

**ESTADO DEL ARTE DE LA OZONIZACIÓN Y USO PARA ALTOS  
CAUDALES**

**BRANDON ENRIQUE MONTOYA PUERTO  
AUTOR/ESTUDIANTE**

**JULIO ISSAC MALDONADO  
DIRECTOR/DOCENTE**

**MANUEL CONTRERAS  
JAROL RAMON VALENCIA  
JURADOS/DOCENTES**

**UNIVERSIDAD DE PAMPLONA  
FALCULTAD DE INGENIERIAS Y ARQUITECTURA  
INGENIERÍA AMBIENTAL  
PAMPLONA  
2016**



## TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN.....	6
GENERALIDADES .....	7
Efectos del ozono sobre algunas características organolépticas del agua .....	9
DESINFECCIÓN .....	10
Bacterias.....	12
Virus .....	12
EFECTO BACTERICIDA.....	12
SUBPRODUCTOS DE LA DESINFECCION CON OZONO .....	14
Toxicología de los subproductos de la desinfección (cloro y ozono).....	15
PRINCIPALES USOS.....	17
En el tratamiento de aguas residuales urbanas.....	18
En el tratamiento de aguas residuales industriales .....	18
En el tratamiento de aguas marinas .....	19
En el tratamiento de suelos contaminados .....	19
UBICACIÓN DE LA DEMANDA DE OZONO EN LA PTAP .....	19
Pre-ozonización.....	19
Ozono intermedio .....	19
Post-ozonización .....	20
FACTIBILIDAD Y RECOMENDACIONES DE USAR OZONO .....	20
Temperatura .....	22





DESARROLLO HISTORICO .....	23
MARCO LEGAL Y NORMATIVA .....	26
Parámetros de diseño .....	26
Requisitos de instalación .....	27
Operación y mantenimiento .....	27
APLICACIÓN AL ENTORNO REAL .....	28
Unidad de desinfección.....	28
Especificaciones del diseño.....	30
Descripción del proceso .....	30
IMPACTO AMBIENTAL.....	35
Destrucción del ozono residual (gas de salida).....	35
Destrucción térmica.....	35
Destrucción termo catalítica:.....	35
Adsorción y reacción sobre carbón activo granular (GAC) .....	35
Reutilización del ozono residual: .....	35
Destrucción química .....	35
Consideraciones de seguridad .....	36
COSTOS Y VIABILIDAD .....	39
Equipo a gran escala de la industria de purificación de agua. KYRO-20, 000.....	42
Gran generador de ozono .....	43
Bibliografía .....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>



## LISTA DE TABLAS

<i>Tabla 1. Potencial Redox de algunos Compuestos (Rodríguez Vidal, 2003).....</i>	<i>7</i>
<i>Tabla 2 Residencia del Ozono en el Agua Destilada (pH = 7,0 y 20 °C).....</i>	<i>8</i>
<i>Tabla 3 Métodos de obtención de ozono.....</i>	<i>9</i>
<i>Tabla 4 Efectos del ozono sobre características organolépticas del agua.....</i>	<i>10</i>
<i>Tabla 5 Coeficientes de letalidad para varios desinfectantes (Rodríguez Vidal, 2003).....</i>	<i>11</i>
<i>Tabla 6 Valores de C*t (mg*min/L) para un 99% inactivación de los microorganismos a 5°C (Rodríguez Vidal, 2003).....</i>	<i>11</i>
<i>Tabla 7 Tomado de (Lenntech, n.p).....</i>	<i>16</i>
<i>Tabla 8 Principales Aplicaciones del ozono en el tratamiento del agua, Tomado de (Rodríguez Vidal, 2003).....</i>	<i>18</i>
<i>Tabla 9 Empresas de tratamiento de agua en Alemania (IAWR, 1998). ....</i>	<i>25</i>
<i>Tabla 10 Monitoreo de parámetros a la salida de las unidades de pre-ozonización y post-ozonización Tomada de (Gerrity, 2015).....</i>	<i>27</i>
<i>Tabla 11 Especificaciones de un diseño combinado de desinfección Tomado de (Samayoa, 2013) .30</i>	
<i>Tabla 12 Exposición en ambientes de trabajo según OSHA.....</i>	<i>37</i>
<i>Tabla 13. Efectos de exposición personal y límites de la cantidad de ozono en Estados Unidos (Compressed Gas Association, Inc, 2001). ....</i>	<i>37</i>
<i>Tabla 14 Efectos de exposición personal y límites de la cantidad de ozono en Canadá (Workers Compensation Board of British Columbia, 1991).....</i>	<i>38</i>
<i>Tabla 15 Estimación de costos típicos de un sistema de ozonización, Belmont y Southport en Indianápolis, Indiana (United States Environmental Protection Agency, 1998). gpm: galones por minuto pcm: pies cúbicos por minuto .....</i>	<i>39</i>
<i>Tabla 16 Equipos para tratamiento de agua con ozono (Cosemar Ozono, S.L, 2016 )......</i>	<i>41</i>
<i>Tabla 17 Equipos, cantidad de ozono y precio en dólares. ....</i>	<i>43</i>





## LISTA DE ILUSTRACIONES

<i>Ilustración 1 Destrucción E. Coli a 12 °C Tomado de (Hidro Water, S.L. TRIOZON, 1994)</i>	<i>13</i>
<i>Ilustración 2 Destrucción de esporas a 22°C y pH 7,2 Tomado de (Hidro Water, S.L. TRIOZON, 1994)</i>	<i>13</i>
<hr/>	
<i>Ilustración 3 Eliminación Strep. Faecalis a 10°C Tomado de (Hidro Water, S.L. TRIOZON, 1994)</i>	<i>14</i>
<i>Ilustración 4 Puntos de aplicación del ozono en una PTAP Tomado de (Rodríguez Vidal, 2003)</i>	<i>20</i>
<i>Ilustración 5 Unidad de desinfección Tomada de (Samayoa, 2013)</i>	<i>29</i>
<i>Ilustración 6 esquema de un sistema combinado de desinfección Tomado de (Samayoa, 2013)</i>	<i>29</i>



## INTRODUCCIÓN

En la actualidad se buscan alternativas de desinfección, ya que, en algún momento se optó por utilizar el cloro como desinfectante por su bajo costo y su rentabilidad con respecto al agua tratada, además de que las condiciones de los afluentes no eran tan exigente o en algunos casos no se estaba a la vanguardia de nuevos microorganismos presentes e invasores patógenos del ser humano, así se olvidaron de otras técnicas de desinfección como lo son las de oxidación avanzada  $O_3$ ,  $H_2O_2$ , UV entre otras, que ahora se presentan como una alternativa para mantener microorganismos patógenos fuera del agua como Giardia y virus como la Poleo, y la oxidación de sustancias químicas que se ha comprobado su efecto cancerígeno que se producen como sub-productos (DBP) de la desinfección con cloro, los sistemas de ozonización aparecen como una respuesta a las nuevas condiciones físico-químicas y microbiológicas de los afluentes a tratar, dentro de los puntos fuertes del sistema se resalta su potencial Redox que solo es superado por el flúor ( $F_2$ ), su capacidad de acción instantánea, la poca cantidad que se necesita de este para la desinfección de grandes volúmenes de agua, que su reacción no tiene precursores como lo son THM (*trihalometanos*) considerados actualmente cancerígenos, entre otras. También cabe reconocer que los avances tecnológicos en eficiencia energética de sistemas y el uso de energías alternativas presentan una opción viable y sólida para el uso de ozono en PTAP, por tal razón la ozonización no era considerada como una alternativa a la desinfección, para su uso de deben tener en cuenta las condiciones del afluente ya que las reacciones entre este y el Bromo (*Br*) genera DBP's que son más tóxicos que sus precursores, aun así existen pre-tratamientos para reducir las concentraciones de micro-contaminantes que tienen bromo estructuras, presentes en el agua cruda, así el ozono se mira como una alternativa viable de tratamiento como desinfectante y en dado caso con unidades de pre-ozonización y post-ozonización, la introducción de este en la industria del tratamiento del agua mejora las condiciones finales del producto, complementado por un desinfectante que cumpla con la normativa de dejar un residual en la tubería.





