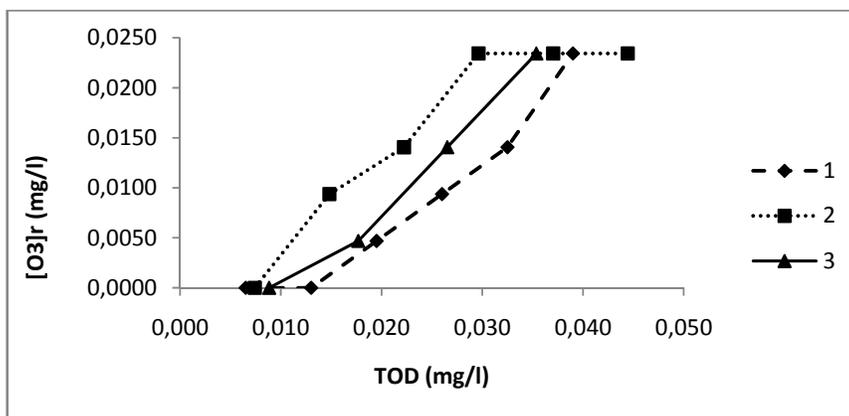
Prueba 3 $T=18.5^{\circ}C$

Tabla A.2.3 Demanda de ozono del pozo de Química, prueba 3

CONDICIONES EXPERIMENTALES	
Volumen de agua saturada adicionada a la muestra (l)	2.653
Cantidad de ozono (mg)	0.0001
Volumen de la muestra (ml)	0.000265279
Dosis de ozono transferida (mg/l)	30
Volumen de agua saturada adicionada a la muestra (l)	0.0088

ABSORBANCIAS (UV 254 nm)	
Blanco Índigo 1	0.046
Blanco Índigo 2	0.311
Solución saturada	0.044
	0.058
	2.718
Concentración	2.587
Promedio	2.6528

Volumen de agua saturada adicionada (ml)	Absorbancia (UV 254 nm)	CR (mg/l)	DOT (mg/l)	DOT acum. (mg/l)
0.1	0.046	0.0000	0.0088	0.009
0.2	0.045	0.0047	0.0088	0.018
0.3	0.043	0.0141	0.0088	0.027
0.4	0.041	0.0234	0.0088	0.035
0.5	0.041	0.0328	0.0088	0.044
0.6	0.039		0.0088	0.053



Demanda de ozono promedio: 0.01 mg/L

Pozo 2 Multifamiliar

Prueba 1 $T=18^{\circ}\text{C}$

Tabla A.2.4 Demanda de ozono del pozo Multifamiliar, prueba 1

CONDICIONES EXPERIMENTALES	
Concentración de saturación del agua (mg/l)	1.575
Volumen de agua saturada adicionada a la muestra (l)	0.0001
Cantidad de ozono aplicada (mg)	0.00015748
Volumen de la muestra (ml)	30
Dosis de ozono transferida (mg/l)	0.0052
ABSORBANCIAS (UV 254 nm)	
Blanco Índigo 1	0.042
Blanco Índigo 2	0.328
Solución saturada	0.153
	0.167
Concentración	1.640
	1.509
Promedio	1,5748

Volumen de agua saturada adicionada (ml)	Absorbancia (UV 254 nm)	CR (mg/l)	DOT (mg/l)	DOT acum. (mg/l)
0.1	0.042	0.0000	0.0052	0.005
0.2	0.042	0.0000	0.0052	0.010
0.3	0.042	0.0000	0.0052	0.016
0.4	0.041	0.0047	0.0052	0.021
0.5	0.041	0.0047	0.0052	0.026
0.6	0.041	0.0047	0.0052	0.031

Prueba 2 $T=18.5^{\circ}C$

Tabla A.2.5 Demanda de ozono del pozo Multifamiliar, prueba 2

CONDICIONES EXPERIMENTALES	
Concentración de saturación del agua (mg/l)	1.842
Volumen de agua saturada adicionada a la muestra (l)	0.0001
Cantidad de ozono aplicada (mg)	0.000184196
Volumen de la muestra (ml)	30
Dosis de ozono transferida (mg/l)	0.0061

