



0117737
UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO
FACULTAD DE INGENIERÍA

DESINFECCIÓN DE EFLUENTES PROCEDENTES
DE UN TRATAMIENTO BIOLÓGICO Y DE UN
FÍSICO-QUÍMICO, EMPLEANDO OZONO

TESIS QUE :

ADRIÁN JIMÉNEZ VARELA
PRESENTA PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRO EN INGENIERÍA (AMBIENTAL)

MÉXICO, D.F. ABRIL 1997

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



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.

DEDICATORIAS

† En memoria de mamá.

- Por ti abuelita, gracias por el apoyo que me has brindado durante toda mi carrera.**
- Gracias a los sinodales, por sus observaciones realizadas a este trabajo.**
- A mi esposa Esperanza, gracias por aguantarme.**
- A mis tíos y tías.**
- Tío Andres que este trabajo sea una muestra de agradecimiento, por el apoyo que me bindo.**
- Por todos mis amigos del Tecnológico de Zacatepec.**
- A todos lo profesores de la DEPFI y del Tecnológico.**
- A mis amigos Beto, Isabel, Paty, Vale, Fulvio, Jorge, compañeros del Instituto de Ingeniería y de la DEPFI.**

ÍNDICE

ÍNDICE DE TABLAS	i
INDICE DE FIGURAS	iii
OBJETIVOS	iv
INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO 1 DESCRIPCIÓN DE LAS PLANTAS DE TRATAMIENTO	3
1.1 Planta de tratamiento de agua residual de Ciudad Universitaria	4
1.1.1 Obra de toma	4
1.1.2 Desarenador	5
1.1.3 Lodos activados	5
1.1.4 Biodiscos	5
1.1.5 Biofiltros	6
1.1.6 Sedimentadores	6
1.1.7 Sistema de filtración	6
1.1.7 Desinfección	6
1.2 Planta piloto kilómetro 27 del Gran Canal	7
1.2.1 Antecedentes	7
1.2.2 Aplicación del Tratamiento Primario Avanzado en otros países	8
1.2.3 Fundamentos teóricos	8
1.2.4 Descripción de la planta piloto	9
CAPITULO 2 ALTERNATIVAS DE DESINFECCIÓN	11
2.1 Agentes desinfectantes	13
2.1.1 Alternativas tecnológicas de desinfección	13
2.1.1.1 Cloro (Cl ₂)	14

2.1.1.2 Dióxido de cloro (ClO_2)	15
2.1.1.3 Hipoclorito de sodio (NaOCl)	15
2.1.1.4 Hipoclorito de calcio ($\text{Ca}(\text{OCl})_2$)	16
2.1.1.5 Ozono (O_3)	16
2.1.1.6 UV (Radiación ultravioleta)	16
CAPITULO 3 DESINFECCIÓN QUÍMICA Y SU CINÉTICA	18
3.1 Factores que influyen en la desinfección	19
3.1.1 Tiempo de contacto	19
3.1.2 Concentración y tipo de agente químico	20
3.1.3 Naturaleza y condición del agua	20
3.1.4 Temperatura	21
3.1.5 Número de microorganismos	21
3.2 Cinética de la desinfección	22
CAPITULO 4 DESINFECCIÓN CON OZONO	23
4.1 Química del ozono	25
4.1.1 Adición cíclica	26
4.1.2 Reacción electrofílica	27
4.1.3 Reacción nucleofílica	28
4.2 Descomposición del ozono	28
4.3 Efecto del ozono sobre algunos microorganismos	31
4.4 Toxicidad	32
4.5 Propiedades físicas y formas de generar al ozono	33
4.6 Sistemas de ozonación	36
4.6.1 Preparación del gas de alimentación	35
4.6.2 Generación de ozono	37
4.6.3 Cámaras de contacto (disolución del ozono en el agua)	38

CAPITULO 5 METODOLOGÍA	40
5.1 Caracterización del generador de ozono	41
5.2 Experimentación	44
5.3 Técnicas analíticas	47
5.3.1 Determinación de ozono en fase gaseosa	48
5.3.2 Determinación de ozono en fase acuosa	50
5.3.3 Determinación de coliformes fecales (CF)	52
5.3.4 Turbiedad	52
5.3.5 Demanda química de oxígeno (DQO)	52
5.3.6 pH	53
CAPITULO 6 COSTOS	54
6.1 Parámetros de diseño que afectan los costos	55
CAPITULO 7 RESULTADOS	59
7.1 Evaluación de la concentración de ozono (fase gas), variando el voltaje del generador	61
7.2 Evaluación de la relación entre la concentración de ozono (fase gas), variando el flujo de aire.	62
7.3 Determinación de la dosis de ozono para el efluente del primario avanzado	63
7.3.1 Estimación de costos	66
7.4 Determinación de la dosis de ozono para el efluente del proceso biológico	68
7.4.1 Estimación de costos	70
7.4.2 Comparación de costos de desinfección con cloro (gas) y ozono, (caso C.U)	72

CONCLUSIONES

74

REFERENCIAS

78

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA	Página
2.1 AGENTES FÍSICOS Y QUÍMICOS COMÚNMENTE EMPLEADOS EN LA DESINFECCIÓN.	13
4.1 EFECTO DEL OZONO SOBRE ALGUNOS PARÁMETROS EN DIFERENTES EFLUENTES DE AGUA RESIDUAL, DURANTE LA DESINFECCIÓN.	32
4.2 TOXICIDAD DEL OZONO A DIFERENTES CONCENTRACIONES.	33
4.3 PROPIEDADES FÍSICAS DEL OZONO	33
4.4 VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE DIFERENTES GASES DE ALIMENTACIÓN	36
5.1 CARACTERÍSTICAS DEL GAS DE ALIMENTACIÓN	41
5.2 SOLUBILIDAD DEL OZONO EN EL AGUA A DIFERENTES TEMPERATURAS	43
7.1 RELACIÓN ENTRE EL VOLTAJE APLICADO Y LA CONCENTRACIÓN DE OZONO EN FASE GAS EN CONDICIONES NORMALES.	61
7.2 RELACIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DE OZONO (FASE GAS), Y EL AIRE ALIMENTADO EN CONDICIONES NORMALES.	62
7.3 COMPORTAMIENTO DE LA DQO, pH Y TURBIEDAD A DIFERENTES TIEMPOS DE CONTACTO.	64
7.4 REMOCIÓN DE COLIFORMES FECALES A DIFERENTES DOSIS DE OZONO	65
7.5 PARÁMETROS DE DISEÑO PARA LA ESTIMACIÓN DE COSTOS DE CAPITAL .	66
7.6 COSTOS DE CAPITAL PARA LA GENERACIÓN DE OZONO	66
7.7 PARÁMETROS PARA ESTIMAR COSTOS DE MANTENIMIENTO Y OPERACIÓN.	67
7.8 COSTOS DE MANTENIMIENTO DE OPERACIÓN	67

TABLA	Página
7.9 COSTOS UNITARIOS PARA DESINFECTAR UN METRO CÚBICO DE AGUA	68
7.10 COMPORTAMIENTO DE LA DQO, pH Y TURBIEDAD A DIFERENTES TIEMPOS DE CONTACTO.	68
7.11 REMOCIÓN DE COLIFORMES FECALES A DIFERENTES DOSIS DE OZONO	70
7.12 PARÁMETROS DE DISEÑO PARA LA ESTIMACIÓN DE COSTOS DE CAPITAL .	71
7.13 COSTOS DE CAPITAL PARA LA GENERACIÓN DE OZONO	71
7.14 PARÁMETROS PARA ESTIMAR COSTOS DE MANTENIMIENTO Y OPERACIÓN.	72
7.15 COSTOS DE MANTENIMIENTO DE OPERACIÓN	72
7.16 COSTOS UNITARIOS PARA DESINFECTAR UN METRO CÚBICO DE AGUA	72
7.17 RESULTADOS DE LA EVALUACIÓN DE COSTOS DE DESINFECCIÓN EMPLEANDO CLORO GAS.	73

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA	Página
1.1 DIAGRAMA DE LA PLANTA PILOTO EXPERIMENTAL	10
4.1 TIPOS DE REACCIÓN DEL OZONO	25
4.2 ADICIÓN CÍCLICA	26
4.3 DESCOMPOSICIÓN DEL OZÓNIDO	27
4.4 REACCIÓN ELECTROFÍLICA	28
5.1 COMPORTAMIENTO DEL GENERADOR DE OXÍGENO	42
5.2 ARREGLO EXPERIMENTAL	44
6.1 DIAGRAMA PARA ESTIMAR LOS COSTOS DE CAPITAL	57
7.1 RELACIÓN ENTRE LA CONCENTRACIÓN DE OZONO EN FASE GAS Y EL VOLTAJE APLICADO.	61
7.2 RELACIÓN ENTRE LA CONCENTRACIÓN DE OZONO Y EL FLUJO DE AIRE ALIMENTADO.	63
7.3 COMPORTAMIENTO DE LA DQO, pH Y TURBIEDAD A DIFERENTES TIEMPOS DE CONTACTO CON OZONO.	64
7.4 REMOCIÓN DE COLIFORMES FECALES A DIFERENTES DOSIS DE OZONO.	65
7.5 COMPORTAMIENTO DE LA DQO, pH Y TURBIEDAD A DIFERENTES TIEMPOS DE CONTACTO CON OZONO.	69
7.6 REMOCIÓN DE COLIFORMES FECALES A DIFERENTES DOSIS DE OZONO.	70

OBJETIVO

Determinar el tiempo de contacto y dosis de ozono, en pruebas de desinfección de efluentes de agua residual de tipo doméstico, procedentes de un tratamiento biológico y de un físico-químico.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- **Estudiar la alternativa tecnológica de desinfección con ozono en efluentes de agua residual, considerando su aplicabilidad y eficiencia.**
- **Realizar pruebas de desinfección con ozono bajo condiciones controladas en el laboratorio.**
- **Definir cuál es el comportamiento de la demanda química de oxígeno, pH y turbiedad a diferentes tiempos de contacto con ozono.**
- **Hacer un estudio de costos, sobre la desinfección del agua residual de la planta piloto de Ojo de Agua.**
- **Estimar costos unitarios de desinfección con ozono y cloro gas, para el caso de la planta de tratamiento de Ciudad Universitaria.**

INTRODUCCIÓN

En el tratamiento de aguas residuales la desinfección juega un papel muy importante, especialmente cuando la disposición del agua tratada está dirigida a su reutilización. Desde el punto de vista de salud, la desinfección es la etapa más importante del tratamiento, para lo cual existen algunas tecnologías tales como: la cloración, ozonación y radiación ultravioleta; últimamente éstas últimas ha despertado gran interés.

De estos, el ozono es un agente oxidante particularmente poderoso, desde el punto de vista termodinámico y cinético. Las propiedades bactericidas inmediatas del ozono son superiores a las del cloro; la reactividad del ozono presenta un problema en la desinfección de aguas que contienen elevadas cargas de materia orgánica o impurezas inorgánicas oxidables, debido a que éstas consumen grandes cantidades; además de que el ozono no permite una protección a largo plazo contra una posible recontaminación.

La capacidad del ozono como desinfectante fue reconocido en 1886 por Meritens (A.W.W.A, 1991). En 1889, el químico Francés Paul Otto empezó estudios en la Universidad de Paris sobre la utilización del ozono como un agente oxidante. Una de sus primeras aplicaciones en el tratamiento de agua fue en 1893 en Holanda; en Francia se aplicó por primera vez el ozono como desinfectante en plantas de tratamiento de agua potable en 1906.

La desinfección con ozono tiene la ventaja de ser efectiva contra ciertos patógenos resistentes al cloro, como los quistes y ciertas formas de virus. A diferencia del cloro, el ozono no comunica gustos y olores ofensivos al agua.

La finalidad de este estudio es conocer la factibilidad técnica y económica de poder aplicar el ozono como desinfectante en efluentes de agua residual procedentes de un tratamiento biológico y de un primario avanzado. Para ello se tomaron los efluentes de: la planta de tratamiento de Ciudad Universitaria, que emplea procesos biológicos para su tratamiento y de la planta piloto ubicada en el kilómetro 27 del Gran Canal. La cuál

se encuentra en proceso de estudio y emplea un tratamiento fisico-químico (primario avanzado con productos químicos).

Este trabajo está compuesto de siete capítulos; en el primero se da una breve descripción de la planta de tratamiento de Ciudad Universitaria y de la planta piloto. En el capítulo dos se analizan las diferentes alternativas de desinfección; tales como el cloro, dióxido de cloro, hipoclorito de sodio, hipoclorito de calcio, y luz ultravioleta. La cinética de la desinfección está condicionada por diferentes parámetros como el pH, y temperatura; sobre ello se habla en el capítulo tres. El capítulo cuatro presenta las experiencias obtenidas en la aplicación del ozono como desinfectante y las diferentes reacciones que se pueden presentar; también se comenta acerca de la toxicidad del ozono y de las diferentes formas que existen para generarlo. En el capítulo cinco se describe como se realizó la experimentación y la metodología, que en este caso se dividió en dos partes; la primera consistió en la caracterización del generador de ozono y la segunda en las técnicas analíticas que se emplearon, en esta parte se observó el efecto que tiene el ozono sobre algunos parámetros tales como: la demanda química de oxígeno (DQO), pH y turbiedad. Para ver qué tan factible es emplear el ozono como desinfectante, en el capítulo seis se presentan los factores que se toman en cuenta para un análisis de costos y que permitirían tomar una decisión al respecto. Los resultados de las pruebas que se realizaron, así como el resultado del análisis de costos se muestran en el capítulo siete. Por último, se presentan las conclusiones a las que se llegaron al final de realización de este trabajo.

se encuentra en proceso de estudio y emplea un tratamiento físico-químico (primario avanzado con productos químicos).

Este trabajo está compuesto de siete capítulos; en el primero se da una breve descripción de la planta de tratamiento de Ciudad Universitaria y de la planta piloto. En el capítulo dos se analizan las diferentes alternativas de desinfección; tales como el cloro, dióxido de cloro, hipoclorito de sodio, hipoclorito de calcio, y luz ultravioleta. La cinética de la desinfección está condicionada por diferentes parámetros como el pH, y temperatura; sobre ello se habla en el capítulo tres. El capítulo cuatro presenta las experiencias obtenidas en la aplicación del ozono como desinfectante y las diferentes reacciones que se pueden presentar; también se comenta acerca de la toxicidad del ozono y de las diferentes formas que existen para generarlo. En el capítulo cinco se describe como se realizó la experimentación y la metodología, que en este caso se dividió en dos partes; la primera consistió en la caracterización del generador de ozono y la segunda en las técnicas analíticas que se emplearon, en esta parte se observó el efecto que tiene el ozono sobre algunos parámetros tales como: la demanda química de oxígeno (DQO), pH y turbiedad. Para ver qué tan factible es emplear el ozono como desinfectante, en el capítulo seis se presentan los factores que se toman en cuenta para un análisis de costos y que permitirían tomar una decisión al respecto. Los resultados de las pruebas que se realizaron, así como el resultado del análisis de costos se muestran en el capítulo siete. Por último, se presentan las conclusiones a las que se llegaron al final de realización de este trabajo.

CAPÍTULO 1

1 DESCRIPCIÓN DE LAS PLANTAS DE TRATAMIENTO

1.1 Planta de tratamiento de agua residual de Ciudad Universitaria

El Instituto de Ingeniería de la UNAM ha desarrollado varios estudios para la Dirección General de Construcción y Operación Hidráulica del DDF (DGCOH), para mejorar la práctica de diseño, construcción y operación de plantas de tratamiento de aguas residuales. Como consecuencia de estos estudios, se detectó la conveniencia de instalar una planta en terrenos de Ciudad Universitaria. Esta planta permitiría estudiar algunos procesos convencionales de tratamiento y otros menos comunes.

Los estudios previos de campo y el diseño de esta planta se hicieron entre 1978 y 1979. Con este diseño básico se construyó la planta de tratamiento de Ciudad Universitaria. La planta dispone de tres procesos de tratamiento en paralelo que son: lodos activados con capacidad de 20 L/s, biofiltros (filtro percolador) con capacidad de 10 L/s, biodiscos (discos biológicos rotatorios) con capacidad 10 L/s respectivamente, que pueden operarse simultáneamente y en forma independiente.

1.1.1 Obra de toma

Esta planta recibe los efluentes de Ciudad Universitaria y de una zona de la colonia Copilco el Alto. Las aguas residuales son conducidas a través de tuberías de asbesto de 62.5 centímetros de diámetro interno, hasta el tanque regulador de tormentas que es donde se encuentra la toma de agua. La toma consta de tres canales de llegada con su compuerta cada uno; un canal corresponde a la zona habitacional de Copilco el Alto, el segundo a la Facultad de Ciencias y el tercero corresponde a la zona de los Institutos. Después de las compuertas se encuentran unas rejillas; que son las encargadas de detener a los sólidos de mayor tamaño, seguido de éstas se encuentra un cárcamo de aguas negras; y por medio de bombas el agua residual es conducida al siguiente tratamiento.