## GENERALIDADES

En la actualidad, el gas  $O_3$  (ozono) es un compuesto químico perfectamente conocido. En 1839 el químico suizo Friedrich Schönbein demostró (Mordecai B., 2001), usando experimentos mediante electrolisis de aire, que se trataba de una especie química diferente, debido a su olor llamó ozono y en 1848 Hunt demostró que se trataba de una variedad alotrópica del oxígeno integrada por tres átomos de dicho elemento.

El ozono es un potente compuesto oxidante de materia orgánica, que es usado en el tratamiento del agua desde hace más de 100 años, aun así, su empleo como desinfectante en la industria del tratamiento de agua no ha llamado tanto la atención de los prestadores del servicio. Las estadísticas no son muy confiables, pero probablemente lo usan menos de uno por ciento de las plantas de tratamiento de agua en el mundo (Rodríguez Vidal, 2003). El motivo principal de esta situación se deriva de los requerimientos energéticos de los equipos ozonizadores, los cuales aumentan los costos de energía y genera en casos particulares la inviabilidad de la aplicación de esta tecnología en las PTAP (Plantas de Tratamiento de Agua Potable). Comparado con el cloro, resulta mucho más costoso.

Potencial Redox de algunos Compuestos							
Compuesto		$F_2$	$O_3$	$H_2O_2$	$MnO_4^-$	$Cl_2$	$ClO_2$
Pot.	Redox	2,85	2,07	1,76	1,68	1,36	0,95
(V)							

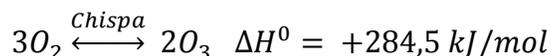
Tabla 1. Potencial Redox de algunos Compuestos (Rodríguez Vidal, 2003)

Aun así, su elevado potencial redox el ozono es un oxidante químico muy potente, propiedad utilizada para la descomposición de contaminantes y la desinfección del agua; sin embargo, presenta la desventaja de ser relativamente inestable en disolución acuosa.

Residencia del Ozono en el Agua Destilada (pH = 7,0 y 20 °C)		
Vida Media	20-30 minutos	Bajo condiciones apropiadas (Gleason, 2011)
	150 minutos	Aumentando su inestabilidad en medio básico, generando la aparición de Bromatos (von Gunten & Hoigné, 1996) y otros compuestos.

Tabla 2 Residencia del Ozono en el Agua Destilada (pH = 7,0 y 20 °C).

El corto tiempo de residencia del ozono en el agua no permite su almacenamiento como el cloro industrial, sino que debe generarse in situ (Rodríguez Vidal, 2003) como:



Los métodos de generación de ozono son:

Métodos de obtención de ozono	
Método	Descripción
Electrolisis	La electrolisis del ácido sulfúrico. La eficiencia es baja y no es comúnmente utilizado (el consumo de energía es 2-5 veces mayor que en el método de descargas eléctricas).
Generación fotoquímica	Se da a partir de la reacción del oxígeno con luz UV (ultravioleta). Este método no se utiliza en la industria, debido a la baja eficiencia de generación de ozono ( $[O_3] < 1 \text{ g/m}^3$ ) y al alto consumo energético (del orden de 3 kWh/g) (Rodríguez Vidal, 2003).
Generación radioquímica	Se obtiene ozono a partir de la radiación de isótopos radiactivos ( $^{137}\text{Cs}$ , $^{60}\text{Co}$ , $^{90}\text{Sr}$ ). No es común debido a la complejidad de los insumos requeridos en el proceso.

Descarga eléctrica de alto voltaje	Es el método empleado habitualmente en equipos, consiste en pasar <b>oxígeno</b> a través de un campo eléctrico (generado entre un electrodo de media tensión —diferencia de potencial de 10 a 20 kV— y un electrodo de masa) (Rodríguez Vidal, 2003), generando diferentes especies químicas excitadas que reaccionan entre sí para formar ozono.
------------------------------------	--

*Tabla 3 Métodos de obtención de ozono*

Ahora la difusión del ozono en el agua está dada por la ley de Henry, es decir, que las cantidades disueltas del gas se dan en función de la presión parcial en el punto de aplicación y la temperatura en la interfase agua-gas.

La temperatura del agua, la agitación, los sistemas de aportación de ozono, el grado de materia orgánica, pH, entre otros., modificaran las condiciones, provocando la variación de los tiempos de contacto, por ejemplo, la baja temperatura del agua, aumenta la acción desinfectante del ozono.

Por tanto, se hace importante estudiar las variables que intervienen en el proceso del tratamiento de agua como lo son las de calidad del agua, su origen, el volumen que tratar, temperatura, entre otros., lo que permitirá elegir un modelo apropiado de equipos para el tratamiento de agua.

En los modelos de instalación se aconseja mantener equipos en funcionamiento constante y de circuito cerrado, controlando el nivel redox en caso que sea necesario. (rilize, N.p)

### **Efectos del ozono sobre algunas características organolépticas del agua**

Las características organolépticas deficientes del agua dan un aspecto desagradable a la vista generando prejuicios en los usuarios, por ejemplo, los compuestos de ácidos húmicos y fúlvicos presentes en el agua que le dan color o la presencia de compuestos aromáticos que le dan olor al agua, además de no conocerse las cantidades ingeridas por los usuarios, que pueden generar efectos adversos a la salud.

<b>Efectos del ozono sobre características organolépticas del agua</b>	
<b>Eliminación de Color</b>	Ozono por ser un oxidante fuerte es eficaz para la oxidación de sustancias que causan color.
<b>Eliminación de olores y sabores</b>	La ozonización provoca una reducción en la formación de trihalometanos y de halogenuros totales.
<b>Eliminación de Micro-contaminantes Orgánicos</b>	Compuestos aromáticos: Con grupos donadores reaccionan rápidamente con el ozono. Fenoles y derivados: Dependiendo del pH los mecanismos de reacción difieren, instantáneo en pH básicos (Algunos subproductos esta reacción son tóxicos, como lo son las quinonas).
<b>Eliminación de detergentes</b>	El ozono elimina en forma parcial pero no total los detergentes no biodegradables (DNB), para reducir estos en un 50% se necesitan dosis entre 1,5 y 3 g de O <sub>3</sub> /m <sup>3</sup> , llegando entre un 70% y 95% de remoción de DNB. (Orellana, 2005)

*Tabla 4 Efectos del ozono sobre características organolépticas del agua*

## DESINFECCIÓN

El ozono es un óptimo agente desinfectante. Su principal debilidad es poco tiempo de residencia en el agua, por lo que no se usa como desinfectante primario en las PTAP, controlando su velocidad de descomposición según las características del agua a tratar, como el pH, la presencia de contaminantes inorgánicos y orgánicos que originen una demanda adicional de ozono, entre otros.

Las nuevas normas para la calidad del agua potable, en particular las dirigidas a la disminución de los subproductos generados en la desinfección, como los trihalometanos, hace que el uso cloro ya no sea una única opción. Además, de la

exigencia en la inactivación de virus y microorganismos patógenos como el *Cryptosporidium*, que requiere altas dosis de cloro generando mayores concentraciones de subproductos. Por consiguiente, la elección ideal es un desinfectante potente con bajos niveles de subproductos. Comparado con otros desinfectantes como el cloro, la cloramina y el dióxido de cloro, el ozono es el desinfectante más potente y también el de más rápida acción (USEPA, 1991), como se muestra en la tabla 5 y 6.