ABSORBANCIAS (UV 254 nm)	
Blanco Índigo 1	0.046
Blanco Índigo 2	0.332
Solución saturada	0.112
	0.151
Concentración	2.025
	1.659
Promedio	1.8420

Volumen de agua saturada adicionada (ml)	Absorbancia (UV 254 nm)	CR (mg/l)	DOT (mg/l)	DOT acum. (mg/l)
0.1	0.046	0.0000	0.0061	0.006
0.2	0.046	0.0000	0.0061	0.012
0.3	0.044	0.0094	0.0061	0.018
0.4	0.044	0.0094	0.0061	0.025
0.5	0.042	0.0187	0.0061	0.031
0.6	0.038	0.0375	0.0061	0.037

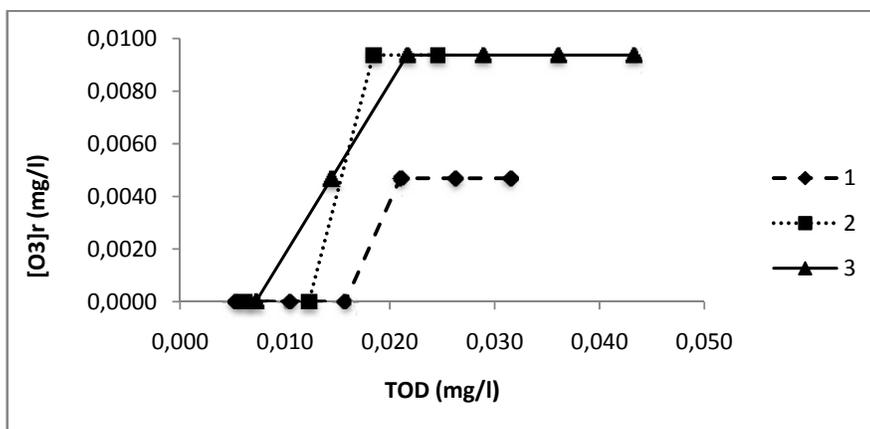
Prueba 3 $T=19^{\circ}C$

Tabla A.2.6 Demanda de ozono del pozo Multifamiliar, prueba 3

CONDICIONES EXPERIMENTALES	
Concentración de saturación del agua (mg/l)	2.165
Volumen de agua saturada adicionada a la muestra (l)	0.0001
Cantidad de ozono aplicada (mg)	0.000216535
Volumen de la muestra (ml)	30
Dosis de ozono transferida (mg/l)	0.0072

ABSORBANCIAS (UV 254 nm)	
Blanco Índigo 1	0.064
Blanco Índigo 2	0.311
Solución saturada	0.084
	0.11
Concentración	2.287
	2.043
Promedio	2.1654

Volumen de agua saturada adicionada (ml)	Absorbancia (UV 254 nm)	CR (mg/l)	DOT (mg/l)	DOT acum. (mg/l)
0.1	0.064	0.0000	0.0072	0.007
0.2	0.063	0.0047	0.0072	0.014
0.3	0.062	0.0094	0.0072	0.022
0.4	0.062	0.0094	0.0072	0.029
0.5	0.062	0.0094	0.0072	0.036
0.6	0.062	0.0094	0.0072	0.043



Demanda de ozono promedio: 0.012 mg/L

Pozo 3 Vivero Alto

Prueba 1 $T=18.5^{\circ}\text{C}$

Tabla A.2.7 Demanda de ozono del pozo del Vivero Alto, prueba 1

CONDICIONES EXPERIMENTALES	
Concentración de saturación del agua (mg/l)	1.725
Volumen de agua saturada adicionada a la muestra (l)	0.0001
Cantidad de ozono aplicada (mg)	0.000172478
Volumen de la muestra (ml)	30
Dosis de ozono transferida (mg/l)	0.0057

ABSORBANCIAS (UV 254 nm)	
Blanco Índigo 1	0.051
Blanco Índigo 2	0.34
Solución saturada	0.135
	0.176
	0.157
Concentración	1.922
	1.537
	1.715
	Promedio