1.1.2 Desarenador

El agua que se envía del cárcamo de bombeo al desarenador pasa por un canal Parshall, con la finalidad de medir el flujo de agua. Una vez medido el gasto, el agua pasa al desarenador. El efluente de los desarenadores pasa por una serie de canales donde cada uno tiene una compuerta para regular el flujo, una vez que el flujo fue regulado éste pasa por una caja repartidora, la cuál distribuye el agua residual a los diferentes procesos de tratamiento; los gastos proporcionales que se reparten son aproximadamente:

- a) 60% para el sistema de lodos activados.
- b) 20% para el sistema de biodisco (discos biológicos rotatorios).
- c) 20% para el sistema de biofiltro (filtro percolador).

1.1.3 Lodos activados

El proceso de lodos activados es usado para convertir la materia orgánica disuelta y finamente dividida de las aguas residuales, en sólidos floculentos y sedimentables los cuales serán removidos en un tanque de sedimentación secundaria.

1.1.4 Biodiscos

El tratamiento biológico por medio de discos rotatorios se basa en la formación de biomasa en la superficie de los discos, la cual por estar en contacto con el agua residual (el biodisco está sumergido un 40% en el agua residual), biodegrada la materia orgánica. Ésta biomasa se desprende de la superficie del biodisco en un determinado tiempo. Posteriormente ésta se separa en un tanque de sedimentación secundaria.

1.1.5 Biofiltros

El tratamiento biológico por medio de filtros percoladores se basa en la biodegradación de la materia orgánica presente en el agua residual, por medio de un grupo heterogéneo de bacterias, las cuales se encuentran adheridas en la superficie del filtro que en este caso está construido de PVC. Seguido de este tratamiento se encuentra colocado un sedimentador secundario que es finalmente donde se separaran los sólidos floculentos y sedimentables que se formaron en el filtro percolador.

1.1.6 Sedimentadores

Estas unidades tienen la función de separar los sólidos floculentos y sedimentables provenientes de los procesos biológicos. Cabe señalar que cada proceso biológico tiene su propio sedimentador secundario y que tienen las mismas dimensiones.

1.1.7 Sistema de filtración

Una vez que los efluentes de los diferentes procesos biológicos de tratamiento pasan por sus respectivos sedimentadores secundarios; el efluente pasa por unos filtros (en el caso de esta planta son seis); en los que el medio filtrante está constituido de arena y grava.

1.1.8 Desinfección

Una vez que el efluente de los sedimentadores pasó por el sistema de filtración, éste pasa por un proceso de desinfección; (en el caso de la planta de Ciudad Universitaria emplean cloro en forma de gas), y es aquí donde se pretende proponer una modificación al proceso de desinfección; debido a que la desinfección con cloro en forma de gas representa un serio

peligro, aunado a esto la formación de subproductos (trihalometanos, etc) que se producen cuando se emplea el cloro como agente desinfectante.

1.2 Planta piloto Kilometro 27 del gran canal

1.2.1 Antecedentes

Actualmente, el Valle de México produce en promedio 38 m³/s de agua residual que es la mezcla de las descargas domésticas, industriales y comerciales. Además, en el drenaje se transportan otros 13 m³/s (promedio anual) de agua de lluvia confiriéndole una alta variabilidad a las descargas en cantidad y en calidad a lo largo del año.

El destino final del agua residual es el Valle del Mezquital Edo. de Hidalgo, donde los suelos que prevalecen son pobres; por lo que la aportación de la materia orgánica, nitrógeno y fósforo a través del agua residual es benéfica para la producción, alcanzándose un aumento de productividad de los diferentes productos que se cosechan en la zona (CNA, 1994). El empleo del agua residual aporta al año un promedio de 81 kg/ha de fósforo y 195 kg/ha como nitrógeno (Jiménez y Chávez, 1995). Ante estos incrementos en la productividad, parecería conveniente dejar el agua sin tratamiento; pero según estudios efectuados por el Instituto Nacional de Salud Pública, el índice de enfermedades gastrointestinales en el área es 13 veces mayor que en las zonas donde se emplea agua tratada para riego (Cifuentes et.al, 1992). De ahí el interés en la introducción de la NOM-001-ECOL-1996, que consiste en la restricción de 1 Huevo de Helminto viable/L; por lo que es necesario que el tratamiento propuesto para el agua permita conservar la aportación de los nutrientes necesarios para el desarrollo de los cultivos y bajar el índice de enfermedades gastrointestinales.

El problema sanitario debe ser resuelto con el tratamiento de las aguas residuales antes de ser usadas en el riego agrícola, y bajo la situación descrita, se afirma que el tratamiento de las aguas

residuales del área Metropolitana de la Cd. De México debe tener como propósito fundamental la desinfección. Es decir, eliminar los patógenos con el doble propósito de proteger la salud de la población y de levantar restricciones a los cultivos en beneficio de la economía local. Pero por otra parte, conviene que el tratamiento seleccionado remueva lo menos posible la materia orgánica y los nutrientes del agua, para no afectar sus propiedades fertilizantes. En cuanto a la producción de lodos, este es su principal desventaja debido a que se aumenta la producción de ellos (Shao, et.al. 1995).

1.2.2 Aplicación del Tratamiento Primario Avanzado en otros países

El Tratamiento Primario Avanzado con productos químicos (TPA) se adapta fácilmente a los requerimientos que se buscan (tratar gastos variables, eliminar huevos de helmintos y mantener los nutrientes). Este tratamiento es utilizado en varias plantas de gran capacidad, particularmente en los Estados Unidos como la de Point Loma, San. Diego, la de Hyperion, Los Ángeles, así como en Montreal, Canadá, Marsella, Francia y en varias plantas más.

1.2.3 Fundamentos teóricos

Los fundamentos del TPA tienen que ver básicamente con tres aspectos: a) la desestabilización de los sólidos suspendidos, b) la formación de floculos y c) la eliminación de éstos de la suspensión. Los dos primeros aspectos están relacionados con la teoría de la coagulación-floculación y el tercero con el de la sedimentación.

El TPA consiste en la aplicación de la coagulación-floculación del agua residual. Es decir, es un proceso en el cual se añaden reactivos químicos al agua para eliminar sólidos suspendidos y materia orgánica. Este proceso es muy similar a los procesos físico-químicos, que a diferencia de éstos, el TPA emplea e integra nuevos avances. Actualmente, su aplicación se ha retomado con

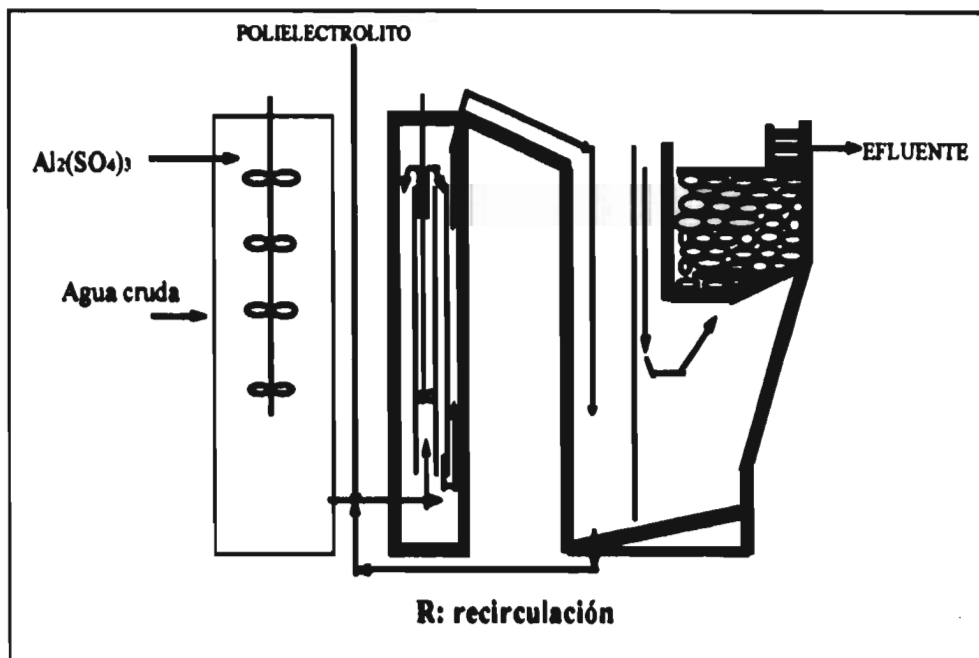
dos fines: la eliminación de fósforo (Shao, et.al. 1995) y la obtención de efluentes de calidad media a costos inferiores a los convencionales. El nuevo auge del proceso se debe también al reconocimiento de que el costo del tratamiento debe ser acorde con la eficiencia deseada y a que los avances en la síntesis de polímeros floculantes con altas eficiencias y baja producción de lodo se ha logrado a un menor costo.

La diferencia entre el proceso físico-químico y el primario avanzado es que en el primer caso se tienen remociones de SST (sólidos suspendidos totales) y de DBO (demanda biológica de oxígeno), del orden del 90%, ésto como consecuencia de agregar dosis altas de coagulante; el TPA emplea dosis mucho menores a las de un físico-químico, y se apoya de polímeros aniónicos de alto peso molecular para el proceso de floculación; remueve la materia orgánica (DBO), así como los nutrientes en la proporción necesaria para que el agua tratada conserve sus propiedades nutritivas. Entre otras ventajas el tratamiento primario avanzado es capaz de eliminar metales pesados tales como Pb, Zn, Cu, Cr, Ni, As, Ag y Cd en eficiencias del orden del 57% (Shao, et.al. 1995).

1.2.4 Descripción de la planta piloto

La planta piloto experimental se encuentra ubicada en el km 27.5 del Gran canal en el municipio de Ecatepec de Morelos, Edo. de México. En la FIGURA 1.1 se muestra el diagrama de la planta piloto del Gran Canal. Cabe mencionar que el agua residual antes de principiar con su proceso de tratamiento se le realiza un pretratamiento; la altura aproximada de la planta es de 6 m y se encuentra integrada por cuatro módulos. El primero consiste en una cámara de coagulación o mezcla rápida cuyas dimensiones son 0.8 m de diámetro y 5.5 m de altura, cuenta con una agitación mecánica de 200 rpm. En esta etapa, se aplica el sulfato de aluminio $Al_2(SO_4)_3$ con dosis de 50 mg/L. En el segundo módulo se localiza la cámara de floculantes o de agitación lenta, cuyas medidas son 1.2m de diámetro y 5.5 m de altura y en ella se adiciona el polímero con dosis de 1.7 mg/L (P-17); ésta tiene un régimen de mezclado aproximadamente de 30 rpm. El tercer módulo cuenta con una

unidad de lecho de lodos que se interconecta con un sedimentador de alta tasa (módulo 4). En esta etapa se realiza la separación de la fase líquida (agua tratada) y los lodos producidos son extraídos del sistema. Parte de ellos son recirculados (10%) y el resto es purgado y conducido hacia el sistema de tratamiento de lodos. La planta piloto tiene capacidad de operación 161.5 m³/h. y cuenta con un tiempo de retención hidráulico total de 30 min.



FUENTE: Fabricada por Degremont, 1996

FIGURA 1.1 DIAGRAMA DE LA PLANTA PILOTO EXPERIMENTAL

CAPÍTULO 2

2 ALTERNATIVAS DE DESINFECCIÓN

La desinfección consiste en la destrucción selectiva de los organismos causantes de enfermedades. No todos los organismos se destruyen durante este proceso; esto es lo que diferencia la desinfección de la esterilización, la cual conduce a la destrucción de todos los organismos.

Después de haber tratado el agua residual con el proceso que más haya convenido o el único adecuado a cierto tipo de agua, ya sea biológico o fisico-químico para fines específicos, es necesario llevar a cabo la última etapa y tal vez la más importante del tratamiento de aguas que es la desinfección. La desinfección es un proceso fisico-químico, que se aplica en los efluentes de las plantas de tratamiento de agua residual, para eliminar focos de contaminación transmitibles por vía hidrológica.

La desinfección consiste en la destrucción o inactivación de los organismos patógenos tales como bacterias, virus, quistes amebianos y huevos de helmintos que persisten aún después del tratamiento de las aguas residuales. La inactivación o destrucción de los microorganismos no es instantánea en la mayoría de los procesos de desinfección.

Las tres clases de organismos entéricos de origen humano de mayores consecuencias en la producción de enfermedades son las bacterias, virus y quistes amebianos. Las enfermedades bacterianas típicas transmitidas por el agua son: tífus, cólera, paratífus y disentería bacilar; las causadas por los virus, son entre otras: poliomeilitis, y la hepatitis infecciosa. En la desinfección con cloro, el virus de la hepatitis y el de la polio no son completamente inactivados, estos se pueden eliminar completamente con el ozono (Cronholm., 1976). Aunque la materia orgánica y las reacciones que se llevan a cabo con todos los diversos componentes presentes en el agua residual ejercen varios efectos positivos y/o negativos sobre la eficiencia de la desinfección (Weber, 1979), se debe de buscar un balance positivo.

Algunos de los efectos más importantes suelen ser:

1) Ciertos compuestos pueden adherirse a la superficie celular y evitar o retrasar el ataque del desinfectante.

2) El desinfectante puede reaccionar con las especies disueltas formando complejos o compuestos de sustitución que son menos efectivos.

3) El desinfectante puede oxidar la materia orgánica, reduciéndose y perdiendo completa e irreversiblemente sus propiedades germicidas.

2.1 Agentes desinfectantes

En el campo del tratamiento de aguas residuales la desinfección suele realizarse mediante agentes químicos y físicos. En la TABLA 2.1, se presentan algunos de estos agentes.

TABLA 2.1 AGENTES FÍSICOS Y QUÍMICOS COMÚNMENTE EMPLEADOS EN LA DESINFECCIÓN

DESINFECTANTE	AGENTE
Halógenos (Br ₂ , I ₂ , Cl ₂)	Químico
Ozono	Químico
Agua oxigenada	Químico
Alcalis y ácidos	Químico
Calor	Físico
Radiación ultravioleta	Físico
Radiación gamma	Físico

Fuente: Metcalf & Eddy (1988) "WATER RESOURCES AND ENVIRONMENTAL ENGINEERING. WASTEWATER ENGINEERING: TREATMENT, DISPOSAL AND REUSE". Y Cáceres O. (1990). "Desinfección del agua"; Ministerio de Salud, Oficina Panamericana de la Salud. Lima, Perú; pp 359

2.1.1 Alternativas tecnológicas de desinfección

En la actualidad el método más común para la desinfección de agua residual consiste en la adición de cloro. Recientemente se han comenzado a apreciar algunos de los efectos adversos que pueden ser causados por la adición de cloro, como: formación de

trihalometanos que se consideran compuestos cancerígenos, razón por la cual se está investigando la utilización de otros desinfectantes. A continuación se describen algunos de los desinfectantes que generalmente se emplean en la desinfección de agua residual.

2.1.1.1 Cloro (Cl₂)

El cloro es miembro activo del grupo de los halógenos, es un gas amarillo verdoso, que pesa dos veces y media más que el aire. La cloración de las aguas es todavía uno de los métodos más comunes para destruir o desactivar microorganismos que causan enfermedades. Sin embargo la cloración puede producir efectos adversos, al reaccionar con materia orgánica, puede formar compuestos potencialmente carcinogénicos como el cloroformo y otros halometanos.

Una reacción química ilustrativa es la que usó Karl W. Scheele; quien descubrió el cloro en 1774, por calentamiento de ácido clorhídrico con óxido de manganeso (Weber, 1979):



Los métodos electroquímicos desarrollados en 1800 son ahora ampliamente usados para la manufactura de sosa cáustica (NaOH) y cloro molecular (Cl₂).



El cloro, puede aplicarse también utilizando algunos de sus compuestos; entre los más conocidos están el dióxido de cloro, hipoclorito de sodio, hipoclorito de calcio, etc.

2.1.1.2 Dióxido de cloro (ClO₂)

El dióxido de cloro, es un gas muy oxidante que no puede ser transportado en estado líquido como el cloro, por lo que requiere ser fabricado en el lugar donde se va aplicar. Las inversiones para la instalación de la planta productora de ClO₂ son elevadas, y solamente son factibles para una producción superior a una tonelada por día. El ClO₂ posee propiedades bactericidas, esporicidas y también destruye algunas formas de virus; su uso permite una rápida eliminación de bacterias en un rango de pH superior al del cloro, lo que lo hace particularmente recomendable para aguas alcalinas, donde su velocidad de desinfección es superior a la del cloro.

La experiencia con ClO₂ en aguas residuales es limitada, aunque existe gran interés para su aplicación como desinfectante. En Filadelfia y Ohio Estados Unidos se ha utilizado el dióxido de cloro en plantas de tratamiento de aguas residuales con capacidades de hasta 0.22 m³/s. La prevención de la formación de trihalometanos (THMs), es una de las principales razones por las que muchas plantas en Francia y otras ciudades de Europa emplean el dióxido de cloro.