Coeficientes de letalidad para varios desinfectantes (L/mg/min)				
Desinfectante	Enterobacterias	Virus	Esporas bact.	Ameba
O <sub>3</sub>	500	5	2	0,5
HClO	20	1	0,05	0,05
ClO <sup>-</sup>	0,2	<0,02	<0,0005	0,0005
NH <sub>2</sub> Cl	0,1	0,005	0,001	0,02

Tabla 5 Coeficientes de letalidad para varios desinfectantes (Rodríguez Vidal, 2003)

Valores de C*t (mg*min/L) para un 99% inactivación de los microorganismos a 5°C				
Microorganismo	Desinfectante			
	Cloro libre (pH 6-7)	Cloramina (pH 6-7)	Dióxido de cloro (pH 6-7)	Ozono (pH 6-7)
E. Coli	0,034-0,05	95-180	0,40-0,75	0,02
Polio 1	1,1-2,5	770-3740	0,2-6,7	0,1-0,2
Rotavirus	0,01-0,05	3810-6480	0,2-2,1	0,006-0,06
G. Lamblia	47->150	-	-	0,5-0,6
G. Muris	30-630	1400	7,20-18,5	1,8-2,0

Tabla 6 Valores de C\*t (mg\*min/L) para un 99% inactivación de los microorganismos a 5°C (Rodríguez Vidal, 2003)



## Bacterias

El ozono es eficaz contra bacterias sobre todo frente a las de tipo Gram-negativas como lo es E. coli, sin embargo, los organismos Gram-positivos presentan una mayor resistencia. La inactivación de bacterias por el ozono es debida a reacciones de oxidación sobre la membrana celular de la bacteria, donde el ozono oxida las glicoproteínas, glicolípidos y algunos aminoácidos.

Las dosis de ozono empleada para llevar acabo la desinfección del agua se encuentran en el rango de 1,5-2 mg/l, superando dichos valores en presencia de sustancias que demandan de ozono.

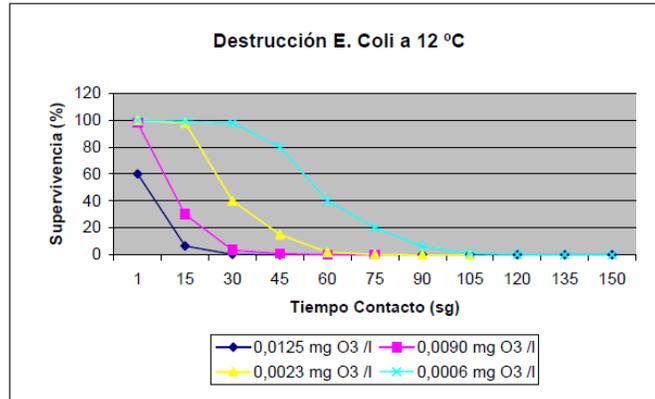
## Virus

Los virus son más resistentes al efecto oxidativo del ozono que las bacterias. El sitio de acción del ozono se efectúa sobre las proteínas de la cápside del virus, luego actúa sobre el ácido nucleico. El valor estándar que se debe manejar para asegurar un 99.9% de la inactivación de los virus es de 0.4 mg/l durante 4 minutos ( $C*t = 1.6$ ) (Rodríguez Vidal, 2003).

## EFECTO BACTERICIDA

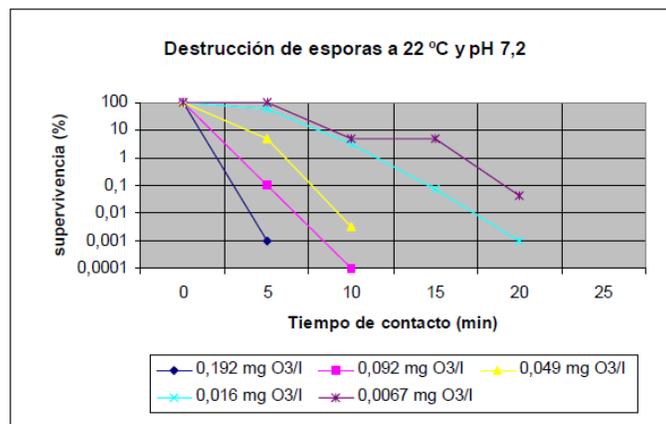
La mayoría los ensayos fueron realizados en 1995 por Wuhrmann y Meyrath (Hidro Water, S.L. TRIOZON, 1994). Donde se muestra que la dosis de ozono en el agua es de 0,6 mg  $O_3/m^3$  aplicados durante 2.5 minutos removiendo la totalidad de E.coli, con un pH de 7,0 y temperatura de 12°C.





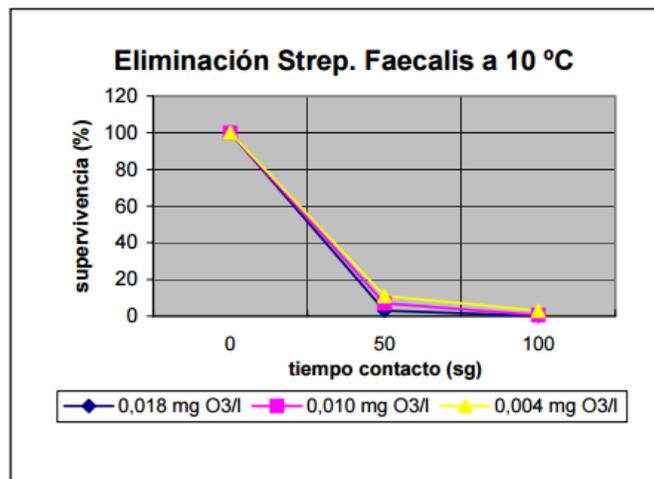
*Ilustración 1 Destrucción E. Coli a 12 °C Tomado de (Hidro Water, S.L. TRIOZON, 1994)*

Con una dosis de 92 mg O<sub>3</sub>/m<sup>3</sup>, se logra eliminar el 99,99% de las esporas (Bacillus Megaterium y Bacillus Cereos) con un tiempo de contacto de 10 minutos.



*Ilustración 2 Destrucción de esporas a 22°C y pH 7,2 Tomado de (Hidro Water, S.L. TRIOZON, 1994)*

De forma parecida Wurhmann en 1959 realizó experimentos utilizando el ozono sobre la bacteria *Streptococcus Faecalis* con una dosis entre 10 y 20 mg O<sub>3</sub>/m<sup>3</sup>, logrando una desinfección del 99,99% del agua, durante un tiempo de contacto de 2 minutos.



*Ilustración 3 Eliminación Strep. Faecalis a 10°C Tomado de (Hidro Water, S.L. TRIOZON, 1994)*

## SUBPRODUCTOS DE LA DESINFECCION CON OZONO

De las reacciones químicas del ozono durante la desinfección se pueden obtener

- Bromatos
- Carbono Orgánico Disuelto Biodegradable (BDOC)
- Aldehídos y Cetonas
- Cetoácidos
- Bromoformo y compuestos bromados
- Péroxidos
- Epóxidos
- Nitrosaminas



## Toxicología de los subproductos de la desinfección (cloro y ozono)

La ozonización genera productos en sus reacciones que pueden ser tóxicos, los efectos toxicológicos más importantes de hablar son de los DBP o sub-productos de la desinfección, aunque no se dispone de los niveles de toxicidad, ni los datos suficientes de todos los compuestos. Aproximadamente, de 756 contaminantes presentes en el agua potable, 20 son reconocidos como carcinógenos, de 23 se sospecha su efecto carcinógeno, aunque no está evidenciado completamente, 18 son promotores carcinogénicos y 56 son mutagénicos (Rodríguez Vidal, 2003).

En general, los sub-productos derivados de la desinfección con ozono son menos perjudiciales que los sub-productos derivados por la acción cloro.

Toxicología de los DBP del cloro: numerosos estudios epidemiológicos comprueban la relación entre la ingestión de agua clorada y tasas de mortalidad por cáncer, en especial de vejiga y colon, aún así, la Agencia Internacional para la Investigación del cáncer (IARC, 1991) considera que el grado de evidencia sobre dicha relación es insuficiente.

Los DBP se agrupan en distintos grupos de riesgo de cáncer: el primer grupo (el de mayor riesgo) lo constituyen el bromoformo, dibromoclorometano, bromodichlorometano, cloroformo e hidrato de cloral; el segundo grupo lo constituyen el clorito, bromato, ácido dicloroacético y ácido tricloroacético; compuestos considerados de menor importancia son: 2,2,4,6-tetracloroacetoneitrilo y cloruro de cianógeno. Los THM tienen un reconocido efecto carcinogénico, y en concreto los THM bromados (en especial el bromodichlorometano).