Volumen de agua saturada adicionada (ml)	Absorbancia (UV 254 nm)	CR (mg/l)	DOT (mg/l)	DOT acum.(mg/l)
0.1	0.051	0.0000	0.0057	0.006
0.2	0.051	0.0000	0.0057	0.011
0.3	0.051	0.0000	0.0057	0.017
0.4	0.05	0.0047	0.0057	0.023
0.5	0.05	0.0047	0.0057	0.029
0.6	0.05	0.0047	0.0057	0.034

Prueba 2 $T=18^{\circ}C$

Tabla A.2.8 Demanda de ozono del pozo del Vivero Alto, prueba 2

CONDICIONES EXPERIMENTALES	
Concentración de saturación del agua (mg/l)	2.058
Volumen de agua saturada adicionada a la muestra (l)	0.0001
Cantidad de ozono aplicada (mg)	0.000205756
Volumen de la muestra (ml)	30
Dosis de ozono transferida (mg/l)	0.0069

ABSORBANCIAS (UV 254 nm)	
Blanco Índigo 1	0.046
Blanco Índigo 2	0.327
Solución saturada	0.101
	0.14
Concentración	2.240
	1.875
Promedio	2.0576

Volumen de agua saturada adicionada (ml)	Absorbancia (UV 254 nm)	CR (mg/l)	DOT (mg/l)	DOT acum.(mg/l)
0.1	0.046	0.0000	0.0069	0.007
0.2	0.046	0.0000	0.0069	0.014
0.3	0.046	0.0000	0.0069	0.021
0.4	0.045	0.0047	0.0069	0.027
0.5	0.043	0.0141	0.0069	0.034
0.6	0.043	0.0141	0.0069	0.041

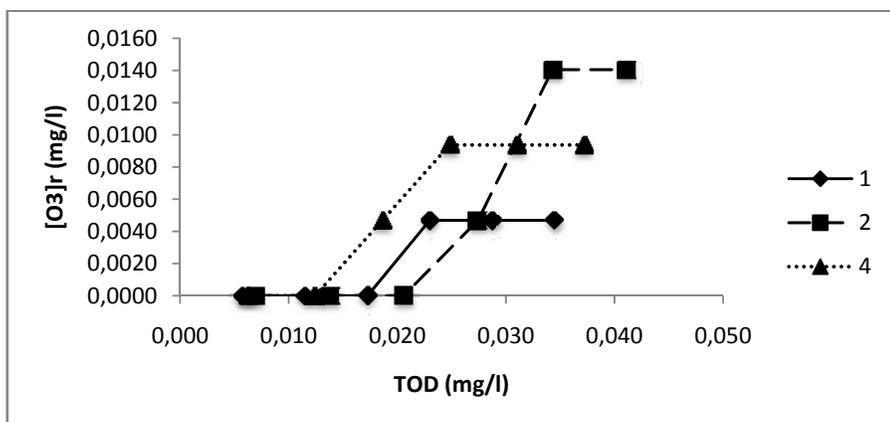
Prueba 3 $T=18^{\circ}C$

Tabla A.2.9 Demanda de ozono del pozo del Vivero Alto, prueba 3

CONDICIONES EXPERIMENTALES	
Concentración de saturación del agua (mg/l)	1.861
Volumen de agua saturada adicionada a la muestra (l)	0.0001
Cantidad de ozono aplicada (mg)	0.00018607
Volumen de la muestra (ml)	30
Dosis de ozono transferida (mg/l)	0.0062

ABSORBANCIAS (UV 254 nm)	
Blanco Índigo 1	0.065
Blanco Índigo 2	0.31
Solución saturada	0.103
	0.134
Concentración	2.006
	1.715
Promedio	1.8607

Volumen de agua saturada adicionada (ml)	Absorbancia (UV 254 nm)	CR (mg/l)	DOT (mg/l)	DOT acum.(mg/l)
0.1	0.065	0.0000	0.0062	0.006
0.2	0.065	0.0000	0.0062	0.012
0.3	0.064	0.0047	0.0062	0.019
0.4	0.063	0.0094	0.0062	0.025
0.5	0.063	0.0094	0.0062	0.031
0.6	0.063	0.0094	0.0062	0.037