2.1.1.3 Hipoclorito de Sodio (NaOCl)

Es un líquido de color amarillento, que no contiene más del 15% como cloro activo. Se puede preparar de la siguiente manera:



Por lo general se vende en depósitos de plástico o botellones de vidrio, conservando su actividad bactericida por lo menos durante tres meses. Este producto es fácil de manejar y poco costoso, por lo que se recomienda su empleo en plantas pequeñas.

2.1.1.4 Hipoclorito de calcio ($\text{Ca}(\text{OCl})_2$)

El hipoclorito de calcio difiere de la cal clorada, en que el cloruro de calcio inerte ya ha sido eliminado en gran parte. Por esta razón el hipoclorito de calcio contiene concentraciones altas de cloro disponible.

Por lo general se envasa en latas o en tambores; y se empleo requiere de un equipo especial para aplicación en seco o en forma de solución, mediante dosificadores.

2.1.1.5 Ozono (O_3)

Esta tecnología se presenta en el capítulo cuatro.

2.1.1.6 UV (Radiación ultravioleta)

El método de desinfección con luz ultravioleta involucra; la exposición de una película de agua a una o varias lámparas que emiten una radiación ultravioleta germicida de una longitud de onda comprendida entre 200 y 295 nm. Esta radiación cubre el espectro electromagnético en la región de 100 a 400 nm. Sin embargo, solamente las longitudes de onda por debajo de 290 nm muestran un efecto biocida (el efecto mayor se logra alrededor de los 260 nm) (Weber, 1979).

La primera aplicación de radiación ultravioleta para desinfectar agua data de 1877. En 1909 se experimentó en Marsella (Francia) un equipo de radiación ultravioleta para comparar su eficiencia con distintos tipos de dispositivos de filtración y de purificación. En 1942 se encontró que la radiación ultravioleta era más eficaz para la destrucción del virus de la poliomielitis en el agua.

Antes de 1978, el uso de la radiación ultravioleta se consideraba inapropiada y de alto costo debido a las limitaciones en el equipo del que entonces se disponía. Esta tecnología se ha confinado principalmente a Europa y Norteamérica. Los avances técnicos logrados en los últimos años hacen que la situación cambie debido a las desventajas que presenta la cloración con respecto a ésta. El uso de la radiación ultravioleta en la desinfección de aguas residuales llegó a ser aceptada como una alternativa efectiva y económica. Sin embargo, la experiencia en cuanto a funcionamiento y diseño resultó ser limitada.

La radiación ultravioleta por ser un agente físico no reacciona con la materia orgánica presente en el agua, sólo producen calor provocando con esto una elevación en la temperatura del agua. Esto trae ventajas ya que no altera el sabor, olor y color del agua, en contraste con la cloración y otros métodos de desinfección, que en algunos casos producen subproductos tóxicos o indeseables.

CAPÍTULO 3

3 DESINFECCIÓN QUÍMICA Y SU CINÉTICA

La acción desinfectante de las sustancias químicas, teóricamente se lleva a cabo en dos etapas: la primera consiste en la penetración de la pared celular y luego la reacción con las enzimas, paralizando de esta manera el metabolismo de la glucosa, provocando con esto la muerte de los microorganismos (Fair et.al, 1981).

3.1 Factores que influyen en la desinfección

Cuando se aplican los diferentes agentes desinfectantes se debe tener presente los siguientes factores:

- a) Tiempo de contacto.
- b) Concentración y tipo de agente químico.
- c) Naturaleza y condición del agua.
- d) Temperatura.
- e) Número de microorganismos.

3.1.1 Tiempo de contacto

Por lo general se ha observado que para una concentración dada del desinfectante, cuanto mayor sea el tiempo de contacto, habrá mayor remoción de microorganismos, quizá ésta sea una de las variables más importantes durante la desinfección.

Para aprovechar, al máximo el tiempo de contacto entre el desinfectante y el agua, es necesario incrementar la tendencia del tanque de contacto hacia un flujo pistón y evitar al máximo los cortos circuitos; para poder lograrlo, es necesario realizar un buen diseño hidráulico.

3.1.2 Concentración y tipo de agente químico

Según el tipo de agente químico utilizado, se ha comprobado que, dentro de ciertos límites la efectividad de la desinfección está en relación con la concentración. El efecto de la concentración ha sido formulado empíricamente (Fair et.al, 1981), como:

$$C^n t_p = \text{Constante}$$

Donde:

C: Concentración del desinfectante.

n: Constante.

t_p : Tiempo requerido para efectuar un porcentaje constante de mortandad.

La constante "n", se puede obtener comparando a través de una gráfica, el tiempo requerido para efectuar un porcentaje dado de mortandad. En general si "n" es mayor que 1, el tiempo de contacto es más importante que la dosis; si "n" es igual a 1 el efecto del tiempo y la dosis es aproximadamente igual (Fair et.al, 1981).

3.1.3 Naturaleza y condición del agua

La materia en suspensión puede proteger a los microorganismos existentes en el agua ya sea contra la desinfección química o física. Así, la materia orgánica reacciona con los desinfectantes químicos cambiando incluso su estructura; algunos de los compuestos resultantes pueden ser ineficientes y algunos pueden llegar a ser inocuos. Por otra parte el pH del agua es de suma importancia ya que valores muy altos o muy bajos ofrecen a los microorganismos un medio adverso; esto debido a que la acción de los desinfectantes es fuertemente influenciado por el pH del agua. Cada desinfectante tiene un intervalo de pH en el que se determina su máxima efectividad (Cáceres, 1990).

3.1.4 Temperatura

El efecto de la temperatura en la tasa de muerte de los microorganismos puede representarse por la ecuación de Arrhenius. El aumento de la temperatura da como resultado una mortandad de microorganismos más rápida; si esto se relaciona con el tiempo requerido para efectuar una remoción de microorganismos, la relación quedaría:

$$\log (t_1/t_2) = E(T_2 - T_1)/(2.303RT_1T_2)$$

Donde:

t_1 , t_2 : Tiempo de muerte de los microorganismos a las temperaturas T_1 y T_2 en °K, respectivamente.

E: Energía de activación.

R: Constante universal de los gases.

3.1.5 Número de microorganismos

En un sistema diluido como es el del agua residual, la concentración de organismos es raramente objeto de especial consideración. Sin embargo se puede llegar a la conclusión de que cuanto mayor sea la concentración de organismos, mayor será el tiempo requerido para alcanzar una tasa de remoción de microorganismos aceptable. Una relación empírica propuesta (Fair, 1966), para describir el efecto de la concentración de microorganismos es:

$$C^q N_p = \text{Constante}$$

Donde:

C: Concentración del desinfectante.

N_p : Concentración de microorganismos reducidos en un tiempo dado.

q: Constante referida al desinfectante.

3.2 Cinética de la desinfección

La desinfección del agua , no es instantánea ya que se realiza a una cierta velocidad, que está determinada por tres factores: el tiempo de contacto, la concentración del desinfectante, y la temperatura del agua (Fair. et.al, 1981).

La cinética de desinfección se realiza de tal manera que es posible describirla matemáticamente como una reacción de primer orden, se ha observado que para una concentración dada de desinfectante, cuanto mayor sea el tiempo de contacto, mayor será la remoción de microorganismos (Chick, 1908). En forma diferencial la ley de Chick se puede escribir de la siguiente manera:

$$dN/dt = -kN$$

Donde:

N: Número de organismos.

t: Tiempo de contacto.

k: Constante (t^{-1}).

Integrando el primer término de esta igualdad, entre N_0 , es decir el número de microorganismos en el tiempo cero, y N que representa al número de microorganismos en un tiempo determinado, se obtiene la siguiente expresión:

$$\ln(N/N_0) = -kt$$

Según esta expresión, el tiempo necesario para matar determinado tipo de microorganismos con un desinfectante químico, es directamente proporcional al logaritmo de la relación de microorganismos remanentes (N), sobre la cantidad de microorganismos iniciales (N_0).

CAPÍTULO 4

4 DESINFECCIÓN CON OZONO

Durante la Primera Guerra Mundial el cloro sustituyó al ozono, debido a que el cloro tenía un costo más bajo. Después de la Segunda Guerra Mundial el ozono, vuelve a tomar un nuevo auge en el tratamiento de aguas; debido a que las aplicaciones de éste, además de desinfectar el agua, también eliminaba olores y sabores desagradables.

En 1960 se da una amplia introducción de nuevas aplicaciones del ozono, muchas de estas aplicaciones requerían que el ozono fuera aplicado en las primeras etapas del tratamiento, dando origen al término preozonación. En los años sesenta, en Francia y Alemania el ozono, fue usado especialmente para oxidar al hierro y el manganeso.

A mitad de los años sesenta, fueron explotados por primera vez los efectos que producía el ozono como coagulante (Guillerd, 1968). En Francia y Escocia, se hicieron observaciones de que el ozono causaba una floculación espontánea, al entrar en contacto el agua con el ozono, lo que condujo al desarrollo del proceso de "Miscelización-Desmicelización"; con el cual se aumenta la remoción de partículas. Por lo anterior, muchas plantas en Europa emplean el ozono, como una aplicación moderna de preozonación, para el control de la turbiedad (AWWA, 1991). En Alemania y Suiza, se emplea el ozono, para oxidar ciertos microcontaminantes específicos, en particular compuestos fenólicos y algunos pesticidas.

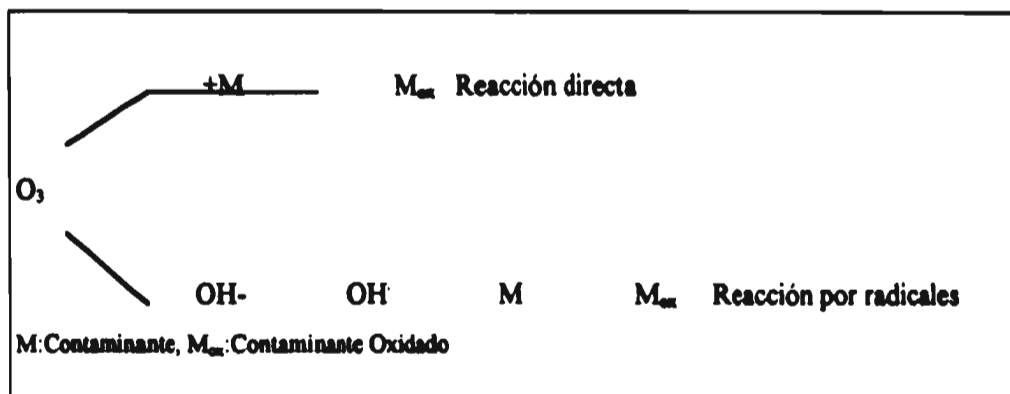
Las más recientes aplicaciones del ozono son la estabilización biológica, minimización del crecimiento potencial microbiológico y el control de subproductos durante la desinfección. El descubrimiento de los trihalometanos (THMs) en 1973 (Rook., 1974); que son subproductos que se forman durante la cloración, la promulgación de un estándar en EUA (Federal Register, 1979), además de las restricciones de la Comunidad Económica Europea en 1980, proporcionan las razones principales para cambiar el cloro.

El interés por el uso del ozono se ha incrementado en los últimos años, particularmente en EUA. Las nuevas regulaciones y subproductos de desinfección emergen como resultado del

“Amendments to Safe Drinking Water Act” en 1976. Por ejemplo, el uso del ozono en combinación con otros oxidantes como el peróxido de hidrógeno y luz ultravioleta; han sido evaluados en numerosos estudios de oxidación avanzada (AWWA, 1991).

4.1 Química del ozono

En solución acuosa, el ozono puede actuar sobre varios compuestos, esta reacción puede llevarse a cabo de dos formas; por reacción directa con el ozono molecular o por reacción indirecta de radicales que se forman cuando el ozono se descompone en el agua (AWWA, 1991). El esquema de estas dos reacciones del ozono se pueden ver en la FIGURA 4.1.



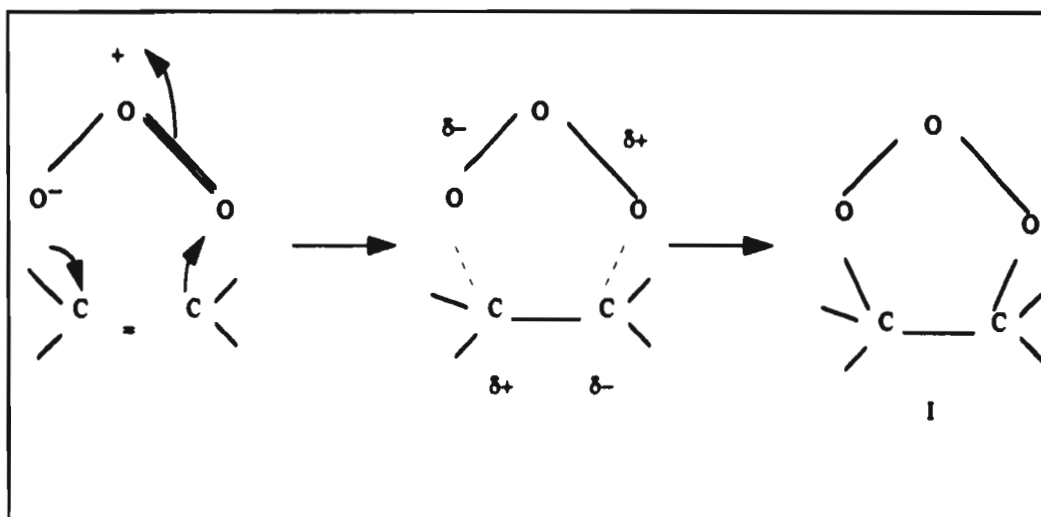
Fuente: AWWA; Lewis Publishers, 1991 (pp.12).

FIGURA 4.1 TIPOS DE REACCIÓN DEL OZONO

En la FIGURA 4.1, se puede observar como el ozono puede reaccionar como una molécula dipolar, como un agente electrofílico o nucleofílico, esto ocurre generalmente cuando existe la presencia de solventes orgánicos (Bailey, 1978).

4.1.1 Adición cíclica

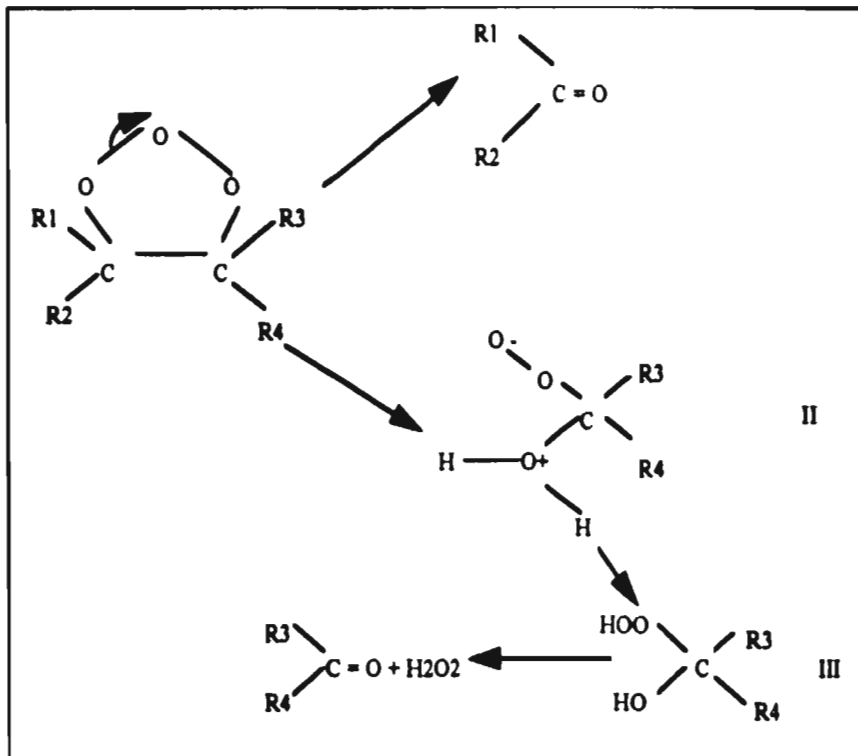
A esta adición también se le conoce como mecanismo de Criegee (ver FIGURA 4.2), y resulta de la estructura dipolar de la molécula del ozono, la cual está orientada en la posición 1-2 de la adición cíclica con uniones insaturadas; esto conduce a la formación del ozónido(I).



Fuente: AWWA; Lewis Publishers, 1991 (pp.12).

FIGURA 4.2 ADICIÓN CÍCLICA

En solventes protónicos como el agua, la descomposición del ozónido dentro de compuestos carbonilos (aldehídos y cetonas) y Zwitteriónicos (II); se descompone fácilmente en un hidroxi-hidroxiperóxido (III), que a su vez se descompone en compuestos carbonilos y peróxido de hidrógeno, esto se ilustra en la FIGURA 4.3.