Toxicología de los DBP del ozono: el ozono presenta la ventaja frente al cloro de que no genera THM (de hecho, destruye sus precursores) ni clorohidroxifuranonas. Con respecto a los DBP generados por el ozono, la mayoría de las investigaciones revelan la importancia de la dosis de ozono aplicada (o mejor, la relación  $O_3/TOC$ ) en la generación de subproductos tóxicos. Bajas dosis de ozono ( $<1 \text{ mg } O_3/\text{mg } TOC$ ) provocan la producción de compuestos mutagénicos (principalmente glioxal y ácido gliooxílico), mientras más mayores dosis de ozono destruyen dichos compuestos. La combinación del ozono con el carbón activado granular (proceso BAC) se ha demostrado especialmente eficaz en la eliminación de compuestos mutagénicos del agua.

<b>DBP del ozono según su procedencia química</b>			
<b>Desinfectante</b>	<b>Subproductos de la desinfección organohalogenicos</b>	<b>Subproductos de la desinfección orgánicos</b>	<b>Subproductos de la desinfección no halogenados</b>
Ozono (O <sub>3</sub> )	Bromoformo, monobromo ácido acético, ácido dibromo acetico, dibromo acetona, ciano-bromo	Clorato, iodato, bromato, peroxido de hidrogeno, ácido hipobromoso, ozonatos, epóxidos.	Aldehidos, cetonas, ketoacidos, ácidos carboxílicos.

Tabla 7 Tomado de (Lenntech, n.p)

Algunos compuestos como los epóxidos han aislado de las reacciones del ozono con compuestos que contienen enlaces dobles con el cloro. El heptacloro epóxido es estable a la ozonación, indicando que se puede formar con la ozonación del heptacloro. La ozonación de los plaguicidas, a los niveles comúnmente usados en los procesos de tratamiento de agua, puede oxidar estos compuestos a través de los compuestos intermedios del oxón, el paraoxón y malaoxón respectivamente que son más tóxicos que los compuestos originales (Red Iberoamericana de Potabilización y Depuración del Agua, n.p). Esto podría ser de importancia para los abastecimientos de agua con fuentes superficiales que están contaminadas con estos plaguicidas.

El bromato es un DBP asociado principalmente con la ozonación y con la cloración. Hay evidencia no muy confiable de la carcinogenicidad del bromoformo y clorodibromometano en los seres humanos y evidencia limitada en animales a nivel experimental, pero el bromodichlorometano es considerado carcinogénico para los seres humanos (IARC, 1991). La OMS ha establecido un valor guía provisional de 0,025 mg/L para el bromato, principalmente en vista de la conversión de los bromuros por el ozono. La OMS también ha establecido un valor guía de 0,1 mg/L para el bromoformo, que es un trihalometano que se forma fácilmente como resultado de la ozonación del bromuro que contenga el agua (Red Iberoamericana de Potabilización y Depuración del Agua, n.p).

Se plantean estrategias para la reducción de la generación del bromato:

La primera estrategia de control es la de disminuir la concentración de hipobromito por medio de la reducción del pH. En un medio ácido con menos de 7 limita la producción de bromato, siendo completamente inviable en aguas con altos niveles de alcalinidad (Siddiqui, Amy, & Rice, 1995).

La segunda estrategia de control propuesta consiste en adicionar amoníaco previo a la ozonización, esto disminuye los niveles de bromato, formando monobromoamine ( $\text{NH}_2\text{Br}$ ) (Ozekin, Westerhoff, & Amy, 1998).

La tercera estrategia de control básicamente consiste en adicionar cloro para así oxidar el bromuro a ácido hipobromoso, como paso previo al contacto con ozono y luego adicionar amoníaco para obtener la formación de monobromoamine (Buffle, Gailli, & Von Gunten, 2004).

La última estrategia de control sugerida consiste en adicionar dióxido de cloro ( $\text{ClO}_2$ ) antes de la adición de ozono, aunque posterior a la ozonización se puede agregar cualquier dióxido de cloro sin reaccionar, como consecuencia se presenta la formación de cloratos  $\text{ClO}_3$  (Buffle M. , 2006). Con respecto al peróxido de hidrógeno ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ) el aumento en la dosificación favorece la disminución de bromatos y su aplicación se lleva a cabo después de la ozonización. Para la disminuir al máximo, la relación en peso de  $\text{H}_2\text{O}_2:\text{O}_3$  se debe hacer a una relación de 2:1 (Kruithof & Meijers, 1995).

## PRINCIPALES USOS

Principales Aplicaciones del ozono en el tratamiento del agua			
Aplicación	Punto de aplicación	Dosis de Ozono	Mecanismo óptimo
Fe/Mn	Pre/Inter	Media	Molecular
Color	Inter	Media-Alta	Molecular
Olor/Sabor	Pre/Inter	Alta	Radicalario
Microcont. Org	Inter	Media-Alta	Radicalario
Partículas	Pre	Baja	Desconocido
Algas	Pre/Inter	Baja-Media	Desconocido

Microorganismos	Pre/Post	Media-Alta	Molecular
Precusores DBP's	Pre/Inter	Baja/Alta	Molecular

*Tabla 8 Principales Aplicaciones del ozono en el tratamiento del agua, Tomado de (Rodríguez Vidal, 2003)*

### En el tratamiento de aguas residuales urbanas

El ozono se emplea en la purificación parcial de aguas residuales urbanas, la cual consiste en una aplicación como tratamiento terciario, este presenta ventajas con respecto al uso de otros desinfectantes como cloro ya que este presenta riesgos de formación de compuestos órgano-halogenados tóxicos y a la radiación ultravioleta porque su eficiencia está limitada por la turbidez y el color del agua. Los usos del agua residual depurada y desinfectada son:

- Reutilización de las aguas para aplicadas al regadío de cultivos, jardines, entre otros.
- Recarga de acuíferos salinizados.

Además, el ozono consigue una reducción de la DQO del agua residual. Elimina en forma eficiente algunos micro-contaminantes orgánicos, favoreciendo el siguiente tratamiento biológico y mejorando la sedimentación de los lodos y reduciendo el riesgo de formación de la aparición de lodo en forma de flotantes.

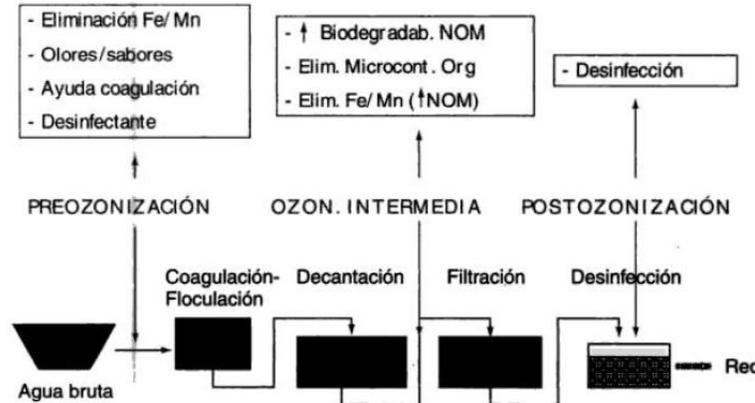
### En el tratamiento de aguas residuales industriales

El ozono se utiliza para destruir contaminantes oxidables, por lo que son múltiples las aplicaciones en el sector.

- Reduce de la DQO del agua residual industrial, según Rodríguez (2003) el ozono se usa como un pretratamiento para disminuir la carga orgánica del agua residual y/o para conseguir un efluente más fácilmente biodegradable.
- Reduce la coloración de efluentes contaminados su principal aplicación en los sectores de la industria textil (tintes) y de la pasta de papel.



**Post-ozonización:** Aplicación del ozono al final del tratamiento. Se usa únicamente para la desinfección.



*Ilustración 4 Puntos de aplicación del ozono en una PTAP Tomado de (Rodríguez Vidal, 2003)*

## FACTIBILIDAD Y RECOMENDACIONES DE USAR OZONO

La rentabilidad de usar ozono como oxidante debe basarse en un estudio cuidadoso de las condiciones del agua a tratar debido a que el ozono presenta algunas desventajas como el alto costo en relación con el cloro, su baja capacidad de mantener un residual en la red de ozono debido a que su descomposición es catalizada por metales y el bajo nivel de eficiencia cuando se trata de ácidos húmicos y fúlvicos presentes en el agua.