Demanda de ozono promedio: 0.014 mg/L

ANEXO 3: METODO CSTR-MODIFICADO PARA EL MONITOREO DE SISTEMAS DE DESINFECCIÓN CON OZONO

Método CSTR-modificado:

Este método presenta la ventaja de poder estimar de manera más precisa la inactivación de *Cryptosporidium* que con los métodos de T_{10} y el CSTR. La gran ventaja de utilizar esta metodología es que se reduce la cantidad de ozono necesaria en el sistema y también se reduce la posibilidad de generar subproductos de desinfección. Es muy importante enfatizar que esta metodología no se ciñe únicamente a sistemas en los que se encuentran niveles detectables de *Cryptosporidium* si no que es un criterio de desinfección establecido como límite por la USEPA debido a la resistencia de este tipo de microorganismos a los desinfectantes. Dependiendo de los tratamientos precedentes a la desinfección y del origen del agua a tratar, la USEPA “acredita” ciertos valores de desinfección log para que los requisitos de desactivación por desinfección no requieran ser tan rigurosos. Como se verá en los capítulos subsecuentes, las características del agua de los pozos de Ciudad Universitaria (e.g., el tiempo de vida media del ozono en el agua y la constante k de descomposición), permiten utilizar este método sin la necesidad de “acreditar” desactivación logarítmica para el proceso de desinfección.

Para el uso de esta metodología es necesario el monitoreo de las reacciones de descomposición de ozono que se llevan a cabo a través del contactor. En principio, la cinética de reacción del ozono y las condiciones hidrodinámicas del contactor se asemejan a un reactor CSTR ideal. Esta aproximación se utiliza únicamente en las etapas de reacción consecutivas (mínimo 3) dentro del contactor.

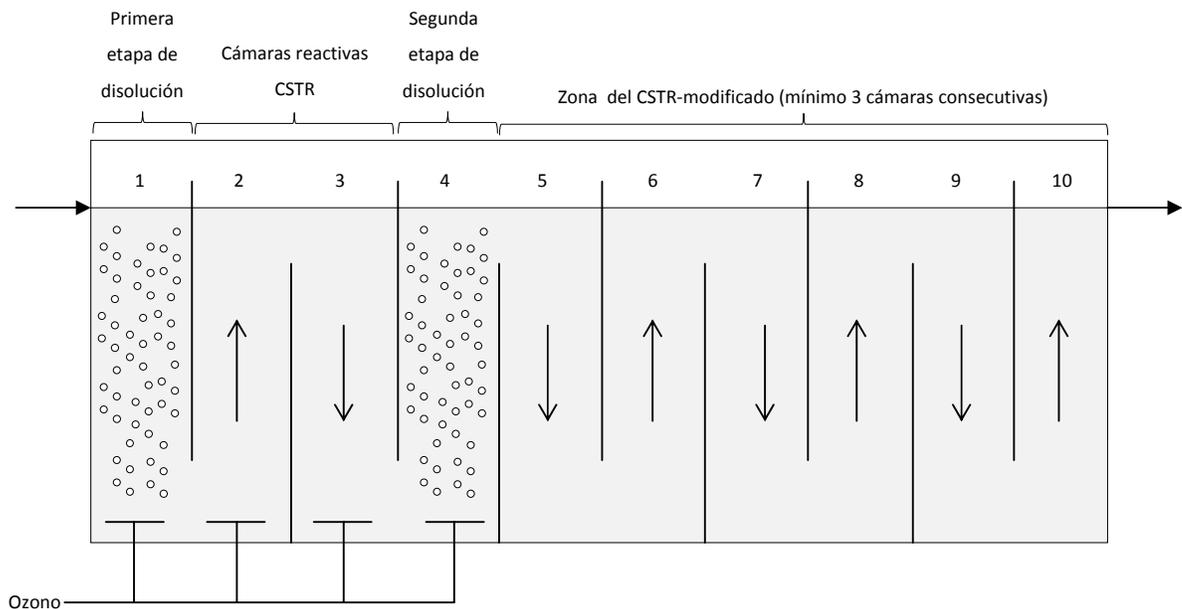
La diferencia entre el método CSTR y el CSTR-modificado radica en que para el método CSTR se calcula la desactivación logarítmica a partir de la medición de la concentración residual, mientras que para el método CSTR-modificados se modela la descomposición del ozono a través de las etapas reactivas del contactor.