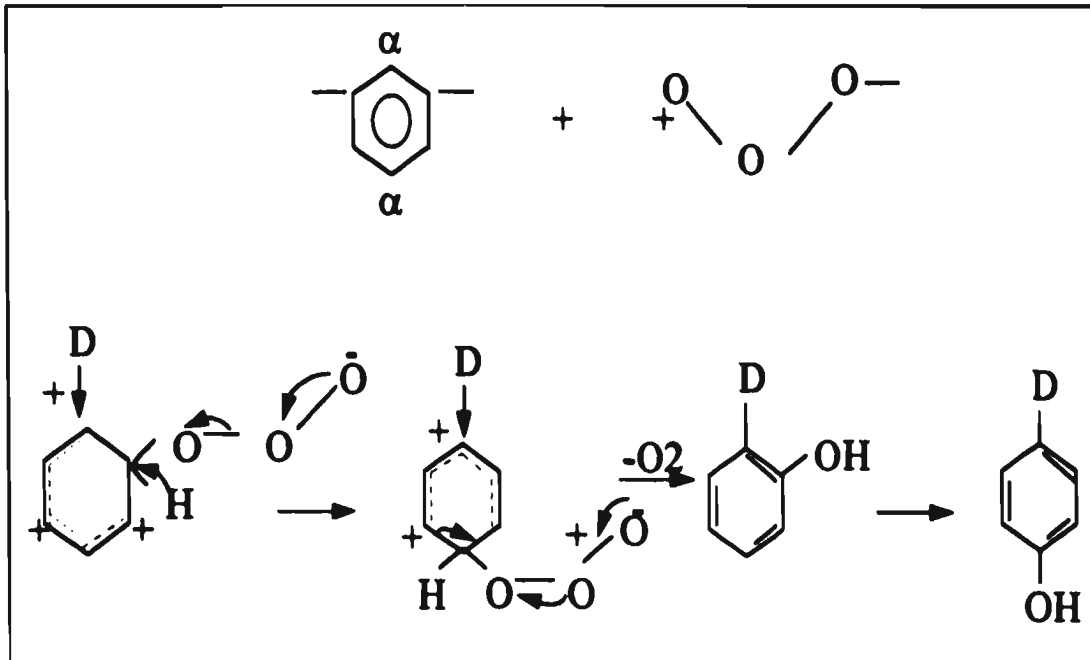
Fuente: AWWA; Lewis Publishers, 1991 (pp.12).

FIGURA 4.3 DESCOMPOSICIÓN DEL OZÓNIDO

4.1.2 Reacción electrofílica

La reacción electrofílica del ozono está restringida a sitios que tienen moléculas con una densidad electrónica fuerte, en particular en ciertos compuestos aromáticos sustituidos. Por ejemplo, en compuestos aromáticos sustituidos con grupos donadores de electrones (OH, NH₂ y compuestos similares), particularmente los carbonos que se encuentran en las posiciones orto y para; que son altamente reactivos con el ozono. En forma contraria los aromáticos sustituidos con baja densidad electrónica (-COOH, -NO₂), reaccionan débilmente con el ozono. En este caso el ataque de la molécula de ozono ataca principalmente en la posición meta (FIGURA 4.4), (AWWA, 1991).

El resultado de esta reacción con los compuestos aromáticos, conducen al grupo donador de electrones D (por ejemplo, fenoles y anilina), a reaccionar directamente con el ozono. Esto se representa en la siguiente reacción.



Fuente: AWWA; Lewis Publishers, 1991 (pp.13).

FIGURA 4.4 REACCIÓN ELECTROFÍLICA

4.1.3 Reacción nucleofílica

La reacción nucleofílica se establece en sitios moleculares con deficiencia de electrones; y muy frecuentemente en grupos de carbonos con baja carga. En conclusión las reacciones del ozono molecular, son extremadamente selectivas y se limitan a compuestos aromáticos insaturados y alifáticos.

4.2 Descomposición del ozono

La estabilidad del ozono se ve afectada por el pH, luz ultravioleta (UV), concentración de ozono y por los radicales libres (Tomiyasu, 1985). La velocidad de descomposición,

medida en presencia de exceso de radicales libres (los cuales provienen de reacciones secundarias), pueden expresarse por una ecuación cinética de primer orden, ésta se representa en la ECUACIÓN 4.1.

$$-\ln([O_3] / [O_3]_0)_{pH} = k't \quad (4.1)$$

Donde:

[O₃]: Concentración inicial de ozono.

[O₃]₀: Concentración final ozono.

k': Constante de velocidad de primer orden, para un determinado valor de pH.

t: Tiempo

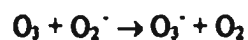
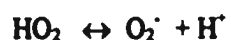
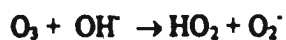
Esta constante refleja el hecho de que la velocidad de descomposición del ozono es de primer orden, con respecto a los iones ozono e hidróxidos, dando como resultado la ECUACIÓN 4.2.

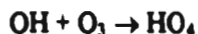
$$-d[O_3]/dt = k[O_3][OH^-] \quad (4.2)$$

Donde:

$$k = k' / [OH^-]$$

La descomposición del ozono es un proceso en cadena (Weiss, 1935; Staehelin, 1983), según las siguientes reacciones:





Según este mecanismo, los radicales OH[•] son los iniciadores de la descomposición del ozono. De hecho existen una amplia variedad de compuestos que son capaces de iniciar, promover o inhibir el proceso de descomposición por radicales.

Los iniciadores de la descomposición son aquellos compuestos capaces de inducir la formación del ión superóxido (O₂⁻) por medio de una molécula de ozono; algunos de estos compuestos son los iones hidropéroxido, hidroxilo, algunos cationes, compuestos orgánicos (ácido glioxílico, ácido fórmico y sustancias húmicas) y ciertos compuestos inorgánicos; la luz ultravioleta, a 237 nm, también induce la descomposición de radicales (Hoigné y Bader, 1977; Staehelin y Hoigné, 1983). Los promotores de la reacción con los radicales libres son las moléculas orgánicas e inorgánicas capaces de regenerar el ión superóxido (O₂⁻) a partir del radical hidroxilo. La proporción a la cual el superóxido, reacciona con el ozono es grande comparada con los reacciones anteriores. Algunos promotores son los grupos arilo, ácido fórmico, ácido oxálico, ácidos húmicos y fosfatos (Staehelin y Hoigné, 1983).

Los inhibidores de la reacción con los radicales libres, son aquellos compuestos capaces de consumir radicales OH[•] sin regenerar el ión superóxido. Algunos de los inhibidores más comunes incluyen los iones bicarbonato y carbonato, grupos alquilo, alcoholes terciarios y sustancias húmicas (Hoigné y Bader., 1985). Sin embargo con el fin de obtener un

adecuado rendimiento de la aplicación del ozono en el tratamiento de agua es necesario conocer las características fisico-químicas del agua a tratar.

4.3 Efecto del ozono sobre algunos microorganismos

Debido a que el ozono es un oxidante extremadamente reactivo, se cree que la muerte de los microorganismos por ozonación, ocurre directamente debido a la desintegración de la pared celular, es decir la lisis de la célula (Bringham, 1954). Se ha demostrado que el ozono es muy eficiente en la remoción de virus, lo que no se logra completamente con otros agentes desinfectantes. Estudios recientes, han descubierto, que si la oxidación no es completa es decir si no se convierte toda la materia orgánica en CO_2 se han detectado fragmentos de aldehídos y cetonas (Anselme et.al, 1988), por lo que es necesario evaluar los riesgos que estos subproductos puedan tener en la salud.

La inactivación de las bacterias con ozono, puede considerarse como una reacción de oxidación-reducción (Bringman, 1954); debido a que el ozono ataca directamente a las glicoproteínas y glicolípidos (ácidos grasos insaturados) de la membrana celular; dando como resultado una completa parálisis de la célula (Murray, 1965).

La muerte de los virus puede ser causada por dos mecanismos; una es debida a la ruptura del ácido ribonucleico viral o por la desnaturalización de proteínas (Cronholm., 1976). Estudios recientes, han encontrado que el ozono destruye algunos compuestos orgánicos refractarios (ácidos húmicos y fúlvicos), que son los principales precursores de la formación de trihalometanos. La alta capacidad de destrucción de virus, coloca a esta técnica como la más efectiva para la desinfección de agua residual. En la TABLA 4.1 se puede observar el efecto que tiene el ozono sobre algunos parámetros fisico-químicos y bacteriológicos, en algunas pruebas de desinfección que se han realizado.

TABLA 4.1 EFECTO DEL OZONO SOBRE ALGUNOS PARÁMETROS EN DIFERENTES EFLUENTES DE AGUA RESIDUAL, DURANTE LA DESINFECCIÓN.

EFLUENTE PROCESO BIOLÓGICO								
Dosis Ozono (mg/L)	Turbiedad (UTN)		pH		DQO (mg/L)		Coliformes Totales (UFC/100 ml)	
	Influyente	Efluente	Influyente	Efluente	Influyente	Efluente	Influyente	Efluente
18.3	3.2	3.6	7.3	7.54	58	47.7	1.4×10^5	1×10^3
EFLUENTE PRIMARIO AVANZADO								
Dosis Ozono (mg/L)	Turbiedad (UTN)		pH		DQO (mg/L)		Coliformes Fecales (UFC/100 ml)	
	Influyente	Efluente	Influyente	Efluente	Influyente	Efluente	Influyente	Efluente
15.4	10	7	*	*	99	50	1.6×10^6	2.5×10^3

Fuente: Absi F., y Gamache R. (1993). "PLANT PILOT INVESTIGATION OF OZONE DISINFECTION OF PHYSICO-CHEMICALLY TREATED MUNICIPAL WASTEWATER"; Proceedings of the Eleventh Ozone World Congress, Vol. 1 August 29-September 3. San Francisco, CA, USA.

4.4 Toxicidad

El ozono que en el aire ha sido considerado como un contaminante peligroso, por los efectos toxicológicos que causan y que se deben a su gran reactividad y su alto potencial redox (2.07); lo que lo hace capaz de oxidar numerosos compuestos bioquímicos, incluyendo los ácidos grasos insaturados, aminoácidos, nucleótidos, flavinas y proteínas (Carmichael N, 1982). Inicialmente el ozono ataca los pulmones, causando edema pulmonar, acompañado de una hemorragia capilar y de una inflamación del tracto respiratorio; una prolongada exposición puede causar una intoxicación de las células de la sangre y a proteínas.

En la TABLA 4.2 se muestra cómo a medida que aumenta la concentración de ozono en el ambiente, éste se puede volver nocivo e incluso mortal (Polymetrics, 1994). Es importante conocer las concentraciones de ozono, cuando se esté trabajando ya sea directamente o indirectamente con él o en lugares cercanos, de aquí la importancia de tener un buen sistema de eliminación.

TABLA 4.2 TOXICIDAD DEL OZONO A DIFERENTES CONCENTRACIONES

Nivel	Concentración (mg/L)	Tiempo de exposición	Efecto
Aceptable	0.01-0.4	---	Olor Irritación en ojos, nariz y garganta
	0.1	8 Hrs	
Peligroso	>0.1	Pocos minutos	Dolor de estómago, respiración disminuida
	0.250-0.5	2-5 Hrs	
	0.3	Máximo 15 min.	
	0.4	2 Hrs	Disminuye la función de los pulmones
	>0.6	2 Hrs	Tos y dolor de pecho Irritación de los pulmones, fatiga
	1	1-2 Hrs	Reducida habilidad para pensar claramente y cansancio que podría durar hasta 20 semanas, severa irritación de los pulmones
Crítico	>1.5	2 Hrs	Neumonía
	9	Intermitente	
	10	15	Inconciencia rápida
	11	15	
	50	30	Riesgo fatal

Fuente: Polymetrics. (1994). "MANUAL DEL USUARIO"

4.5 Propiedades físicas y formas de generar al ozono.

El ozono es una molécula poco estable, que se descompone rápidamente a medida que aumenta la temperatura; en recipientes cerrados, en aire, y a temperatura ambiente. La vida media del ozono se encuentra en el rango de 100 horas (Manley et.al, 1967). En la TABLA 4.3 se presentan algunas de las propiedades físicas del ozono.

TABLA 4.3 PROPIEDADES FÍSICAS DEL OZONO

PROPIEDAD	CANTIDAD
Peso molecular	48.0 gr/mol
Punto de ebullición	-11.9 °C
Punto de fusión	-251°C
Densidad	2.144 g/L

Fuente: AWWA., 1991, (101-102 pp).

En comparación con el oxígeno el ozono es 1.5 veces más denso y 13 veces más soluble en agua (McCarthy y Smith, 1974). La reacción de generación de ozono es reversible y un aumento en la temperatura causa una disminución de éste. Es importante tener un buen control de la temperatura en el generador por medio de un buen sistema de eliminación de calor.

Como ya se ha mencionado, la molécula del ozono es muy inestable, debido a que es producida a través de la forma elemental del oxígeno, y es por ello que al ozono se le llama una forma alotrópica del oxígeno.

La reacción de formación del ozono, se puede describir como una reacción endotérmica:



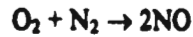
Basándose en los principios termodinámicos; el ozono no puede ser licuado por compresión. Disuelto en oxígeno líquido arriba del 30%, el ozono es relativamente seguro, mientras que a más del 72% de ozono en peso es explosivo (Waller y McTurk, 1965). Se ha intentado conservar al ozono en freón, pero su aplicación al tratamiento de aguas se vuelve un problema. Por todo lo anterior, el ozono se debe generar en el lugar donde se va aplicar.

Las formas de como se puede generar el ozono son:

- a) Descarga en corona
- b) Generación fotoquímica
- c) Generación electrofílica
- d) Generación radioquímica.

De éstas, la generación de ozono en descarga de corona es la más común, ya que consiste en aplicar una descarga eléctrica a una corriente de aire seco, oxígeno o una combinación de ambos.

Cuando la generación del ozono es a partir de aire, la humedad y el nitrógeno tienen que ser eliminados. Debido a que el nitrógeno reacciona con el oxígeno para formar óxidos nitrosos; si hay agua presente, se produce ácido nítrico, el cual genera problemas de corrosión. Las reacciones que se llevan a cabo se presentan a continuación:



En sistemas que están bien diseñados, se obtiene un máximo de 3 a 5 gramos de ácido nítrico por kilogramo de ozono producido a partir de aire (AWWA, 1991).

4.6 Sistemas de ozonación

Un sistema de ozonación requiere de las siguientes etapas:

- a) Preparación del gas de alimentación
- b) Generación del ozono
- c) Cámara de contacto
- d) Equipo de destrucción del ozono que no reaccionó en la cámara de contacto.

4.6.1 Preparación del gas de alimentación

Se han estudiado diferentes corrientes de alimentación durante la ozonación; tales como:

- a) Aire
- b) Oxígeno de alta pureza

c) Oxígeno de alta pureza reciclado

d) Aire enriquecido con oxígeno.

Cada uno de ellos tiene sus ventajas dependiendo del objetivo que se tenga para su aplicación, en la TABLA 4.4 se presentan algunas ventajas y desventajas de las diferentes formas de alimentación de gases.

TABLA 4.4 VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE DIFERENTES GASES DE ALIMENTACIÓN.

Gas alimentado	Ventajas	Desventajas
Aire	Sistema comúnmente aplicable en plantas pequeñas y grandes.	Alto consumo de energía (kw-h/kgO ₃). Máxima concentración de ozono 2.5% en peso.
Oxígeno de alta pureza	Aproximadamente genera el doble de ozono, que el anterior, bajo consumo de energía; altas concentraciones de ozono (5-8%).	Mayor atención a la seguridad y selección de materiales de construcción del sistema.
Oxígeno de alta pureza reciclado	Ahorro de oxígeno, altas concentraciones de ozono (10%).	Consideraciones especiales para su manejo, reciclamiento de contaminantes, altos costos de operación.
Aire enriquecido con oxígeno	Reduce costos de capital, es flexible para satisfacer demandas de ozono.	Es muy compleja su operación.

Fuente: AWWA, 1991; (pp 346).

El gas de alimentación debe tener buena calidad para garantizar el buen funcionamiento de cualquier sistema de generación de ozono. Para una adecuada operación con un mínimo de mantenimiento, el gas de alimentación ya sea aire u oxígeno, debe estar extremadamente seco, libre de partículas, hidrocarburos, y otros contaminantes.

La humedad influye en la producción del ozono; ésta puede reaccionar con los óxidos de nitrógeno para formar ácido nítrico, causando corrosión en el generador. El contenido de

humedad, generalmente se expresa como punto de rocío (temperatura a la cual la humedad se empieza a condensar a una presión dada). En los puntos donde se aplica el ozono, el punto de rocío debe ser extremadamente bajo, normalmente los sistemas de ozonación están diseñados a una temperatura de -80°C ; para propósitos de operación una temperatura de -60°C se considera aceptable (AWWA, 1991).