Entre los factores a tener en cuenta para la utilización de un sistema de ozono como desinfectante en el tratamiento del agua para consumo humano se encuentran:

- La presencia de ozono residual disuelto es necesaria para la inactivación de los microorganismos.
- El tamaño de la burbuja es inversamente proporcional a la transferencia de ozono en el agua, si este es menor el efecto de la desinfección será más





- Debido a que el ozono no proporciona concentración residual debe emplearse un desinfectante secundario que genere este efecto residual con el fin de proteger el agua en el sistema de distribución (Ministerio de Desarrollo Económico, 2000).
- Que no haya otro desinfectante que ofrezca las mismas ventajas.

### Temperatura

La temperatura es directamente proporcional a la velocidad de la eliminación de microorganismos, esta a su vez es directamente proporcional a la velocidad de difusión del ozono a través de la pared celular de los microorganismos, aun así, estos efectos aumentan la inestabilidad del ozono en agua a temperaturas mayores al rango normal de operación comprendido entre 0-30°C (Rodríguez Vidal, 2003).

En PTAP que cuenten con una unidad de pre-ozonización es recomendable que las dosis usadas en estas sean para mejorar el proceso de coagulación, lo contrario sucede cuando se hace uso de dosis altas, estas son la causa de un mal proceso de coagulación.

Diferentes mecanismos han intentado describir el efecto de la ozonización sobre los coagulantes, en todos se ha dicho que esta consecuencia se le atribuye al poder oxidante del ozono sobre la materia orgánica disuelta en el agua, aunque las características del agua cruda, como lo es la dureza, también juega un rol importante en los efectos coagulantes del ozono.





- 1960: Aplicación para la oxidación de Fe (II) y Mn (II), eliminación del color de las aguas y efectos coagulantes: preozonización.
- 1970: Control del crecimiento de algas (Francia).
- 1975: Control de subproductos de la desinfección y estabilización biológica del agua. Eliminación de micro-contaminantes orgánicos.

El primer científico que utilizo el ozono en desinfección de agua fue el francés Meritens en 1886, después Ohlmüller en 1892 y Van Emergen en 1985 estudiaron la misma utilización del ozono; fueron Calmette y Roux 1899 los que lo utilizaron para grandes cantidades de agua por primera vez.

En Suiza en el agua del lago Petit tratadas con ozono en dosis de 1 mg/l redujo el contenido de bacterias de 190 ufc/ml a menos de 1 ufc/ml en un tiempo de contacto de un minuto, por otro lado, el cloro en las mismas condiciones redujo el número de bacterias a 40 ufc/ml en 5 minutos y a 2 ufc/ml en 40 minutos (Hidro Water, S.L. TRIOZON, 1994).

Bringman demostró que una concentración de 0.1mg Cl<sub>2</sub>/l requiere aproximada 4 horas para inactivar 6x10<sup>4</sup> células de E. coli, por otro lado, 0.1 mg O<sub>3</sub>/l necesitan solamente 5 segundos.

Análogamente, Kessel demostró que para tratar agua previamente inoculada con el virus de la poliometitis, una concentración de 1mg Cl<sub>2</sub>/l necesita 2 horas y también demostró unicamente 0.05 mg O<sub>3</sub>/l se necesitan 2 minutos de contacto.

La prueba que demuestra la eficiencia del ozono frente al cloro fue una contribución de R.N. Kingman que utilizando agua destilada a pH 7 y a 25° C con la presencia de 10<sup>6</sup> ufc/ml E. coli bastó con usar una concentración de 0.01 mg O<sub>3</sub>/l para inhabilitar totalmente los microorganismos durante un tiempo de contacto de 15 segundos, mientras que una dosis de cloro igual es ineficaz (Hidro Water, S.L. TRIOZON, 1994)

Alemania ha sido uno de los países europeos que promovió el uso del proceso de ozonización en PTAP, como se muestra en la tabla 9



<b>Empresas de tratamiento de agua en Alemania</b>			
Empresa o lugar de aplicación	Cantidad de agua (m <sup>3</sup> /año)	Pre-ozonización (g/m <sup>3</sup> )	Ozonización
WW Leiduin Empresas Industriales Chur(IBC)	57.071.000	-----	0,75-0,9 mg/L
Arbon (Bodensee)	3.924.000	0,6	0,4 g/m <sup>3</sup>
Überlingen	133 millones	-----	1,2 mg/L
Bodensee	1.054.000	-----	10 g/ m <sup>3</sup>
WW lengg(Zurich)	24,1 millones	1	0,5 g/m <sup>3</sup>
Sihl y Lorzetal	7.360.000	-----	0,5 g/m <sup>3</sup>
WWW Moos(Zürichsee)	-----	0,25	0,5 mg/ m <sup>3</sup>

*Tabla 9 Empresas de tratamiento de agua en Alemania (IAWR, 1998).*

## MARCO LEGAL Y NORMATIVA

Según el RAS (2000), “el ozono debe aplicarse directamente del ozonizador al agua tratada en una cámara de contacto especialmente diseñada para tal efecto, como una columna empacada, un reactor a dispersión de burbujas o un tubo en “U” para incrementar la cinética de transferencia del O<sub>3</sub>”.

### Parámetros de diseño

Según el Ras 2000 “El ozono como oxidante debe ser aplicado a través de un difusor poroso entre la base de un tanque de contacto que debe suministrar un tiempo de contacto de 5 a 10 min. Debe estudiarse la producción de excesos de ozono emanado el agua, si esto llega a ser factible de recuperarse y re adsorberse o destruirse en lugar de ser descargado a la atmósfera.”

Parámetro	Descripción	Valor	Unidades
Pre-ozonización	O <sub>3</sub> /COT	O <sub>3</sub> /COT proporción	1,1 mgO <sub>3</sub> /mg C
	COT	Concentración total de carbono orgánico	7,2 mgC/L
	IOD	Demanda de Ozono	4,0 mg/L
	k <sub>03</sub>	Constante de reacción de la demanda de ozono	0,54 Min <sup>-1</sup>
	t <sub>03</sub>	Tiempo de contacto del ozono	5 Min
	T	Temperatura	25 °C
Post-ozonización	O <sub>3</sub> CT	Concentración de ozono	5 mg-min/L
	T	Temperatura	25 °C



*Tabla 10 Monitoreo de parámetros a la salida de las unidades de pre-ozonización y post-ozonización Tomada de (Gerrity, 2015)*

### **Requisitos de instalación**

Para generar la demanda suficiente ozono requerida en poblaciones medianas y pequeñas, todos los elementos, excepto el contactor, se pueden armar en una unidad montada sobre un patín para transportarla hasta el sitio de uso. Siendo esta la forma menos costosa de instalar los sistemas de ozonización para poblaciones. Algunos materiales para construir son el hormigón, la fibra de vidrio reforzada o el PVC. (Solsona & Méndez, 2002)

En la instalación de un sistema de ozonización se requiere un mínimo de 20 metros cuadrados de espacio. El edificio debe tener sistemas de ventilación y la apertura de las puertas debe ser hacia fuera. Todas las tuberías de gases de ozono deben ser de acero inoxidable 304-L y 316-L para el servicio seco y húmedo, respectivamente (Solsona & Méndez, 2002).

### **Operación y mantenimiento**

Lo más conveniente es automatizar completamente el monitoreo y ajuste de la dosificación, para todo tipo de sistema. Algunas fallas de los generadores de ozono son producto de fusibles quemados que no son detectados por el operador.

Además, frecuentemente los instrumentos del sistema deben calibrarse continuamente, como el secador de aire que debe mantenerse seco para evitar la falla prematura del dieléctrico debido a la humedad. (Solsona & Méndez, 2002)





## APLICACIÓN AL ENTORNO REAL

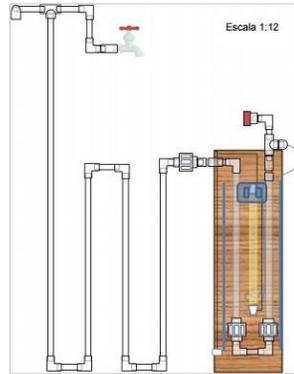
En la actualidad se presenta el ozono u ozonización como un proceso complementario de equipos que utilizan el conjunto de oxidantes llamado POA (procesos de oxidación avanzada), los cuales consisten en hacer combinaciones entre UV/O<sub>3</sub>/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, un ejemplo se muestra a continuación sobre el desarrollo de una unidad de desinfección perteneciente a una tesis que intenta encontrar un equipo que cumpla con una desinfección del agua y que a su vez el costo sea poco.