Clasificación de las cámaras y las diferentes regiones del contactor

Para poder modelar un contactor de manera adecuada en el que no existan pruebas de trazado, es necesario dividirlo en secciones o zonas en las que se calcula la desactivación logarítmica de manera individual.

La siguiente figura muestra un contactor de 10 etapas con adición de ozono en las etapas 1 y 4:

Figura A.3.1 Contactor de 10 etapas



La primera etapa en la que se incorpora ozono al contactor se llama primera etapa de disolución, en dicha etapa no es recomendable que se le asigne una desactivación logarítmica al agua debido a que existen reacciones iniciales rápidas entre el ozono y el agua, y se genera una concentración residual en transición la cual puede no tener un efecto de desinfección sobre los microorganismos en cuestión.

La segunda y tercera etapa en el contactor son cámaras o etapas de reacción en las cuales el ozono se descompone al reaccionar con los compuestos presentes en el agua. Estas cámaras se denominan etapas de reacción CSTR. El método CSTR se utiliza para calcular la desactivación logarítmica a través de las etapas cuando existe una concentración de ozono residual en el efluente de cada etapa.

La cuarta etapa en el contactor presenta adición de ozono a co-corriente. Para esta etapa se calcula la desactivación logarítmica de los microorganismos mediante el método CSTR. Es importante mencionar que únicamente se puede considerar a esta etapa como una etapa reactiva si existe una concentración residual a la salida de las etapas previas a esta, de lo contrario deberá ser tratada como la primera etapa de disolución y por lo tanto no se le deberá asignar una desactivación.

Las etapas 5 a la 10 en la figura representan la zona del CSTR-modificado. Debido a que no se cuentan con estudios de trazado de las cámaras, el método CSTR-modificado se utiliza para calcular la desactivación logarítmica a través de cada etapa en la zona. Para poder modelar dicha desactivación, es necesario estimar de manera precisa el coeficiente de descomposición de ozono k^* , así como la concentración a la entrada de la zona C_{in} . Para poder calcular estos parámetros, es necesario medir por lo menos 3 concentraciones de ozono residual a lo largo de por lo menos 3 cámaras consecutivas.

Cálculo de la desactivación logarítmica a través de la zona del CSTR-modificado

El cálculo de la desactivación logarítmica a través de la zona del CSTR-modificado, al igual que para la metodología CSTR, se calcula para cada cámara individual de acuerdo a la siguientes ecuaciones:

- Para virus y *Giardia*: $\log(N_0/N) = k_p(CT)$
- Para *Cryptosporidium*: $\log\left(\frac{N_0}{N}\right) = \log\left(\frac{1}{1+2.303k_cCT}\right)$

La suma de los valores obtenidos en cada cámara resulta en la desactivación logarítmica total a través de la zona.

Calculo de la concentración residual

A diferencia de la metodología CSTR en la que la concentración C se calcula con una medición de la concentración residual a la salida de cada cámara, en el método CSTR-modificado la concentración para cada cámara debe ser calculada de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$[O_3]_{r,x} = \frac{[O_3]_{r,e}}{\left[1+k^* \left(\frac{\tau_{0-x}}{N_{0-x}}\right)\right]^{N_{0-x}}}$$

En donde:

$[O_3]_{r,x}$: concentración de ozono a la salida de la etapa x

k^* : constante de descomposición de ozono de primer orden (min^{-1})

$[O_3]_{r,e}$: concentración de ozono residual calculada a la entrada de la zona CSTR-modificado (mg/l)

T_{0-x} : tiempo de retención hidráulica entre el principio de la zona CSTR-modificado y la salida de la cámara x

N_{0-x} : número de etapas entre el principio de la zona CSTR-modificado y etapa x

La ecuación anterior describe a la zona CSTR-modificado entre la primera etapa de dicha zona y la etapa X como un conjunto de reactores CSTR de volumen igual en serie.