Las partículas y otros contaminantes (orgánicos o inorgánicos), pueden causar problemas en diferentes puntos del sistema de ozonación; por ejemplo los compresores deben ser protegidos con filtros, los desecadores deben ser protegidos de hidrocarburos y polvo, ya que pueden bloquear los poros y reducir la capacidad de retención de humedad.

4.6.2 Generación de ozono

La producción del ozono se realiza haciendo pasar oxígeno, aire, o una mezcla de ambos, entre dos electrodos que tienen un potencial de corriente alterna. Para asegurar una completa descarga, uno de los electrodos o ambos son cubiertos con material dieléctrico para formar una superficie equipotencial; la diferencia de potencial aplicada entre los dos electrodos dependerá de la naturaleza, espesor del dieléctrico empleado y de la separación de los electrodos (AWWA, 1991). Generalmente el voltaje aplicado es de 6000 a 18000 volts.

A una diferencia de potencial dada, la eficiencia del generador depende principalmente de la forma geométrica de sus componentes, de la temperatura y de la presión del gas. La producción de ozono depende de la diferencia de potencial aplicado y del flujo de gas alimentado. Para evitar la descomposición del ozono a oxígeno, el generador debe tener un sistema de enfriamiento que sea capaz de retirar el calor que se genera en el ozonador.

Los generadores de ozono, generalmente se agrupan en tres categorías (AWWA, 1991):

- 1) Frecuencia baja (50-60 Hz)**
- 2) Frecuencia media (60-1000 Hz)**
- 3) Frecuencia alta (>1000 Hz).**

De estos los que comúnmente se emplean son los generadores de frecuencia media.

En la actualidad los generadores son exclusivamente de forma tubular ya sea de tubo abierto o de tubo cerrado. Los generadores de tubo abierto son difíciles de enfriar, debido a esto no se obtiene una buena producción de ozono; se han alcanzado mayores eficiencias con generadores contruidos con tubos cerrados

4.6.3 Cámaras de contacto (disolución del ozono en el agua)

El contacto entre el ozono y el agua a tratar es un elemento muy importante en el sistema de ozonación, y debe diseñarse de tal manera que se maximice la transferencia del ozono gaseoso a la fase líquida. Esto se puede conseguir si existe una buena combinación en la cámara de contacto y un buen sistema de difusión.

En la disolución del ozono en el agua, se deben tomar en cuenta aspectos tales como: diseño, condiciones de operación, funciones específicas del ozono, puntos de aplicación y el diseño de las cámaras de contacto. Los sistemas de reacción están limitados por la transferencia de masa o por la cinética de reacción; es decir si la reacción es muy rápida, la velocidad de transferencia del ozono gaseoso a la fase líquida será el paso de control por lo que se requerirá de un alto coeficiente de transferencia de masa, esto se puede lograr empleando difusores en U (AWWA, 1991).

En caso contrario, es decir cuando la reacción es muy lenta, el sistema está limitado o controlado por la cinética de reacción por lo que se pueden usar difusores de burbujeo con o sin agitación mecánica.

La eficiencia en la transferencia (ET) del ozono, es más sensible a cambios en el flujo del gas, que a la concentración en el gas portador. Esto es importante e implica que un incremento en el flujo de gas, podría no resultar en un incremento lineal de la concentración de ozono absorbido (ozono transferido). La eficiencia de transferencia del ozono, también es afectada por la calidad del agua. Cuando está muy contaminada se pueden tener reacciones que pueden disminuir la difusividad y el coeficiente de transferencia de masa (AWWA, 1991).

CAPÍTULO 5

5 METODOLOGÍA

Para determinar la dosis de ozono con la que se obtuvo una remoción aceptable de coliformes fecales, la metodología se dividió en tres partes:

- 1) Caracterización del generador de ozono
- 2) Experimentación
- 3) Técnicas analíticas empleadas.

5.1 Caracterización del generador

En el capítulo cuatro, se explicaron los sistemas de generación de ozono, tipo de gas alimentado, etc. Pero una vez que se cuenta con un sistema de generación, es importante saber cuál es la relación que existe entre el voltaje y el flujo del gas de alimentación con la concentración de ozono a la salida del generador.

En esta experimentación el gas que alimenta al generador de ozono, consiste en aire enriquecido con oxígeno; producido mediante un generador AIRSEP; este equipo entrega el gas de alimentación con las siguientes características (ver TABLA 5.1).

TABLA 5.1 CARACTERÍSTICAS DEL GAS DE ALIMENTACIÓN

Parámetro	Cantidad
Presión	62.1 kPa
Punto de rocío	73°C
Pureza del O₂	90% (+/- 5%)

Fuente: Airsep., 1991

En la FIGURA 5.1 se presenta como varía la pureza del oxígeno en función del flujo de gas manejado por el generador.

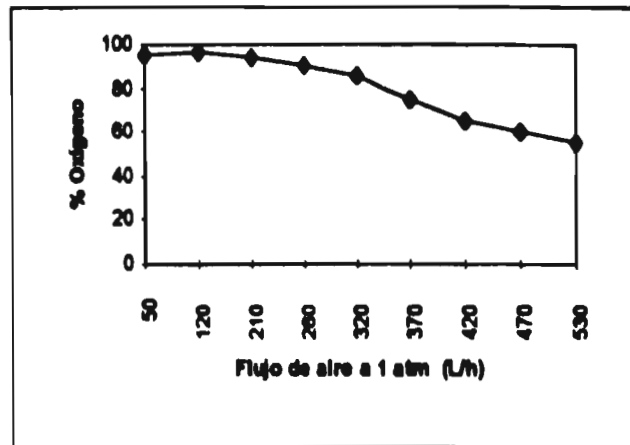


FIGURA 5.1 COMPORTAMIENTO DEL GENERADOR DE OXÍGENO

Durante la parte experimental se empleó un generador de ozono EMERLY TRAILIGAZ, que tiene un capacidad de producción de 19 g/h. La cuantificación del ozono se efectuó, mediante el método yodométrico; está técnica se explicará más adelante.

Así como es de suma importancia conocer el comportamiento del generador de ozono, también lo es conocer el comportamiento del ozono en fase acuosa, es decir el ozono que se ha transferido y que es capaz de oxidar a un contaminante. La solubilidad del ozono en el agua, se puede representar mediante la Ley de Henry (ECUACIÓN 5.1):

$$X = Y/H \quad (5.1)$$

Donde:

X: Fracción mol gas en el líquido, bajo condiciones de equilibrio gas-líquido.

Y: Presión parcial del gas sobre el líquido

H: Constante de la Ley de Henry .

Como se mencionó anteriormente, la solubilidad del ozono en el agua; varía con la temperatura de ésta. En la TABLA 5.2 se muestran valores de solubilidad del ozono en el agua a diferentes temperaturas.

TABLA 5.2 SOLUBILIDAD DEL OZONO EN EL AGUA A DIFERENTES TEMPERATURAS

[O ₃] ^a Fase gas (mg/L)	Temperatura del agua (°C)	Constante de Henry (atm/mol)	Solubilidad (mg/L)
12.07	0	1.94	8.31
12.07	5	2.18	7.39
12.07	10	2.48	6.50
12.07	15	2.88	5.60
12.07	20	3.76	4.29
12.07	25	4.57	3.53
18.11	0	1.94	12.47
18.11	5	2.18	11.09
18.11	10	2.48	9.75
18.11	15	2.88	8.40
18.11	20	3.76	6.43
18.11	25	4.57	5.29
24.14	0	1.94	16.62
24.14	5	2.18	14.79
24.14	10	2.48	13.00
24.14	15	2.88	11.19
24.14	20	3.76	8.57
24.14	25	4.57	7.05
36.21	0	1.94	24.92
36.21	5	2.18	22.18
36.21	10	2.48	19.50
36.21	15	2.88	16.50
36.21	20	3.76	12.86
36.21	25	4.57	10.58

^a La concentración se determinó a 20°C y 1 atm de presión
Fuente: Polymetrics, 1994.

5.2 Experimentación

Para evaluar la capacidad que tiene el ozono para desinfectar los diferentes efluentes de agua residual; se empezó por determinar su efecto a diferentes dosis y tiempos de retención. En la FIGURA 5.2 se presenta el arreglo experimental que se empleó, en este estudio.

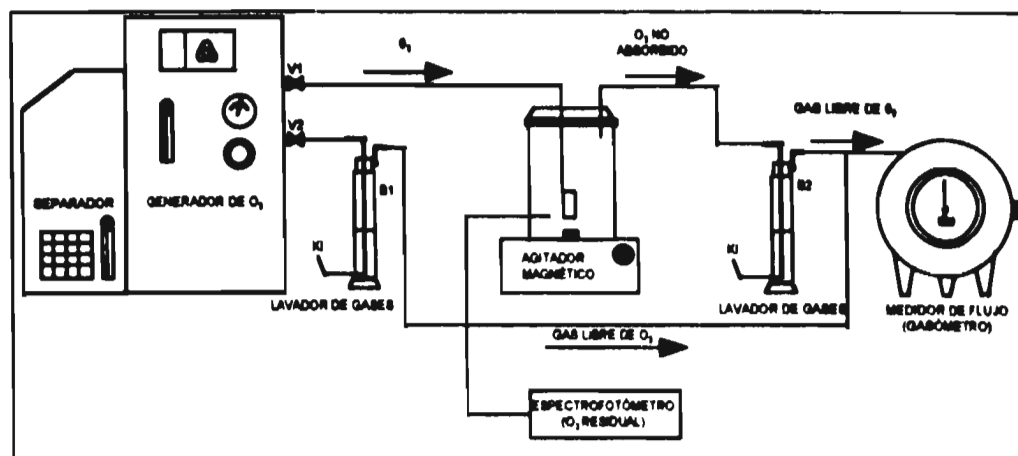


FIGURA 5.2 ARREGLO EXPERIMENTAL

Como se mencionó anteriormente, el estudio de desinfección se realizó, en dos diferentes tipos de efluentes de plantas de tratamiento de agua residual. Para el caso del efluente del proceso biológico, las muestras se tomaron de la Planta de Tratamiento de Agua Residual de Ciudad Universitaria (PTARCU). En este caso el estudio se dividió en dos partes: la primera consistió en realizar los estudios de desinfección antes de la época de lluvias y la otra parte durante la época de lluvias. En la primera parte se realizó un muestreo por día durante tres meses.

Como es de su conocimiento la PTARCU deja de operar en época de lluvias; por lo que en su momento se intensificó el muestreo; realizándolo tres veces por día. Esta decisión se tomó debido a que el agua no se podía preservar para análisis bacteriológicos posteriores; las experimentaciones se llevaron a cabo por un lapso de 25 días.

El volumen de agua que se empleó para cada experimento fue de un litro, para el caso de la PTARCU con tiempos de retención de 1, 2, 3, 4 y 5 minutos. Cabe señalar que cada experimentación se realizó por duplicado.

En el caso del efluente del Primario Avanzado, las muestras se tomaron de la Planta Piloto que se encuentra ubicada en el kilómetro 27 del Gran Canal; el muestreo se realizó durante tres meses.

El volumen de agua que se ocupó fue de 750 ml, debido a que cuando se estaba ozonando el agua se generaba demasiada espuma, causando problemas en el momento de cuantificar el ozono que no reaccionaba en el reactor. Los tiempos que se emplearon en este efluente fueron de 2, 4, 6, 8, 9, y 10 minutos, al igual que en el efluente del proceso biológico, cada experimento se realizó por duplicado.

En ambos casos, la metodología para determinar la concentración de ozono que se suministraba al reactor fue la misma.

Inicialmente el reactor se llenó con 1 litro de agua para el caso del efluente del proceso biológico, y de 750 ml para el efluente del primario avanzado. Una vez adicionada el agua se realizaron las conexiones necesarias para suministrar el ozono; para simular un reactor completamente mezclado se realizó una agitación en el reactor de aproximadamente 800 rpm, mediante un agitador magnético, inmediatamente después se adiciona el ozono abriendo la válvula 1 (V1). Para que el sistema estuviera bien controlado, se verificó que el reactor estuviera libre de fugas.

El ozono que no se alcanza a disolver en el agua es conducido por una salida que tiene el reactor hacia un frasco lavador de gases (B2), con solución de yoduro de potasio (KI). El gas ya libre de ozono, entra a un gasómetro para registrar el volumen que no reacciona. Con esta información se calcula la concentración de ozono a la salida del reactor.

Una vez que se completó el tiempo de ozonación, se suspende la adición de ozono, cerrando la válvula 1 (V1), abriendo inmediatamente la válvula (V2). En el esquema anterior, se puede observar una desviación en la línea que lleva el ozono hacia el reactor; esta derivación tiene dos finalidades, la primera es la de detener la adición de ozono entre mediciones consecutivas sin variar las condiciones de flujo, y la segunda para determinar la cantidad de ozono que se está suministrando al reactor.

Posteriormente se toman varias muestras, las dos primeras de 10 ml para la determinación de ozono residual, una tercera muestra de 100 ml para la determinación de coliformes fecales, una cuarta muestra de 2 ml para la determinación de la demanda química de oxígeno. Para la determinación de turbiedad se tomó una muestra de aproximadamente 20 ml, para la medición del pH solamente se introducía el electrodo por una de las bocas del reactor.

Las siguientes ecuaciones son las que se emplearon para calcular la dosis de ozono (Gottschalk y Jekel, 1993).

$$[O_3]_{og} = (T)(N)(24)/2 \quad (5.1)$$

$$[O_3]_{ET} = ([O_3]_{og})(T)(F)/G \quad (5.2)$$

$$[O_3]_o = ([O_3]_{og})(T)(F)/V_m \quad (5.3)$$

$$[O_3]_R = (A_b - A_m)(100)/(0.42)(V_m) \quad (5.4)$$

$$[O_3]_T = [O_3]_{ET} - [O_3]_o - [O_3]_R \quad (5.5)$$

Donde:

$[O_3]_{og}$: Ozono que sale del generador (mg/L)

$[O_3]_{ET}$: Ozono que se suministra al reactor (mg/L)

$[O_3]_o$: Ozono que no reaccionó en el reactor (mg/L)

$[O_3]_R$: Ozono residual (mg/L)

$[O_3]_T$: Ozono transferido (dosis de ozono)(mg/L)

T : ml de tiosulfato de sodio consumidos

N : Normalidad del tiosulfato de sodio

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

0.42: Factor de sensibilidad de 20.00/cm para el cambio de absorbancia (600 nm) por mol de ozono añadido.

G : Volumen medido en el gasómetro (L/min)

T : Tiempo de retención (min)

F : Flujo de gas (L/min)

V_m : Volumen de muestra (L)

A_b : Absorbancia del blanco

A_m : Absorbancia de la muestra

5.3 Técnicas analíticas

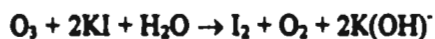
Para la medición del ozono y los diferentes parámetros, se emplearon las siguientes técnicas*:

- 1) Determinación de ozono en fase gaseosa por el método yodométrico (Birdsall et.al, 1952)
- 2) Determinación de ozono en fase acuosa por el método de Índigo (Bader y Hoigné, 1981)
- 3) Coliformes fecales por filtros de membrana (APHA, 1989)
- 4) Turbiedad medida basada en el método nefelométrico (HACH modelo 2100P)
- 5) Demanda Química de Oxígeno determinada espectofotométricamente (HACH modelo 45600 y un Espectrofotómetro HACH DR-2000, Mod. 44863)
- 6) pH (Potenciómetro HACH -Mod.43800)

* Todos estos métodos de análisis están reconocidos por la USEPA (United States Protection Agency) según el libro de los Métodos Estandarizados para análisis de agua potable y residual.

5.3.1 Determinación de ozono en fase gaseosa

Existen numerosos métodos para la determinación del ozono, todos se basan en el poder de desplazar el yodo a diferente pH de una solución de yodo alcalina. La reacción involucrada es:



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

Reactivos:

- a) Solución 0.1 N de tiosulfato de sodio
- b) Solución 1 N de ácido sulfúrico
- c) Solución 0.1 N de dicromato de potasio (para estandarizar la solución de tiosulfato).
- d) Solución de yoduro de potasio al 2%.
- e) Solución indicadora de almidón

Equipo:

- a) Gasómetro húmedo
- b) Pipetas
- c) Bureta
- d) Matraces aforados de 1 L.
- e) Manguera de teflón o de PVC.

Técnica:

En un matraz añadir 80 ml de agua destilada, añadir con agitación 1 ml de ácido sulfúrico concentrado, 10 ml de solución de dicromato y 1 g de yoduro de potasio (dejar que reaccione el dicromato por 6 min en la obscuridad). Titular inmediatamente con solución de tiosulfato de sodio 0.1 N, hasta que el color amarillo del yodo liberado desaparezca. En ese momento añadir un mililitro de solución de almidón y continuar con la titulación hasta que el color azul desaparezca.