### Unidad de desinfección

Las unidades de desinfección propuestas tienen una composición de un sistema combinado UV + ozono, que se encuentra confinado a un recipiente de madera por seguridad de los usuarios, y el difusor que es un dispositivo en donde se mezcla el agua con las moléculas de ozono y también funciona como dispensador de agua pura.

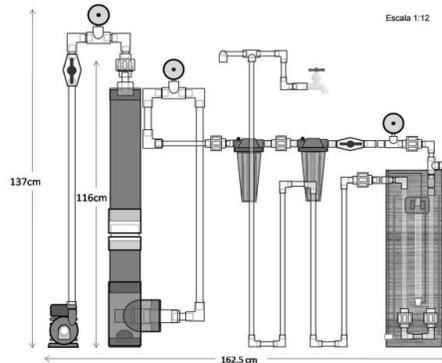
A continuación, se describe el diseño de una unidad de desinfección combinada, según Samayoa (2013) el sistema comienza con el inyector tipo Venturi, que cumple la función de aumentar la velocidad del fluido y disminuir la presión, consiguiendo que esta sea menor a la presión atmosférica y por lo tanto absorber el ozono, la pieza inicia con el conector universal, conectada por un codo que dirige el fluido hacia el inyector tipo Venturi. El cual está conformado por tubos con distinto diámetro que van disminuyendo desde la entrada hasta el centro, y por último se encuentra una abertura de 0,9 centímetros de diámetro seguida de otra abertura en el sentido del flujo que es de igual forma, pero se ubica en el lado posterior, cabe resaltar que hay un pequeño espacio entre las aberturas que es el lugar donde es absorbido el aire. Posterior a la inyección de aire, el agua aireada se hace pasar por 2 tubos de cuarzo con flujo descendente y ascendente, donde es irradiada por la luz ultravioleta UV-C, emitida por la lámpara, colocada en la parte central del recipiente de madera, donde se encuentran la mayoría de conexiones eléctricas de la unidad combinada, los interruptores, además de, espejos para aumentar la eficiencia de la lámpara y el tubo capilar que se encarga de absorber el aire de la cabina y lo dirige hacia el dispositivo Venturi, el sistema de la tuberías está separado por uniones universales, esto con el fin de posibilitar el mantenimiento del sistema en general. Después de esta etapa, el agua irradiada continúa hacia un mezclador que consiste, en una serie de tubos colocados en forma de radiador, con el fin de mezclar el ozono captado por el

sistema, al agua irradiada. Dicha tubería fue diseñada para poder mantenerse, sin necesidad de construir una base de apoyo para el sistema, con el fin de que existan cuatro puntos de apoyo en la tubería, la figura 2, muestra el diseño de dicha unidad de manera detallada.



*Ilustración 5 Unidad de desinfección Tomada de (Samayoa, 2013)*

Posteriormente a la irradiación con rayos ultravioleta y por el proceso de mezcla de fluidos, se encuentra el tubo de salida o tubo de despacho que es donde sale el agua potable.



*Ilustración 6 esquema de un sistema combinado de desinfección Tomado de (Samayoa, 2013)*

## Especificaciones del diseño

ESPECIFICACIONES			
Altura (cm)	138,5	Potencia	385W
Ancho (cm)	137	Radiación Lámpara	UV-C
Profundidad (cm)	33	Radio Tubería Entrada	1 “
Caudal L/m	11	Radio Tubería Salida	3/4 “
Voltaje	127 V	Presión de operación	45
Amperaje	5.5 A	Lectura de presión	PSI
Temperatura en Celsius	5 a 40	Conexiones calibre	14

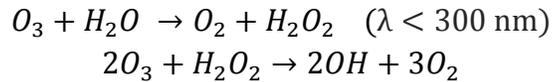
*Tabla 11 Especificaciones de un diseño combinado de desinfección Tomado de (Samayoa, 2013)*

La base teórica para el desarrollo de un equipo POA corresponde a una serie de pasos que debe cumplir el desarrollo del equipo a continuación se hace una explicación del proceso:

### Descripción del proceso

Debido al relativamente alto coeficiente de extinción molar del ozono, la radiación LP-UV o MP-UV puede aplicarse al agua ozonizada para formar radicales hidroxilos altamente reactivos (Wagler & Malley, 1994). El uso de la irradiación UV - ya sea MP-UV, LP-UV, o P-UV - para producir radical hidroxilo con ozono se produce por la siguiente reacción:

*O<sub>3</sub>/UV proceso*



Como ilustran las reacciones anteriores, la fotólisis del ozono genera peróxido de hidrógeno y, por lo tanto, O<sub>3</sub> / UV implica todos los mecanismos de destrucción orgánicos presentes en los POAs H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>/O<sub>3</sub> y H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> / UV (Tabla 3-3). Estos mecanismos incluyen la reacción directa con el ozono, la fotólisis directa mediante irradiación UV o la reacción con radical. En la mayoría de las aplicaciones anteriores de O<sub>3</sub> / UV, se han utilizado lámparas LP-UV (AWWA, 1990) & (Calgon AOT Handbook, 1996); Sin embargo, MP-UV y P-UV reciben mayor atención debido a sus capacidades de desinfección y beneficios directos de fotólisis.

### Descripción del sistema / Parámetros de diseño

Se usan dos configuraciones básicas de diseño de reactor UV para la eliminación de contaminantes orgánicos del agua. Calgon Carbon, Inc. (Markham, Ontario, Canadá) utiliza actualmente ambos diseños de reactor para la remoción de MTBE, dependiendo del caudal (Crawford, 1999). Para aplicaciones de agua potable a gran escala (> 32 L/s), se utiliza típicamente un diseño de torre. En la configuración de la torre, múltiples lámparas UV están dispuestas horizontalmente dentro de una sola vasija de reactor grande con el agua contaminada fluyendo perpendicularmente más allá de las lámparas UV. Por ejemplo, un sistema de torre puede consistir de 12 lámparas UV de 20 kW dispuestas horizontalmente en toda la torre. La transferencia de calor para lámparas MP-UV es típicamente <1°C por cada 4 kWh / aprox. 3800 L. Por lo tanto, no se necesitan sistemas de refrigeración para la configuración de torre a gran escala.

Para sistemas a pequeña escala (<32L/s), Calgon Carbon (Markham, Ontario, Canadá) emplea reactores donde una única lámpara UV por recipiente de reactor está dispuesta verticalmente. Por ejemplo, un sistema a pequeña escala puede consistir en tres recipientes individuales de reactor en serie, cada uno conteniendo una lámpara UV de 30 kW en posición vertical. Para sistemas muy pequeños (<32L/s), estas lámparas de mayor vatio operan a una temperatura más alta y, por lo tanto, requieren



un ventilador de refrigeración para efectuar la transferencia de calor (Crawford, 1999). Se proporcionan enclavamientos de seguridad en los reactores de Calgon UV para proteger al personal tanto de la radiación UV como del suministro de alta tensión (Calgon AOT Handbook, 1996).

El filtro US (Santa Clara, CA) comercializa un sistema de oxidación LP-UV, denominado Ultrox, que puede usar ozono, peróxido o una combinación de ambos como oxidantes suplementarios (Gruber, 1994). Un sistema Ultrox típico puede consistir en una combinación de los cuatro componentes siguientes: 1) una cámara de reacción de acero inoxidable con lámparas LP-UV; 2) un compresor de aire / generador de ozono; 3) un sistema de alimentación de peróxido de hidrógeno; Y 4) una unidad de descomposición catalítica del ozono. Como primer paso en el proceso de tratamiento, el agua fuente contaminada se mezcla con peróxido y después se introduce en la cámara de reacción donde se añade ozono, si es necesario. La cámara de reacción tiene un tamaño de 1230 a aprox. 14800 litros y se divide en una serie de subcámaras paralelas, cada una de las cuales alberga un banco de lámparas de vapor de mercurio LP-UV (Gruber, 1994). A medida que el agua fluye a través de cada subcámara, pasa por delante de cada banco.