Una vez que se conocen los valores de concentración residual a la salida de cada una de las etapas se puede proceder al cálculo de la desactivación logarítmica del contactor.

Debido a que la demanda de ozono en el agua cambia constantemente, los valores de k^* y $[O_3]_{r,e}$ deberán de recalcularse con frecuencia para asegurar una operación adecuada del sistema de ozonación.

*Determinación de k^**

La constante de descomposición de ozono k^* se calcula utilizando muestras de agua ozonada en puntos de muestreo colocados a lo largo de la cámara de contacto, y mediante un modelo hidrodinámico de dicha cámara. La metodología descrita a continuación supone que las cámaras individuales se comportan como un reactor CSTR (o varios CSTR en serie si existe más de una cámara entre los puntos de muestreo), y supone que el contactor en cuestión cuenta con por lo menos 3 cámaras consecutivas que presentan una concentración residual. Es necesario conocer mediante muestreo las concentraciones de $[O_3]_{r,1}$, $[O_3]_{r,2}$, y $[O_3]_{r,3}$ para poder determinar el coeficiente de descomposición de ozono k^* . Por ejemplo, en la figura antes mencionada cualquiera serie de 3 cámaras pueden ser utilizadas para el cálculo de $[O_3]_{r,1}$, $[O_3]_{r,2}$, y $[O_3]_{r,3}$. A continuación se enlistan los pasos a seguir para el cálculo de k^* :

1. Modelar la descomposición de ozono entre los puntos de muestreo 1 y 2 para conocer k_{1-2}^* utilizando la siguiente ecuación:

$$k_{1-2}^* = \frac{N_{1-2}}{\tau_{1-2}} \left[\left(\frac{[O_3]_{r,1}}{[O_3]_{r,2}} \right)^{\frac{1}{N_{1-2}}} - 1 \right]$$

En donde:

k_{1-2}^* : la constante de descomposición de ozono entre los puntos 1 y 2 (min-1)

$[O_3]_{r,1}$: concentración de ozono residual medido en el punto 1

$[O_3]_{r,2}$: concentración de ozono residual medido en el punto 2

τ_{1-2} : tiempo de retención hidráulica entre los puntos 1 y 2

N_{1-2} : número de cámaras entre los puntos 1 y 2

2. Modelar la descomposición de ozono entre los puntos de muestreo 1 y 3 para conocer k_{1-3}^* utilizando la siguiente ecuación:

$$k_{1-3}^* = \frac{N_{1-3}}{\tau_{1-3}} \left[\left(\frac{[O_3]_{r,1}}{[O_3]_{r,3}} \right)^{\frac{1}{N_{1-3}}} - 1 \right]$$

En donde:

k_{1-3}^* : la constante de descomposición de ozono entre los puntos 1 y 3 (min-1)

$[O_3]_{r,1}$: concentración de ozono residual medido en el punto 1

$[O_3]_{r,3}$: concentración de ozono residual medido en el punto 3

τ_{1-3} : tiempo de retención hidráulica entre los puntos 1 y 3

N_{1-3} : número de cámaras entre los puntos 1 y 3

Es importante notar que el punto de muestreo 1 nunca debe ubicarse a la entrada de la zona CSTR-modificado, por lo menos deberá estar ubicado a la salida de la primera etapa de dicha zona.

3. El valor de k^* que deberá ser utilizado es el resultante del promedio aritmético de k_{1-2}^* y k_{1-3}^*

$$k^* = \left[\frac{k_{1-2}^* + k_{1-3}^*}{2} \right]$$

Es normal que los valores individuales de k_{1-2}^* y k_{1-3}^* sean un poco distintos. Sin embargo, es recomendable que se encuentren dentro de un rango de 80% y 120% de la k^* promedio

$$\frac{\text{abs}|k^* - k_{1-i}^*|}{k^*} \leq 20\%$$

Si las mediciones se encuentran fuera de este parámetro es necesario que se vuelvan a tomar las muestras. La medición de la concentración de ozono residual se puede medir mediante el método del índigo, o bien, mediante analizadores de ozono en línea.