La normalidad del tiosulfato de sodio se calcula de la siguiente forma:

Normalidad del tiosulfato = $1 / \text{ml de tiosulfato consumidos}$

Determinación de ozono:

- 1.- Llenar la botella de lavado de gases con 200 ml de tiosulfato de sodio.
- 2.- Conectar la manguera al punto de muestreo del generador e introducir el otro extremo en la botella de lavado de gases que contiene la solución de KI.
- 3.- Ajustar el flujo de aire ozonado a aproximadamente 1 L/min. Desconectar la manguera de la botella de lavado de gases que contiene la solución de KI y conectarla a otra botella de lavado que también contiene KI. Esto se hace para ajustar el flujo de ozono y evitar que se escape en el aire.
- 4.- Burbujear un volumen de aproximadamente de 2 a 3 litros, este volumen se mide con el gasómetro.
- 5.- Acidificar esta solución con 10 ml de ácido sulfúrico 1 N.
- 6.- Titular esta solución con tiosulfato de sodio
- 7.- Añadir 2 ml de solución indicadora de almidón y continuar la titulación.
- 8.- Registrar el volumen gastado de tiosulfato.

Cálculos:

$$[\text{O}_3]_{\text{ef}} = (T)(N)(24)/G$$

5.3.2 Determinación de ozono en fase acuosa

Esta determinación se basa en un método cuantitativo, selectivo, simple y reemplaza a los métodos basados en la determinación de oxidantes totales. Es aplicable a agua de lagos, ríos, aguas subterráneas que contienen manganeso y que son extremadamente duras y agua residual tratada biológicamente (APHA., 1989).

Este método se basa en el siguiente principio: La disminución de la absorbancia es lineal con el incremento de la concentración de ozono. La constante de proporcionalidad a 600 nm es 0.42 ± 0.01 cm/mg/L.

Se sabe que existen algunos compuestos que interfieren en la medición, tal es el caso del peróxido de hidrógeno y de los peróxidos orgánicos, que decoloran el reactivo de índigo muy lentamente. El peróxido de hidrógeno no interfiere si el ozono se mide en menos de 6 horas después de añadir los reactivos. Los peróxidos orgánicos pueden reaccionar con mayor rapidez. El Fe (III) interfiere, Mn (III) no interfiere pero es oxidado por el ozono a formas que decoloran el reactivo. El cloro también interfiere, pero puede ser enmascarado por el ácido malónico. El bromo, que puede formarse por oxidación de Br^- , interfiere (1 mol de HOBr corresponde a 0.4 moles de ozono).

Instrumental:

Espectrofotómetro

Reactivos:

a) Solución madre índigo:

En un matraz aforado, con 500 ml de agua destilada, agregar 1 ml de ácido fosfórico concentrado y añadir, con agitación 770 mg de trisulfonato potásico de índigo, aforar con agua destilada. Una dilución de 1:100 exhibe una absorbancia de 0.02 cm a 600 nm. Esta solución es estable por cuatro meses (se debe almacenar en frascos ámbar).

b) Reactivo I: Añadir en un matraz aforado de 1 L 20 ml de solución madre, añadir 10 g de fosfato monobásico de sodio y 7 ml de ácido fosfórico concentrado, diluir hasta el aforo (almacenar en frascos ámbar).

c) Reactivo II: Procédase como en el Reactivo I, añadiendo 100 ml en lugar de 20 ml de solución madre.

Método espectrofotométrico:

a) Para un intervalo de concentración de ozono de 0,01 a 0.1 mg/L; añadir 10 ml de reactivo índigo I a dos matraces aforados de 100 ml. Llenar uno de ellos hasta el aforo con agua destilada (blanco) y el segundo con la muestra a analizar. Medir la absorbancia de las dos diluciones a 600 nm lo antes posible, y siempre en las cuatro horas siguientes. Utilizar celdas de 10 cm.

b) Para concentraciones superiores a 0.3 mg/L. Procédase como antes utilizando el reactivo II en lugar del reactivo I, pero utilizar un menor volumen de muestra. Diluir la mezcla resultante a 100 ml con agua destilada.

Cálculos:

$$[O_2]_R = (A_b - A_m)(100)/(0.42)(V_m)$$

5.3.3 Determinación de coliformes fecales (CF)

La determinación de CF se llevó a cabo por la técnica de filtros de membrana. Se utilizó un volumen de muestra (o dilución) de 10 ml de muestra, el cual se hace pasar a través de una membrana de filtración (Millipore de 0.45 μ m de tamaño de poro), para la retención de los coliformes. La membrana con la muestra ya filtrada, se transfirió a cajas Petri con medio MFC. Posteriormente son incubadas en un baño de agua a 44.5 ± 0.2 °C durante 24 Hrs; tras la incubación se realiza el conteo de las colonias típicas.

5.3.4 Turbiedad

Mide la cantidad de materia suspendida en forma indirecta, cuantificando la cantidad que es reflejada, adsorbida y dispersada por el agua al hacer incidir un rayo de luz.; cuanto mayor es la intensidad de luz dispersada, más intensa es la turbiedad. La medición se realizó tomando aproximadamente 20 ml de muestra sin desinfectar y ya desinfectada.

5.3.5 Demanda química de oxígeno (DQO)

Para esta prueba, se tomaron 2 ml de muestra y se pusieron en tubos que contienen ácido sulfúrico, dicromato de potasio y sulfato de mercurio como agente de compensación de la interferencia por cloruros. La mezcla se incubó a 150°C en un digestor HACH, durante un periodo de 2 Hrs, para garantizar la completa digestión.

Posteriormente la muestra digerida se lleva a temperatura ambiente (en baño de agua fría), para determinar la absorbancia se empleó un espectofotómetro HACH y se manejaron los rangos de 450-620 nm, el primero para el efluente del proceso biológico y el segundo para el efluente del primario avanzado, y de esta manera se determinan los valores de la DQO.

5.3.6 pH

La medida del pH es una de las pruebas más importantes y utilizadas en el análisis químico del agua. La concentración de los iones hidrógeno es medida por medio de un electrodo de vidrio el cuál desarrolla un potencial proporcional a los iones hidrógeno que penetran por su membrana ésta medición se hace por medio de un potencial estándar. El pH se determinó con un potenciómetro HACH previamente calibrado y sólo consistió en introducir el electrodo por una de las bocas del reactor.

CAPÍTULO 6

6 COSTOS

El requerimiento de capital para la construcción y equipo de un sistema de ozonación, varía con el tamaño de la planta, tipo de operación y momento en el cual se hace la inversión. También pueden influir factores como las condiciones económicas que se estén viviendo en ese momento en el país. El equipo de una planta puede clasificarse en dos tipos: el equipo necesario para el tratamiento del agua y el equipo necesario para proporcionar los servicios (Flores, 1996). El costo de desinfección puede ser expresado por gramo de ozono producido o por metro cúbico de agua tratada.

6.1 Parámetros de diseño que afectan los costos

Debido a que la industria de equipos generadores de ozono es relativamente joven; en México no existe información relacionada sobre el índice de costos, por lo que se parte de la experiencia de plantas instaladas en EUA y Francia, que emplean el ozono en alguna parte de su tratamiento. Los parámetros necesarios para llevar a cabo la evaluación económica son: dosis, tiempo de contacto y cantidad de flujo a tratar.

El costo por metro cúbico de agua para la desinfección o eliminación de algún contaminante, es la suma de los costos de capital más los costos de operación. Dentro de los costos de capital en la generación de ozono están considerados los costos de preparación del gas de alimentación, equipo de generación de ozono, sistema de destrucción (ozono que no se disolvió en el agua), tuberías, válvulas, instrumentación, sistema de disolución de ozono, control e instalación (AWWA, 1991).

El porcentaje representado para los componentes que integran los costos de capital son (AWWA., 1991):

- a) Generación 53%
- b) Construcción 25%
- c) Contactor 22%

Los componentes que integran los costos de mantenimiento y operación son:

- a) Potencia para el gas de alimentación, generación y sistemas de destrucción de ozono.
- b) Mano de obra para operar el equipo 24 hrs. al día.
- c) Mantenimiento.
- d) Enfriamiento.

Los porcentajes que representan cada uno de los componentes de mantenimiento y operación son los siguientes:

Para pequeños sistemas (menos de 1.89 kg/h de ozono):

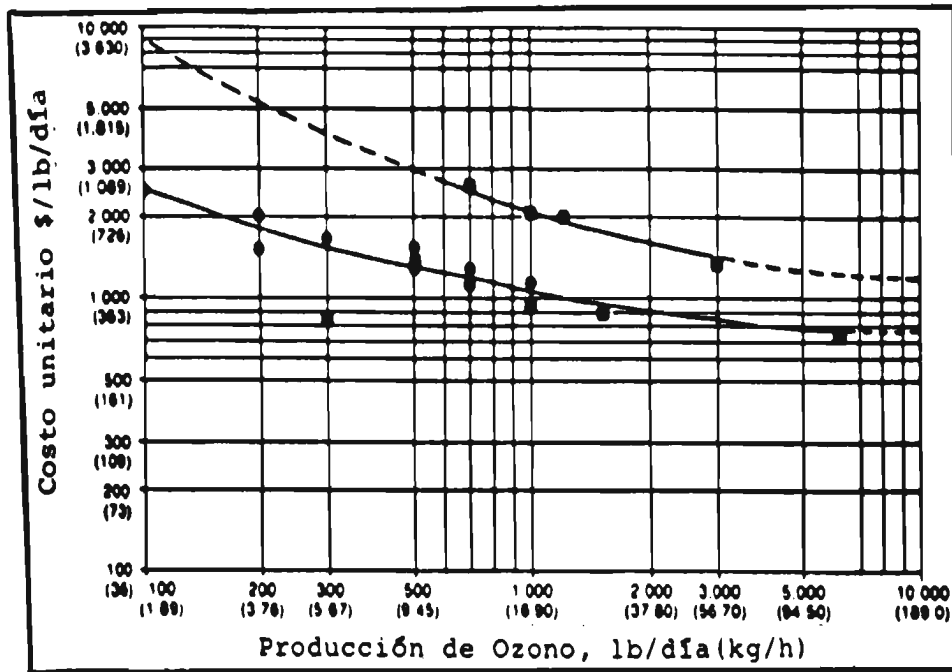
- Potencia 22%
- Mano de obra 38%
- Mantenimiento 38%
- Enfriamiento 2%

Para sistemas mayores de 1.89 kg/h de ozono:

- Potencia 75%
- Mano de obra 5%
- Mantenimiento 15%
- Enfriamiento 5%

Se puede observar que el mayor costo en un sistema de alta producción de ozono, corresponde a la potencia (AWWA., 1991).

Para la evaluación económica se hace uso de una estimación de costos obtenida a partir de la experiencia en plantas instaladas en EUA y Francia; estos se representan en la FIGURA 6.1.



Fuente: AWA, 1991 (pp. 495)

FIGURA 6.1 DIAGRAMA PARA ESTIMAR LOS COSTOS DE CAPITAL

En la FIGURA 6.1 se observan dos curvas; las cuales sirven para estimar el costo unitario/libra/día en dólares. Se recomienda utilizar la curva superior, ya que con ella se estima un costo mayor. Los círculos representan los costos para las plantas estadounidenses y los cuadros de las plantas francesas.

La capacidad de producción, calculada en la FIGURA 6.1 y los porcentajes presentados anteriormente, son los datos necesarios para estimar los costos de capital.

La capacidad de producción se calculó de la siguiente forma:

$$P = (Q_L)(D)(3.6) \quad (6.1)$$

Donde:

P: Producción (kg/H)

Q_L : Flujo de agua a tratar (m^3/s)

D: Dosis (g/m^3)

3.6: Factor para convertir a kg/H

Los costos de capital que se obtuvieron tienen que ser anualizados, para poder ser sumados a los costos de mantenimiento y operación, ya que estos últimos se calculan a partir de parámetros de operación anual; es decir, un flujo promedio anual y una dosis promedio anual, los cuáles son inferiores a las de diseño.

Para anualizar se aplica una depreciación del 10% de interés a 20 años, utilizando el método lineal (Solonet et.al, 1989).

$$\text{Costo de capital anual} = C_t * (i * (1 + i)^n) / ((1 + i)^n - 1) \quad (6.2)$$

Donde:

C_t: Costo de capital total

i: Interés

n: Amortización.

Para obtener los costos de mantenimiento y operación, se tiene que calcular el costo de potencia y los porcentajes anteriormente mencionados; y en este caso el costo de potencia se calcula de la siguiente forma:

$$CP = (P_M)(E_s)(CE) \quad (6.3)$$

Donde:

CP: Costo de potencia (\$/H)

P_M: Producción promedio (kg/H)

E_s = Energía específica (kWH/kg)

CE: Costo de energía (\$/kWH)

Una vez obtenidos los diferentes costos (capital, mantenimiento y operación), estos se suman y se obtiene el costo total de desinfección por metro cúbico de agua a desinfectar.

CAPÍTULO 7

7 RESULTADOS

Para determinar la dosis de ozono en los efluentes del primario avanzado y del proceso biológico. Primero fue necesario realizar una caracterización del generador de ozono; debido a que la concentración de ozono variaba si se modificaban las condiciones de operación del generador (voltaje aplicado y flujo de aire alimentado al generador).

Una vez que se sabía cuál era el comportamiento del generador de ozono; se iniciaron los estudios de desinfección. Estos estudios se iniciaron con la caracterización físico-química del agua a desinfectar antes y después de ser ozonada, esto último permitió evaluar los efectos del ozono sobre algunos parámetros físico-químicos tales como: demanda química de oxígeno (DQO), pH y turbiedad. El parámetro que se tomó como medida de la eficiencia del proceso de desinfección fueron los coliformes fecales.

Como se mencionó, el estudio de desinfección para el caso de la planta de Ciudad Universitaria se dividió en dos etapas. La primera etapa que se desarrolló durante tres meses, consistió en evaluar la dosis de ozono del efluente antes de la época de lluvias, y la segunda etapa se evaluó durante la época de lluvias, esta se realizó durante 25 días. Las condiciones de operación del sistema fueron:

Tiempos de contacto: 1, 2, 3, 4 y 5 min.

Flujo de aire de alimentación: 0.70 L/min.

Temperatura: 20°C

Voltaje: 28%

Amperes: 0.7

Para el caso del efluente del primario avanzado las condiciones de operación fueron las mismas a excepción de los tiempos de contacto que en este caso fueron de 2, 4, 6, 8, 9 y 10 min. Cabe señalar que la experimentación con este efluente se realizó durante tres meses.

7.1 Evaluación de la concentración de ozono (fase gas), variando el voltaje del generador

De acuerdo al plan de trabajo, el generador de ozono se operó a seis diferentes voltajes, manteniendo el flujo de gas ozonado a 51 L/h. El gas de alimentación tiene una concentración del 95% en volumen de oxígeno, a temperatura (20°C) y presión ambiente (585 mm Hg). El experimento se realizó por triplicado, en la TABLA 7.1 se presentan los resultados que se obtuvieron.

TABLA 7.1 RELACIÓN ENTRE EL VOLTAJE APLICADO Y LA CONCENTRACIÓN DE OZONO EN FASE GAS EN CONDICIONES NORMALES*.

Voltaje aplicado (Volts)	Prueba 1 [O ₃] (mg/L)	Prueba 2 [O ₃] (mg/L)	Prueba 3 [O ₃] (mg/L)	[O ₃] Promedio (mg/L)
20	0.72	0.72	0.60	0.68
22	0.96	0.96	0.84	0.92
24	4.92	5.16	5.04	5.04
26	18.36	18.96	18.72	18.69
28	32.64	32.88	332.88	32.80
30	41.64	42.36	42.12	42.04

* Presión y temperatura Ciudad de México

Como se puede observar en la TABLA 7.1, conforme se va aumentando el voltaje, la concentración de ozono en fase gaseosa va aumentando. Esto se puede apreciar mejor en la FIGURA 7.1.

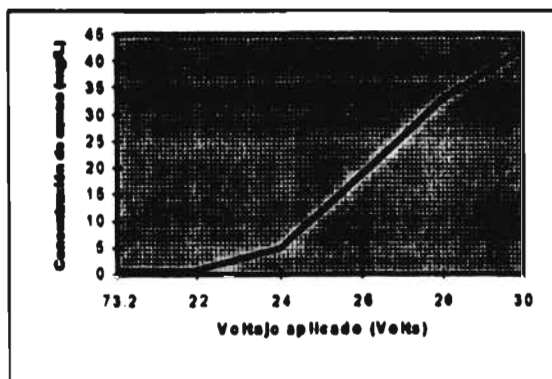


FIGURA 7.1 RELACIÓN ENTRE LA CONCENTRACIÓN DE OZONO EN FASE GAS Y EL VOLTAJE APLICADO

LA FIGURA 7.1 puede ser de bastante utilidad en un sistema de desinfección, donde las condiciones fisico-químicas y biológicas del agua a tratar varíen; de ésta manera la dosis de ozono se puede controlar variando el voltaje que se aplica al generador manteniendo constante el tiempo de contacto, flujo de gas y el volumen de reacción.