De lámparas UV (el número de subcámaras y el número de lámparas dependen del tamaño del sistema y del tipo de contaminante que se esté destruyendo). El sistema Ultrox emplea lámparas UV de baja intensidad; Por lo tanto, las temperaturas superficiales de la vaina de cuarzo que rodea cada lámpara rara vez superan los 90 ° F (Gruber, 1994).

Para aplicaciones O<sub>3</sub> / UV, el ozono se introduce en el sistema en la parte inferior de cada cámara mediante un rociador de acero inoxidable. El generador de ozono empleado en el sistema Ultrox puede generar electricidad ozono de aire u oxígeno líquido. Cualquier ozono que está presente en el gas de escape se coloca a través de un catalizador catalizador de lecho fijo. Esta unidad de descomposición de ozono opera a 150 ° F y utiliza un catalizador patentado a base de níquel para convertir ozono en oxígeno (Gruber, 1994). Los sistemas Ultrox pueden funcionar desde





rangos de flujo de 0,31 L/s a 75,7 L/s. Los caudales más altos son alcanzables con múltiples trenes de tratamiento (Himebaugh & Bader, 1999).

Para minimizar los problemas asociados con el ensuciamiento potencial de los manguitos de la lámpara UV en los casos en que el agua influente tiene altas concentraciones de agentes incrustantes (por ejemplo, hierro, calcio y magnesio), los sistemas UV están equipados con dispositivos de limpieza automatizados. Las mangas de cuarzo que separan el agua de las lámparas UV son limpiadas periódicamente por limpiaparabrisas accionados neumáticamente. Los dispositivos de limpieza de manguito de cuarzo son comunes en las tecnologías de oxidación UV, y los costos generalmente se incluyen en los costos totales del sistema (Crawford, 1999). La frecuencia de la limpieza de las lámparas UV es función de la presencia de hierro y otros agentes de incrustación en el agua. Sin embargo, los mecanismos de limpieza usados hoy en día están bien diseñados y permiten un funcionamiento sin problemas para aguas de fuente que contienen concentraciones de hierro y otros agentes de incrustación.

Las dos variables de diseño primario que se deben optimizar en el dimensionamiento de un sistema POA UV son la radiación de potencia UV por unidad de volumen de agua tratada - más comúnmente denominada dosis UV - y la concentración de peróxido de hidrógeno u ozono. La dosis UV, cuando se aplica a POA, es una medida de la energía eléctrica total de la lámpara aplicada a un volumen fijo de agua. Las unidades se miden en kWh / 3800 L tratados. Este parámetro combina el caudal, el tiempo de residencia y la intensidad de la luz en un solo término. La dosis de luz UV y peróxido / ozono requerida por unidad de volumen de agua tratada puede variar de un tipo de agua a otro. Para un sistema de flujo, la dosis UV (kWh / 3800 L) viene dada por:

$$UV \text{ Dosis} = \frac{1.000 * potencia \text{ lampara}}{flujo (gpm) * 60}$$

Las pruebas de diseño se realizan típicamente para medir la dosis UV requerida para lograr la concentración de efluente deseada. La dosificación a aplicar se





determina de manera iterativa examinando el efecto sobre el tratamiento de variables de proceso seleccionadas tales como pH, concentración de oxidante y tiempo de retención.

Los componentes principales de un sistema O3 / UV incluyen:

- Lámparas UV, mangas de lámpara y sistema de limpieza de lámparas
- Generador y difusores de ozono
- Contactor de ozono
- Descomponedor de gases de escape de ozono
- Tanque de oxígeno líquido o de aire comprimido
- Bombas de alimentación y descarga y tuberías
- Sistemas de control y monitoreo





## IMPACTO AMBIENTAL

### Destrucción del ozono residual (gas de salida)

Los principales métodos de destrucción del ozono residual de salida del reactor son:

**Destrucción térmica:** calentamiento a 300-350°C durante un corto periodo de tiempo, usualmente menos de 5 segundos. (Rodríguez Vidal, 2003).

**Destrucción termo catalítica:** (catalizadores usados en paladio, manganeso u óxidos de níquel): los catalizadores metálicos pueden operar a temperaturas tan bajas como 29° C, mientras que los oxidos metalicos operan a temperaturas entre 50 y 70 °C. La presencia de oxidos de nitrogeno, compuestos clorados y sulfuros pueden desactivar el catalizador.

**Adsorción y reacción sobre carbón activo granular (GAC):** no es un metodo recomendable ya que el carbon se consume en una combustion lenta que provoca la formacion de particulas finas carbonosas que pueden ocasionar riesgos de explosion en las condiciones de operación.

**Reutilización del ozono residual:** de la camara principal de ozonizacion en otra camara de contacto; por ejemplo, utilizar el ozono residual de la postozonizacion para un paso previo de preozonizacion en cabeza de tratamiento de una potabilizadora.

**Destrucción química:** usando soluciones de NaOH, Na<sub>2</sub>SO<sub>3</sub> y Na<sub>2</sub>S<sub>2</sub>O<sub>3</sub> para el lavado humedo del gas residual. No existen aplicaciones industriales de este metodo hasta el momento.

La concentración que alcance el ozono disuelto será directamente proporcional a la presión parcial del gas de ozono sobre el agua. Por lo tanto, aun con una eficiencia de transferencia de 90% (una de las mejores alcanzadas), el gas que escapa puede contener 500 a 1.000 ppm de ozono. Con frecuencia, el gas sobrante de ozono se hace recircular a un proceso unitario anterior para mejorar la oxidación o floculación con objeto de utilizarlo al máximo. A pesar de la recirculación, generalmente quedará ozono (sobrante) en el escape de los gases, que se debe destruir o diluir

suficientemente por razones de seguridad. En las plantas pequeñas de tratamiento de agua, la dilución con aire puede ser factible, pero en las plantas grandes se utiliza uno de los tres métodos siguientes para destruir el ozono sobrante:

1. descomposición térmica mediante la elevación de la temperatura a más de 300 °C;
2. descomposición catalítica por pasaje a través de metales u óxidos de metal
3. la absorción en carbón activado granular húmedo.

### Consideraciones de seguridad

El ozono existe naturalmente en el ambiente. Probablemente las mayores concentraciones a corto plazo se producen durante las tormentas, cuando los rayos producen ozono. En el ambiente de oficina, el ozono se detecta cerca de los tomacorrientes. Los soldadores están expuestos al ozono producido por el arco durante el proceso de soldadura. Asimismo, los residentes que viven en grandes urbes como Denver, Los Ángeles, Ciudad de México, Bogotá, Caracas, Sao Paulo, entre otras, están expuestos a concentraciones de ozono en el rango de 0,5 a 1,0 ppm cuando los gases de escape de los automóviles e industrias reaccionan con la luz solar (Deining, Skadsen, Sanford, & G., N.p).

Como el ozono es un oxidante fuerte, reacciona con el tejido humano, en particular en los pulmones, lo que produce dificultades para respirar. Los ojos y la nariz también son afectados. La occupational safety and health administration (OSHA) ha establecido límites para ambientes de trabajo, los cuales se presentan en la siguiente tabla 11.

Exposición al ozono	
Exposición	Límites
Olor detectable, tos/irritación	0,01-0,05 ppm
8 min	1 ppm
1 min	4 ppm
Límite OSHA 8h	0,1 ppm
Límite OSHA 15 min	0,3 ppm
Conc. Mortal en < 1 min	10000ppm

*Tabla 12 Exposición en ambientes de trabajo según OSHA*

Las leyes en algunos países se han vuelto más estrictas en el uso de ozono ya que se ha comprobado que su exposición en pequeñas dosis también es letal con énfasis en el tiempo y en las cantidades a las que posiblemente pueden estar expuestos los operarios en el caso de fugas dentro del sistema. Esta es una guía para países en desarrollo.