Determinación de $[O_3]_{r,e}$

Es posible medir la concentración de ozono residual a la entrada de la zona CSTR-modificado mediante muestreo, sin embargo no es recomendable utilizar este valor debido a que la concentración resultante generalmente es mayor al residual calculado mediante un perfil de descomposición de ozono de primer orden a lo largo de la zona. Este fenómeno es comúnmente atribuido a una descomposición inicial rápida seguida de una descomposición más lenta de segundo orden. Por esta razón, C_{in} debe ser obtenido mediante una extrapolación de las concentraciones medidas a lo largo de la zona CSTR-modificado ($[O_3]_{r,1}$, $[O_3]_{r,2}$, y $[O_3]_{r,3}$).

El valor de C_{in} se puede calcular una vez que se conoce el valor de k^* a partir de la siguiente ecuación:

$$[O_3]_{r,e,x} = [O_3]_{r,x} \left[1 + k^* \frac{\tau_{0-x}}{N_{0-x}} \right]$$

En donde:

$[O_3]_{r,e}$: la concentración de ozono residual inicial en la cámara de muestreo x

$[O_3]_{r,x}$ la concentración de ozono residual medida en el punto de muestreo x (mg/l)

k^* : la constante de descomposición de ozono de primer orden para la zona CSTR-modificado (min^{-1})

τ_{0-x} : el tiempo de retención hidráulica entre el inicio de la zona y el punto x (min)

N_{0-x} : el número de etapas entre el inicio de la zona y el punto x

Una vez que se tiene el valor de C_{in} para cada una de las etapas en donde existen puntos de muestreo se puede calcular la concentración inicial promedio para la zona mediante la siguiente ecuación:

$$[O_3]_{r,e} = \frac{[O_3]_{r,e,1} + [O_3]_{r,e,2} + [O_3]_{r,e,3}}{3}$$

ANEXO 4. EQUIPO DE OZONACIÓN UTILIZADO



Figura A.4.1 Generador de ozono

(Labo 76, Emery Trailgaz, USA, con capacidad de producción de 19 g de O₃/h)

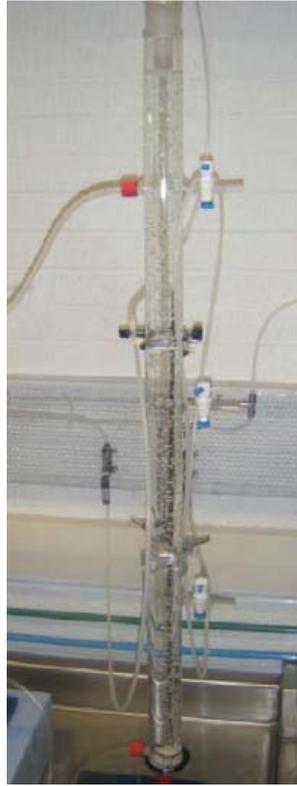


Figura A.4.2 Columna de burbujeo

(110 cm de altura y 5.5 cm de diámetro interno, 2 l de capacidad, cuenta con tres puertos de muestreo a los 30, 60 y 90 cm de altura)