7.2 Evaluación de la relación entre la concentración de ozono (fase gas) y el flujo de aire alimentado.

Esta evaluación consistió en realizar pruebas que nos permitieran estimar el efecto que existe en la concentración del ozono al variar el flujo de gas de alimentación al generador. Para esto se necesitó fijar un voltaje que fué de 30 volts, que representa el 30% del máximo voltaje de salida. El fabricante recomienda trabajar con una intensidad de corriente de 1 Ampere, el cual corresponde al 34% del máximo voltaje de salida. Esto se realizó con la finalidad de alargar el tiempo de vida útil del generador de ozono.

Los flujos que se manejaron, fueron aquellos en los cuáles se podía obtener la máxima concentración de oxígeno. En la TABLA 7.2 se pueden observar los resultados que se obtuvieron en este experimento; de igual manera cada experimento se realizó por triplicado.

TABLA 7.2 RELACIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DE OZONO (FASE GAS), Y EL AIRE ALIMENTADO EN CONDICIONES NORMALES*.

Flujo de gas (L/h)	Prueba 1 [O ₃] (mg/L)	Prueba 2 [O ₃] (mg/L)	Prueba 3 [O ₃] (mg/L)	[O ₃] Promedio (mg/L)
73.20	36.60	35.64	37.20	36.48
146.40	21.48	21.00	21.24	21.24
220.20	10.32	10.56	10.56	10.48
293.40	8.40	8.04	8.28	8.24
367.80	3.25	3.27	3.27	3.26

* Presión y temperatura de la Ciudad de México.

Como se puede apreciar en la TABLA 7.2 y FIGURA 7.2; la concentración de ozono disminuye conforme se va aumentando el flujo de gas de alimentación.

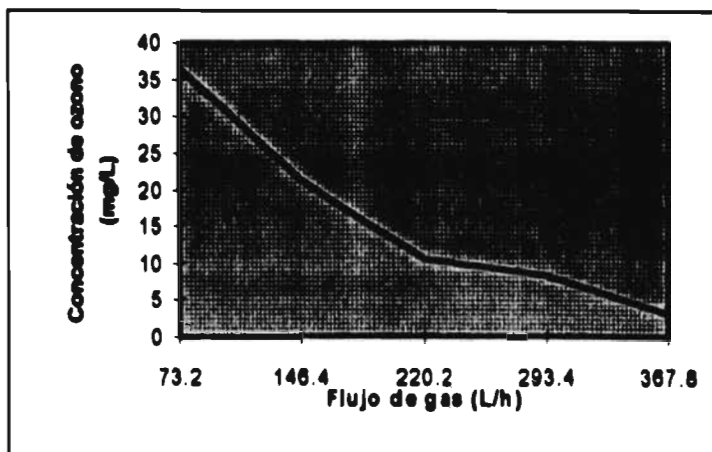


FIGURA 7.2 RELACIÓN ENTRE LA CONCENTRACIÓN DE OZONO Y EL FLUJO DE AIRE ALIMENTADO

Analizando la FIGURA 7.2 se observa que con flujos de alimentación bajos, se obtienen dosis de ozono altas, esto es debido a que el oxígeno tiene un tiempo de residencia mayor en el generador. Si en un sistema de tratamiento se aplican flujos pequeños; este flujo no tendría la suficiente presión para alcanzar el agua, cosa contraria sucede si se aplica un flujo mayor, aunque su concentración en fase gas disminuya. La FIGURA 7.2 puede ser de mucha utilidad para saber qué concentración de ozono se obtendrá si se variara el volumen flujo de alimentación de aire.

7.3 Determinación de la dosis de ozono para el efluente del primario avanzado.

La dosis de ozono, se determinó tal y como se reportó en el capítulo cinco (pág.46). Cabe mencionar que los resultados se reportan como promedios trimestrales.

TABLA 7.3 COMPORTAMIENTO DE LA DQO, pH Y TURBIEDAD A DIFERENTES TIEMPOS DE CONTACTO

Tiempo (min)	pH	DQO (mg/L)	Turbiedad (UTN)
0	7.44	208	96.4
2	7.57	197	103
4	7.69	194	110
6	7.76	192	113
8	7.78	188	112
9	7.90	182	106
10	7.85	178	102

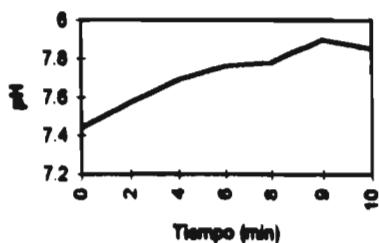
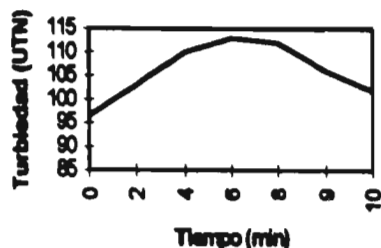
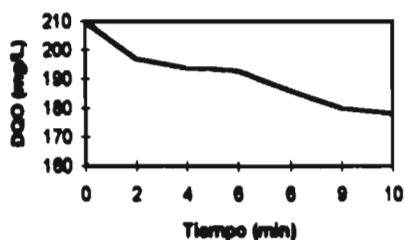


FIGURA 7.3 COMPORTAMIENTO DE LA DQO, pH Y TURBIEDAD A DIFERENTES TIEMPOS DE CONTACTO CON OZONO

Como se puede observar en la TABLA 7.3 y FIGURA 7.3, la tendencia en la concentración de la DQO es de disminuir conforme se aumenta el tiempo de contacto con el ozono (Rice, 1992). El pH presentó variaciones poco significativas. Con respecto a la turbiedad, su tendencia fue de aumentar a un máximo y posteriormente empezó a disminuir, esto se vio a los nueve minutos de tiempo de contacto; algo similar se reporta en la literatura (Rice, 1992).

Las dosis de ozono que se obtuvieron durante la experimentación se presentan en la TABLA 7.4; éstas se reportan como promedio trimestral.

TABLA 7.4 REMOCIÓN DE COLIFORMES FECALES A DIFERENTES DOSIS DE OZONO

$[O_3]_T$ (mg/L)	$[O_3]_R$ (mg/L)	Coliformes fecales (UFC/100ml)
0	0	36×10^7
13.35	0.0476	35×10^6
15.23	0.071	30×10^4
20.45	0.26	35×10^3
28.27	0.357	4×10^3
32.97	0.428	0
42.12	0.465	0

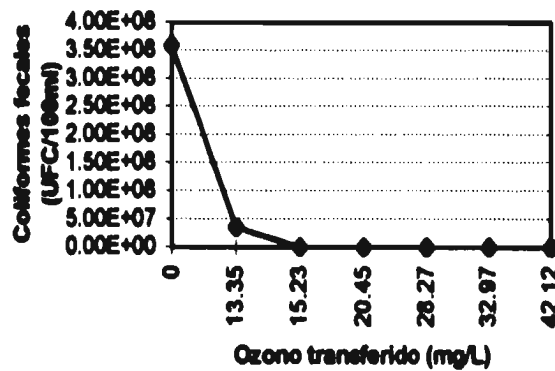


FIGURA 7.4 REMOCIÓN DE COLIFORMES FECALES A DIFERENTES DOSIS DE OZONO

De los datos que se presentan en la TABLA 7.4, se pueden observar que se alcanzó una remoción completa de los coliformes fecales con una dosis de 32.97 mg/L y con un tiempo de contacto de 9 minutos. En cuanto a la concentración de ozono residual, se alcanzó un residual de 0.4 mg/L, que es la concentración mínima que se debe alcanzar en pruebas experimentales (Bourbigot, 1988).

7.3.1 Estimación de costos

En el capítulo cinco se presentó la información y ecuaciones necesarias para estimar los costos. Los costos de capital se obtienen con los parámetros de diseño (dosis, tiempo de contacto y flujo a tratar).

Para estimar el costo de un metro cúbico de agua a desinfectar, se utilizó la dosis con la que se obtienen los resultados esperados y el tiempo de contacto de 9 minutos. En la TABLA 7.5 se presentan los parámetros de diseño que se tomaron en cuenta para la evaluación de los costos.

TABLA 7.5 PARÁMETROS DE DISEÑO PARA LA ESTIMACIÓN DE COSTOS DE CAPITAL

Parámetro	Cantidad
Dosis promedio	32.97 mg/L
Tiempo de cotacto	9 minutos
Flujo a tratar	1 m ³ /s

Usando la FIGURA 5.1, y las ecuaciones 5.1, 5.2 y 5.3 se obtienen los siguientes costos (ver TABLA 7.6).

TABLA 7.6 *COSTOS DE CAPITAL PARA LA GENERACIÓN DE OZONO

Concepto	Costo (\$)
Costo de generación	39,449,572
Costo de construcción	18,608,289
Costo del contactor	16,375,294
Costo de capital total	74,433,155
Costo de capital anual	5,881,779.5

* El tipo de cambio fue de \$7.90 por dolar

Los costos de mantenimiento y operación son función de datos inferiores a los parámetros de diseño, para fines de cálculo los datos de diseño se toman como datos promedio. En la TABLA 7.7 se presentan estos datos

TABLA 7.7 PARÁMETROS PARA ESTIMAR COSTOS DE MANTENIMIENTO Y OPERACIÓN

Parámetro	Cantidad
Dosis promedio	0.32 kg/m ³
Tiempo de contacto	9 minutos
Flujo de agua a tratar	1 m ³ /s
*Costo de energía eléctrica	0.104 \$/Kwh
Energía específica	26.4 Kwh/kg

* Dato proporcionado por la Compañía de Luz y Fuerza del Centro

Con ayuda de la ECUACIÓN 6.3 y la información presentada en la TABLA 7.7, se realizó la estimación de los costos de mantenimiento y operación; los resultados se presentan en la TABLA 7.8.

TABLA 7.8 COSTOS DE MANTENIMIENTO Y OPERACIÓN

Concepto	Costo (\$)
Costo de potencia anual	2,854,661.8
Mantenimiento	570,932.3
Enfriamiento	190,310.7
Mano de obra	190,310.7
Costo total de mantenimiento y operación	3,806,215.7

Con los costos de mantenimiento y operación, y los costos de capital se pueden obtener los costos unitarios, estos se presentan en la TABLA 7.9.

TABLA 7.9 COSTOS UNITARIOS PARA DESINFECTAR UN METRO CÚBICO DE AGUA

Concepto	Costo (\$/m ³)
Costo de capital	0.18
Costo de mantenimiento y operación	0.12
Costo total	0.30

Como puede observarse en la TABLA 7.9, que el mayor costo es el de capital, sin embargo éste puede disminuir si se elimina el reactor y se emplea como medio de contacto un tubo vénturi.

Los costos de mantenimiento y operación, se obtienen en función del costo de la energía eléctrica, por lo que dependen del costo servicio.

7.4 Determinación de la dosis de ozono para el efluente del proceso biológico.

En la TABLA 7.10 se presentan los resultados que se obtuvieron durante la primera etapa de la experimentación. De igual manera los resultados se reportan como promedio trimestral.

TABLA 7.10 COMPORTAMIENTO DE LA DQO, pH Y TURBIEDAD A DIFERENTES TIEMPOS DE CONTACTO

Tiempo (min)	pH	DQO (mg/L)	Turbiedad (UTN)
0	7.32	42	8.82
1	7.46	22	6.02
2	7.46	21	5.68
3	7.46	19	4.38
4	7.45	15	4.47
5	7.24	12	4.82

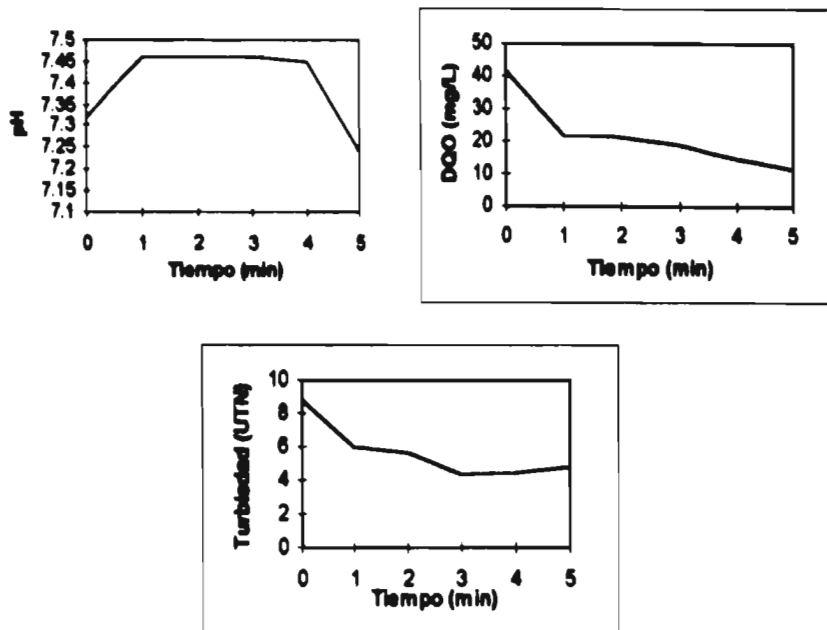


FIGURA 7.5 COMPORTAMIENTO DE LA DQO, pH Y TURBIEDAD A DIFERENTES TIEMPOS DE CONTACTO CON OZONO

Como se puede observar en la TABLA 7.10 y FIGURA 7.5, la tendencia en la concentración de la DQO es de disminuir conforme se aumentaba el tiempo de contacto del ozono con el agua (Rice, 1992). En el caso del pH, también presentó variaciones poco significativas. Con respecto a la turbiedad, su tendencia fue de ir disminuyendo, caso contrario del primario avanzado. Aquí se podría justificar que la turbiedad disminuyó, debido a que las características físico-químicas de este efluente son muy diferentes al del primario avanzado. Los valores de la turbiedad tendieron a disminuir debido a que el efecto del ozono como fraccionador de partículas no se hacía notar, como lo reporta (Rice, 1992).

En cuanto a la dosis de ozono que se obtuvieron para este efluente se presentan en la TABLA 7.11; cabe aclarar que las dosis también se reportan como promedio trimestral.

TABLA 7.11 REMOCIÓN DE COLIFORMES FECALES A DIFERENTES DOSIS DE OZONO

$[O_3]_T$ (mg/L)	$[O_3]_R$ (mg/L)	Coliformes fecales (UFC/100ml)
0	0	15×10^5
4.29	0.0350	23×10^4
8.64	0.071	40×10^3
13.56	0.142	25×10^3
21.45	0.381	12×10^3
26.21	0.401	0

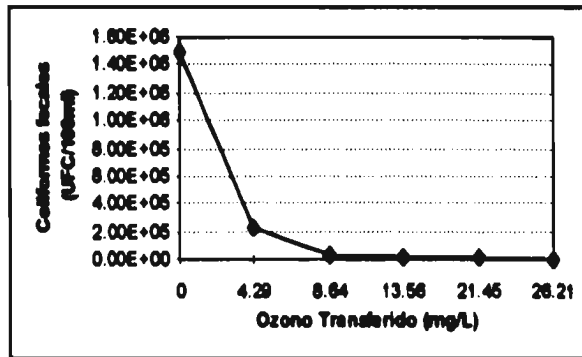


FIGURA 7.6 REMOCIÓN DE COLIFORMES FECALES A DIFERENTES DOSIS DE OZONO

De los datos que se presentan en la TABLA 7.11, se pueden observar que se alcanzó una remoción completa de los coliformes fecales con una dosis de 26.21 mg/L y que corresponde a un tiempo de contacto de 5 minutos. En cuanto a la concentración de ozono residual, al igual que en el caso anterior también se alcanzó un residual de 0.4 mg/L.

En cuanto a los resultados que se obtuvieron en la segunda etapa; la dosis de ozono se redujo a 15.67 mg/L, con un tiempo de retención de 3 minutos. La dosis disminuyó debido a que durante el proceso de tratamiento del agua residual ésta se diluía con el agua de lluvia.

7.4.1 Estimación de costos

Para la estimación de costos, se tomaron en cuenta los mismos parámetros del primario avanzado, a excepción de la dosis y el tiempo de contacto. En la TABLA 7.12 se presentan

los parámetros de diseño que se tomaron en cuenta para la evaluación de los costos. La dosis de ozono que se tomó para el análisis de costos fue la que se obtuvo en la primera etapa de la experimentación.

TABLA 7.12 PARÁMETROS DE DISEÑO PARA LA ESTIMACIÓN DE COSTOS DE CAPITAL

Parámetro	Cantidad
Dosis promedio	26.21 mg/L
Tiempo de contacto	5 minutos
Flujo a tratar	1 m ³ /s

Los costos para este efluente se calcularon de la misma manera que en el caso del primario avanzado, los resultados se presentan en las TABLAS 7.13, 7.14, 7.15, y 7.16.

TABLA 7.13 *COSTOS DE CAPITAL PARA LA GENERACIÓN DE OZONO

Concepto	Costo (\$)
Costo de generación	332,374.86
Costo de construcción	156,780.60
Costo del contactor	137,966.92
Costo de capital total	627,122.38
Costo de capital anual	73,758.14

* El tipo de cambio fue de \$7.90 por dolar

TABLA 7.14 PARÁMETROS PARA ESTIMAR COSTOS DE MANTENIMIENTO Y OPERACIÓN

Parámetro	Cantidad
Dosis promedio	0.262 kg/m ³
Tiempo de contacto	5 minutos
Flujo de agua a tratar	0.04 m ³ /s
*Costo de energía eléctrica	0.104 \$/Kwh
Energía específica	26.4 Kwh/kg

* Dato proporcionado por la Compañía de Luz y Fuerza del Centro

TABLA 7.15 COSTOS DE MANTENIMIENTO Y OPERACIÓN

Concepto	Costo (\$)
Costo de potencia anual	2,269,391.50
Mantenimiento	1,51,292.77
Enfriamiento	151,292.77
Mano de obra	453,878.31
Costo total de mantenimiento y operación	3,025,855.40

TABLA 7.16 COSTOS UNITARIOS PARA DESINFECTAR UN METRO CÚBICO DE AGUA

Concepto	Costo (\$/m ³)
Costo de capital	0.023
Costo de mantenimiento y operación	0.095
Costo total	0.118

El costo total está en función de una devaluación, ya que los costos están en función del valor del dolar.

7.4.2 Comparación de costos de desinfección con cloro (gas) y ozono (caso C.U)

Como ya se vió anteriormente el costo de desinfección del efluente de la PTARCU con ozono, ahora resta saber cuanto cuesta desinfectar el agua con cloro gas. Actualmente la dosis de cloro gas que se aplica es de 8 mg/L. En la TABLA 7.17, se presentan los resultados de la evaluación de los costos. La evaluación se realizó tomando un flujo de 40 L/s, que es la capacidad de la planta.

**TABLA 7.17 RESULTADOS DE LA EVALUACIÓN DE COSTOS DE
DESINFECCIÓN EMPLEANDO CLORO GAS.**

Concepto	Costo
Costo de capital total	\$26,120.00
Costo anual	\$3,068.04
*Costo cloro (gas)	\$4.25/kg
Costo total	\$0.033/m ³

*Costo proporcionado por PENWALTT de México

De los resultados que se presentan en la TABLA 7.17 , cabe aclarar que el costo de capital se cotizó con un equipo dosificador reciente (Acondicionamiento de agua., 1997). Esto se realizó, debido a que no se encontró información sobre los costos del equipo dosificador de cloro que actualmente emplea la planta.

CONCLUSIONES

Con base en los diferentes experimentos que se realizaron, bajo los diferentes tiempos de contacto con ozono, se pueden hacer las siguientes conclusiones.

1) De acuerdo a los resultados que se obtuvieron durante la caracterización del generador de ozono; se puede concluir que si se piensa emplear el ozono como desinfectante es conveniente utilizar un generador de ozono que permita realizar cambios en la concentración de ozono a la salida del generador, y así poder absorber los cambios en la calidad del efluente o disminuir la dosis de ozono que se suministra.

2) La remoción completa de los coliformes fecales: en el caso del efluente del proceso biológico se efectuó en un tiempo de 5 minutos con una dosis de 26.21 mg/L de ozono. En cuanto al efluente del primario avanzado la remoción se llevó a cabo a un tiempo de contacto de 9 minutos y corresponde a una dosis de 32.97 mg/L. Las dosis de ozono que se obtuvo para el efluente del proceso biológico, resultó ser menor que la dosis que se obtuvo en el efluente del primario avanzado, lo cual es congruente si se considera la cantidad de materia orgánica susceptible a ser oxidada del primer caso.

3) Las experiencias llevadas a cabo en el laboratorio, hacen notar que la dosis aplicada al sistema se puede controlar, mediante una medición continua de la concentración de salida de los gases de escape del reactor a un pH, temperatura y velocidad de agitación constantes.

4) En el caso del efluente del primario avanzado, se tendrían que realizar pruebas de nutrientes (NO_3^- y PO_4^{3-}), antes y después de la ozonación del agua; ya que éstos son parámetros que se pretende no afectar durante la desinfección del efluente.

5) El sistema de desinfección se puede controlar mediante la medición de ozono residual, ya que cuando se tenía una concentración de 0.4 mg/L de ozono residual, indicaba una concentración de cero UFC/100ml.

6) El sistema de ozonación se puede mejorar empleando un contactor del tipo venturi, y que puede instalarse en el tanque de almacenamiento.

7) Durante la ozonación de ambos efluentes se observó que la tendencia de la demanda química de oxígeno fue de disminuir tal y como se reporta en la literatura (Rice, 1992). La justificación de este efecto es que el ozono oxida la materia orgánica presente.

8) En cuanto a la turbiedad se observó que tenía un comportamiento diferente en ambos efluentes: en el caso del primario avanzado primero, aumentó, debido a la alta turbiedad del agua y a que se manejaron altas dosis de ozono, esto concuerda con lo que se reporta en literatura (Rice., 1992). Posteriormente la turbiedad disminuyó, este efecto empezó a los 8 minutos de tiempo de contacto. Para el caso del efluente del proceso biológico, debido a su baja turbiedad la tendencia fue de disminuir desde el principio de la ozonación.(Rice, 1992).

9) Con lo que respecta al pH, según los resultados que se obtuvieron, no hubo variaciones muy significativas, en la literatura se reporta una leve acidificación despues de ozonar (Rice, 1992).

10) De acuerdo al análisis de costos, se puede concluir que el ozono es una tecnología que requiere de un costo de inversión elevado y que sus costos de mantenimiento y operación son muy bajos. Esto no permitiría decir que a futuro esta tecnología podría ser más redituable.

11) En cuanto al análisis de costos que se realizó para el caso de la PTARCU, se puede concluir que como uno de los objetivos de la planta de tratamiento es para fines didácticos está tecnología sería apropiada para cubrir con estos fines. En cuanto a cuál tecnología es más cara se puede decir que la desinfección con cloro gas es más económica comparada con ozono, pero debido a que la tendencia del valor del cloro gas es de ir aumentando esto permitiría decir que la tecnología de emplear el ozono como desinfectante a futuro sería más económica.

12) De acuerdo a los resultados obtenidos durante la realización de este trabajo, se concluye que los objetivos planteados se alcanzaron en su totalidad.

REFERENCIAS

**ESTA TESIS NO DEBE
SALIR DE LA BIBLIOTECA**

- Absi F., y Gamache R. (1993). "*PLANT PILOT INVESTIGATION OF OZONE DISINFECTION OF PHYSICO-CHEMICALLY TREATED MUNICIPAL WASTEWATER*"; Proceedings of the Eleventh Ozone World Congress, Vol. 1 August 29-September 3. San Francisco, CA, USA.
- Airsep. (1991); "*OXYGEN GENERATOR USER MANUAL*"; Industrial and Medical Oxygen Generation Systems.
- Anselme C. et. al; (1988). "*INFLUENCE DES TRAITEMENTS DE DÉSINFECTION ET D'OXYDATION SUR LES QUALITÉS ORGANOLEPTIQUES DE L'EAU: CAS DE L'USINE DE MORSANG SUR SEINE*"; 38^{ème} Journée Internationale du Cebedeau.
- A.P.H.A., A.W.W.A., W.P.C.F. (1989). "*STANDARD METHODS FOR THE EXAMINATION OF WATER AND WASTEWATER*".
- A.W.W.A. (1991). "*OZONE IN WATER TREATMENT, APPLICATION AND ENGINEERING*"; Lewis Publishers; 11-239 pp.
- Bader H. Hoigné J (1981). "*DETERMINATION OF OZONE IN WATER BY THE INDIGO METHOD*"; Water Research Vol 15.
- Bailey P. (1978). "*OZONATION IN ORGANIC CHEMISTRY*"; Academic Press, Inc., New York,.
- Birsdall C., Jenkins M., Spandinger E (1952). "*IODOMETRIC DETERMINATION OF OZONE, ANALYTICAL CHEMISTRY*", Analytical Chemistry, Vol. 24.
- Bringman G; (1954). "*DETERMINATION OF THE LETHAL ACTIVITY OF CHLORINE AND OZONE ON E.COLI*"; Z. F. Hygiene, Vol.139, 130-139 pp.
- Bourbigot M. (1988), "*OZONE DISINFECTION IN DRINKING WATER*"; NEWWA 107 th Ann. Conf., Dixville Notch, N.H.
- Caceres O. (1990). "*DESINFECCIÓN DEL AGUA*"; Ministerio de Salud, Oficina Panamericana de la Salud. Lima, Perú; pp 359.
- Carmichael N. (1982). "*THE HEALTH IMPLICATIONS OF WATER TREATMENT WITH OZONE*". Life Sciences; Vol.30, 117-129 pp.
- Chick H. (1908). "*AN INVESTIGATION OF THE LAWS OF DESINFECTION*", J.Hyg. .92-158 pp.
- Cifuentes E., Blumenthal M., Ruiz G., y Beneth S. (1992). "*HEALTH IMPACT EVALUATION OF WASTEWATER IN MÉXICO*"; Public Health Revue. Vol.19, pp 243-250.
- Comisión Nacional del Agua. (1994). "*SANEAMIENTO DEL VALLE DE MÉXICO*", Informe de avance al mes de Febrero, 36 pp.

- Cronholm. L (1976) "*ENTERIC VIRUS SURVIVAL IN PACKAGE PLANTS AND THE UPGRADING OF THE SMALL TREATMENT PLANTS USING OZONE*"; Report No. 98 Water research.
- Den Blanken J. (1985). "*COMPARATIVE DISINFECTION OF TREATED SEWAGE WITH CHLORINE AND OZONE*"; Water research Vol 19, No 9 1129-1140 pp.
- Degremont Water and the Environment., (1991). "*WATER TREATMENT HANDBOOK*"; Vol 2.
- Fair G.(1966). "*THE BEHAVIOR OF CHLORINE AS A WATER DESINFECTANT*"; J. A.W.W.A. Vol.40 1051-1948 pp.
- Fair J., Geyer and Okun D., (1981). "*WATER AND WASTEWATER ENGINEERING*"; Wiley International edition; Vol. I.
- Federal Register. (1979). 44, No.231, 68624'68707; Nov. 29.
- Flores D. (1996). "*OXIDACIÓN DE DDT PRESENTE EN AGUA POR MEDIO DE OZONO*". Tesis de licenciatura. U.N.A.M.
- Guillard J. (1968). "*L'ÉVOLUTION DANS LE TRAITEMENT DES EAUX PAR L'OZONE AU COURS DES QUINZE DERNIÈRES ANNÉES*"; Tech.Sci.Munic; 279-312 pp.
- Gottschalk C., Jekel M. (1993). "*ATRAZINE OXIDATION IN DRINKING WATER BY OZONE AND HYDROGEN PEROXIDE*"; Proceedings of the Eleventh Ozone World Congress, Vol. 1 August 29-September 3. San Francisco, C.A, USA.
- Hazen and Sawyer, Bryant E., Fulton G., Budd G. (1992). "*DESINFECTION ALTERNATIVES FOR SAFE DRINKING WATER*"; Van Nostrand Reinhold.
- Hoigné J y Bader H. (1977)., "*OZONATION OF WATER: SELECTIVITY AND RATE OF OXIDATION OF SOLUTES*"; Proc. 3rd IOA Congress, Paris, France.
- Hoigné J y Bader H. (1985)., "*RATE CONSTANTS OF REACTIONS OZONE WITH ORGANIC AND INORGANIC COMPOUNDS IN WATER III: INORGANIC COMPOUNDS AND RADICALS*"; Wtr. Res; Vol.19, No.8, pp .993.
- Hoigné J. (1988). "*THE CHEMISTRY OF OZONE IN WATER*", Process Technologies For Water Treatment, Ozone Science and Engineering.
- Jiménez B. y Chávez A. (1995) "*TRATABILIDAD DEL AGUA RESIDUAL DEL VALLE DE MÉXICO*".
- MANUAL DE OPERACIÓN DEL GENERADOR., (1994).
- Manley T., Niegowsky S., Kirk O. (1967). "*ENCYCLOPEDIA OF CHEMICAL TECNOLOGY*"; Vol.14, Jhon Wiley & Sons; Inc., New York, 410-432 pp.

- McCarthy J., Smith C. (1974). "REVIEW OF OZONE AND ITS APLICATIONS TO DOMESTIC WASTEWATER TREATMENT", Journal A.W.W.A.
- Metcalf & Eddy (1988) "WATER RESOURCES AND ENVIRONMENTAL ENGINEERING. WASTEWATER ENGINEERING: TREATMENT, DISPOSAL AND REUSE".
- Montgomery Consulting Engineers. (1985). "WATER TREATMENT PRINCIPLES AND DESIGN".
- Murray R. (1965) "THE LOCATION OF THE MUCOPEPTIDE OF SECTIONS OF THE CELL WALL OF ESCHERICHIA COLI AND OTHER GRAM-NEGATIVE BACTERIA"; Can. J. Microbiol; Vol.11, No.3, 547-560 pp.
- Norma Oficial Mexicana. NOM-001-ECOL-1996. "QUE ESTABLECE LOS LÍMITES MÁXIMOS PERMISIBLES DE CONTAMINANTES EN LAS DESCARGAS DE AGUAS RESIDUALES EN AGUAS Y BIENES NACIONALES". Diario Oficial de la Federación. Enero de 1997. pp 67-81.
- Perrich J. (1976). "INACTIVATION OF ESCHERICHIA COLI BY OZONATION IN AN AQUEOUS REACTOR SISTEM"; Doctoral dissertation, University of Louisville, Louisville, K.Y.
- Polymetrics. (1994). "MANUAL DEL USUARIO".
- Raknessk., Corsaro M., Hale G. (1990). "WASTEWATER DESINFECTION WITH OZONE PROCESS CONTROL AND OPERATING RESULTS"., Ozone Science and Engineering.
- Rice G., Cotruvo J. (1987). "OZONE/CHLORINE DIOXIDE OXIDATION PRODUCTS OF ORGANIC MATERIALS", Ozone Press International.
- Rice G. (1992). "OZONE PROCESS DESIGN CONSIDERATIONS AND EXPERIENCES"; Rice International Consulting Enterprises.
- Ripe G., Rice L., Bollyky J. (1986). "ANALYTICAL ASPECTS OF OZONE TREATMENT OF WATER AND WASTEWATER"., Lewis Publishers.
- Robson M, Fujikawa E. (1988). "OZONATION FACILITY DESIGN CONSIDERATIONS AND EXPERIENCES", Heritage Environmental Services, Ozone Science and Engineering.
- Rook J. (1974). "FORMATION OF HOLOFORMS DURING CHLORINATION OF NATURAL WATERS"; Wtr. Treat. Exam; Vol.23, pág.2.
- Shao Y., Jenkins D., Wada f. y Crose J. (1995). "ADVANCED PRIMARY TREATMENT: AN ALTERNATIVE TO BIOLOGICAL SECONDARY TREATMENT". The City of Los Angeles. C.A.
- Solanet M., Cozzeti A., Ropetti E. (1989). "EVALUACIÓN ECONÓMICA DE PROYECTOS DE INVERSIÓN"., Edit. Ateneo.

- Stachelin J. y Hoigné (1983); "*DECOMPOSITION OF OZONE IN WATER: RATE OF INITIATION BY HYDROXIDE IONS AND HYDROGEN PEROXIDE*", *Envir. Sci. Technol.* Vol.16, No.10, pp.676.
- Stachelin J. (1983). "*MECHANICS AND KINETICS OF DECOMPOSITION OF OZONE IN WATER IN THE PRESENCE OF ORGANIC SOLUTES*"; *Vom. Wasser*, Vol.61, pp.337.
- Stachelin J. (1984). "*DECOMPOSITION OF OZONE IN WATER IN PRESENCE OF ORGANIC SOLUTES ACTING AS PROMOTORS AND INHIBITORS OF RADICAL CHAIN REACTIONS*", *Envir. Sci. Technol.*, Vol.19, 120-126 pp.
- Tomiyasu H., (1985). "*KINETICS AND MECHANISMS OF OZONE DECOMPOSITION IN BASIC AQUEOUS SOLUTION*"; *Inorg. Chem.*, Vol. 24, pp.2964
- Waller J. y McTurk G., (1965). "*STORAGE OF COMPRESSED GASEOUS OZONE*"; *Jour. Appl. Chem*; Vol.15, pp.363.
- *Water Treatment Handbook*, (1991), Vol 2, Degremont Water and the Environment.
- Weber W. (1979). "*PHYSICO-CHEMICAL SYSTEM FOR DIRECT WASTEWATER TREATMENT*", Pergamon Press, Inc.
- Weiss J. (1935). "*INVESTIGATION ON THE RADICAL HO₂ IN SOLUTION*"; *Trans. Faraday Soc.*, Vol.31, pp.668.