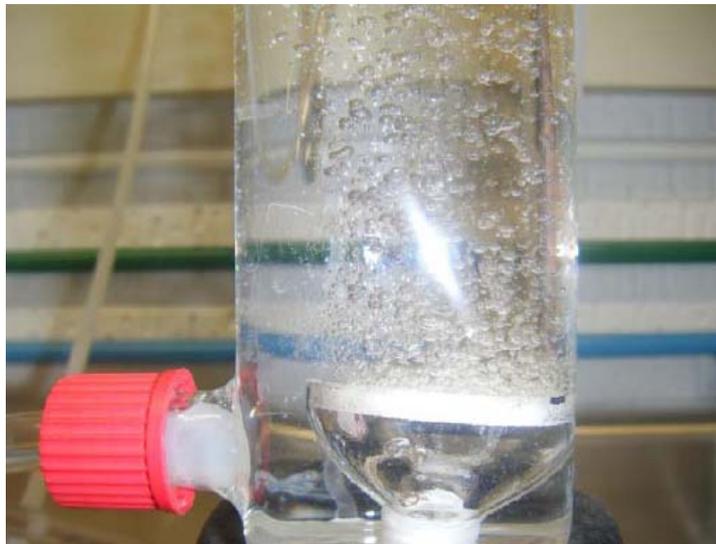


Figura A.4.3 Difusor de placa porosa

(10-15 μm de tamaño de poro)



Figura A..4.4 Analizador de ozono en fase gaseosa

(Teledyne API Model 465H Ozone Monitor, absorción UV, rango de detección de 0-25 % p/p de ozono)



Figura A..4.5 Destructor catalítico de ozono

BIBLIOGRAFÍA

- AWWA (American Water Works Association). *Water Quality and Treatment*. F.W. Pontius (editor). McGraw-Hill, New York, NY. 1990
- Bader H., Hoigné J., *Determination of ozone in water by the indigo method*. Water Research 15, 89-112, 1981.
- Benson A.S., *Control of Communicable Diseases in Man*. APHA, 1981
- Bin, A.K., Roustan, M, *Mass Transfer in Ozone Reactors, Faculty of Chemical and Process Engineering*, Warsaw University of Technology, Poland, 2000
- Comisión Nacional del Agua, *Estadísticas del Agua en México Edición 2010*, México 2010
- Dobbins W.E., *Mechanism of gas absorption by turbulent liquids*, Proceedings of the International Conference Water Pollution Research, Pergamon Press, London, 1964
- Elvers B., Hawkins S., *et al*; *Ullman's Encyclopedia of Industrial Chemistry*; Volumen 24; Quinta edición completamente revisada; Editorial VCH; New York, U.S.A.; 1989.
- Hoigné J., and Bader, H., *The Role of Hydroxyl Radical Reactions in Ozonation Processes in Aqueous Solutions*. Water Res. 10:377-386, 1977.
- Rakeness K.L., *Ozone for Drinking Water Treatment: Process design, Operation and Optimization*, AWWA 2005
- Langlais, B., D.A. Reckhow, and D.R. Brink. (Editors), *Ozone in Drinking Water Treatment: Application and Engineering*. AWWARF and Lewis Publishing, Chelsea, MI, USA, 1991
- LeChevalier, M.W., Schultz, W., and Lee, R.G. *Bacterial nutrients in drinking water. In Assessing and Controlling Bacterial Regrowth in Distribution Systems*

(eds. M.W. LeChevalier, B.H. Olson, G.A. McFeters). Denver, CO: AWWARF, 1990

- Lewis W.K., Whitman W.G., *Principles of Gas Absorption*, Industrial & Engineering Chemistry, 16: 1215-1219, 1924.
- Lowther, E.D. and Moser, R.H. *Detecting and Eliminating Coliform Regrowth*. Denver, CO: Proc. 1984 AWWA WQTC
- Nagy, L.A., et al. *Biofilm composition, formation and control in the Los Angeles aqueduct system*. Nashville, TN: Proc. AWWA WQTC, 1982.
- Susumu Kawamura. *Integrated Design and Operation of Water Treatment Facilities*. John Wiley & Sons; segunda edición; 2000.
- USEPA, *Alternative Disinfectants and Oxidants Guidance Manual*, 1999
- USEPA, *Guidance Manual for Compliance With the Filtration and Disinfection Requirements for Public Water Systems Using Surface Water Sources*, 1991
- USEPA, *Long Term 2 Enhanced Surface Water Treatment Rule Toolbox Guidance Manual*, 2003
- White, G.C. 1992. *Handbook of Chlorination and Alternative Disinfectants*. Van Nostrand Reinhold, New York, NY