Efectos observados	Concentración ppm
Detección de olores umbrales en persona normal	0,01-0,04
Límite máximo de exposición personal en un promedio de 8 horas.	0,1
Irritación breve del ojo, nariz, y garganta; dolor de cabeza, dificultad para respirar	>0,1
Trastornos de la respiración, reducción del consumo de oxígeno, irritación pulmonar, fatiga severa, dolor de pecho, tos seca.	0,5-1
Dolor de cabeza, irritación respiratoria y posible coma; Posibilidad de neumonía grave a niveles más altos de exposición	1-10
Letal para animales pequeños en 2 horas	15-20
Letal en unos cuantos minutos	>1,7

*Tabla 13. Efectos de exposición personal y límites de la cantidad de ozono en Estados Unidos (Compressed Gas Association, Inc, 2001).*

Efectos observados	Concentración ppm
Olor detectable	0,01-0,04
TLV-TWA (Valor tiempo límite por peso promedio)	0,1
Dolor de cabeza, dificultad para respirar	>0,1
TLV-STEL (Valor del límite de	0.3



exposición a corto plazo)	
Dolor en el pecho, irritación respiratoria, fatiga severa.	0.6-1 (1-2 horas)
Peligroso para la vida y la salud	5
Se espera que sea fatal	50 (30 minutos)

*Tabla 14 Efectos de exposición personal y límites de la cantidad de ozono en Canadá (Workers Compensation Board of British Columbia, 1991).*

En una PTAP, la medición de la concentración de ozono debe ser supervisada constantemente en las celdas del contactor, en el aire en contacto con el flujo de los gases liberados del proceso, y en el aire alrededor del equipo de ozono, por lo cual se automatizó el proceso de alarma ante una posible emergencia. Las alarmas se comienzan a activar ante una concentración en el aire de 0,1 ppm, si esta aumenta hasta una concentración de 0,3 ppm, los sistemas de generación de ozono se deben detener instantáneamente. Este es un progreso en comparación con el test de “olor” usado en las antiguas plantas de Europa (Reiff & Witt, 1992). La detención total de los sistemas de ozono provocado por el escape del gas es rara, pero sí ocurren debido al escape del gas en los accesorios y grifos de muestreo. Sin embargo, los operadores en las plantas de tratamiento de agua probablemente estén mejor protegidos que los residentes urbanos. (City of San Diego, n.p)



## COSTOS Y VIABILIDAD

COMPONENTE	COSTO DEL SISTEMA (dólares)
Costos de inversión de capital	
Gas de alimentación y compresor de oxígeno	\$ 245.500
Cámara de contacto (500gpm)	\$ 4.000-5.000
<b>Unidad de destrucción</b>	
Pequeña (cerca de 30 pcm)	\$ 800
Grande (cerca de 120 pcm)	\$ 1.000-1.200
Costos misceláneos	\$ 35.000
Costos de ingeniería	\$ 12.000-15.000
Contingencias	30%
<b>Costo anual de operación y mantenimiento</b>	
Mano de obra	\$ 12.000
Energía eléctrica	90 kW
Otros (reemplazo de filtros, aceite del compresor, repuestos dieléctricos)	\$ 6.500

*Tabla 15 Estimación de costos típicos de un sistema de ozonización, Belmont y Southport en Indianápolis, Indiana (United States Environmental Protection Agency, 1998). gpm: galones por minuto pcm: pies cúbicos por minuto*

<b>Equipos, especificaciones, caudal y cantidad de ozono para PTAP</b>			
<b>EQUIPO</b>	<b>ESPECIFICACIONES</b>	<b>CAUDAL DE AGUA (L/min)</b>	<b>CANTIDAD DE OZONO (L/min)</b>
Planta de Ozono 32 	Elimina los contaminantes del agua: bacterias, virus y sustancias químicas. Este dispositivo está realizado en acero inoxidable. Está diseñado especialmente para el tratamiento mediante inyección o difusión porosa.	20-120	5 L/min
Serie Industrial Dual 25 	Consigue una concentración de ozono capaz de eliminar hongos, bacterias y virus de una forma rápida y muy eficaz. Consigue destruir compuestos químicos contaminantes. Este Generador de Ozono industrial fabricado en acero inoxidable AISI-304.	0 -10	25 g/h
Serie Industrial 32	El generador de ozono industrial elimina los contaminantes del agua: bacterias, virus y		

	<p>sustancias químicas. Este dispositivo está realizado en acero inoxidable. Está diseñado especialmente para el tratamiento mediante inyección o difusión porosa.</p>	<p>35</p>	<p>32 g/h</p>
<p>Alta Concentración de Agua</p> 	<p>Especialmente diseñado para el tratamiento de agua, provocando la completa eliminación de bacterias, virus y hongos a través de la obtención de un determinado caudal de ozono mezclándolo en efecto venturi.</p>	<p>20-120</p>	<p>4,5</p>

Tabla 16 Equipos para tratamiento de agua con ozono (Cosemar Ozono, S.L, 2016 ).

Equipos, capacidad de ozono y precio en dólares		
EQUIPO	CANTIDAD DE OZONO	PRECIO (dólares)
<p>Equipo a gran escala de la industria de purificación de agua.  <b>KYRO-20, 000</b></p>  <p>( Guangzhou Kaiyuan equipos de tratamiento de agua co. Ltd, 2016)</p>	<p>20 L/h</p> <p>Capacidad de eliminación:            96%--98%</p>	<p>\$47999/set</p>
<p>Sehón</p>  <p>(Sihon Electronics Co., Ltd. , 2016)</p>	<p>3.5g/h-30kg/h</p>	<p>\$ 100-20000</p>



<p>Gran generador de ozono</p>  <p>(Fuyang Buda Water Treatment Co., Ltd, 2016)</p>	<p>10g/h-100kg/h</p>	<p>\$ 1000-80000</p>
--	----------------------	----------------------

*Tabla 17 Equipos, cantidad de ozono y precio en dólares.*



## Bibliografía

- Guangzhou Kaiyuan equipos de tratamiento de agua co. Ltd. (2 de Noviembre de 2016).  
Obtenido de alibaba.com: <https://spanish.alibaba.com/product-detail/manufacturer-large-scale-cip-system-industry-ro-water-purification-machine-60369335615.html>
- AWWA. (1990). *Water Treatment and Quality: A Handbook of Community Water Supplies*. New York: McGraw-Hill.
- Buffle, M. (2006). Enhanced Bromate Control during Ozonization: Pre-oxidation with ClO<sub>2</sub>. Recuperado el January de 2008, de <http://e-collection.ethbib.ethz.ch/ecol-pool/diss/fulltext/eth16266.pdf>
- Buffle, M., Gailli, S., & Von Gunten, U. (2004). Enhanced Bromate Control during Ozonization: The Chlorine-Ammonia Process. *Environmental Sci. Technol*, 38.
- Calgon AOT Handbook. (1996). *Calgon Carbon Oxidation Technologies*, Markham. Ontario.
- City of San Diego. (n.p). *Ozone Disinfection for Drinking Water Miramar and Alvarado Water Treatment Plants*. San Diego: City of San Diego.
- Compressed Gas Association, Inc. (2001). *Safe Handling of Ozone-Containing Mixtures Including Installation and Operation of Ozone-Generating Equipment*. Chantilly, VA.
- Cosemar Ozono, S.L. (28 de Noviembre de 2016 ). *Cosemar Ozono*. Obtenido de <https://www.cosemarozono.com/equipos-ozono/generadores-ozono/>
- Crawford, M. (1999). *Calgon Carbon Incorporated*. California.
- Deiningner, R. A., Skadsen, J., Sanford, L., & G., M. A. (N.p). Ozono. 2-3.



- DeMers, L. (1996). *Ozone System Energy Optimization Handbook*. AWWA Research Foundation.
- Fuyang Buda Water Treatment Co., Ltd. (2 de Noviembre de 2016). Obtenido de alibaba.com: <https://spanish.alibaba.com/product-detail/large-ozone-generator-553490325.html>
- Gerrity, D. (2015). *Early Career Award: Framework for Quantifying Microbial Risk and Sustainability of Potable Reuse Systems in the United States*. Las Vegas: EPA.
- Gleason, D. (2011). Ozono 101. *AGUA LATINOAMÉRICA*.
- Gruber, W. (1994). The Ultrox UV Oxidation System. *Industrial and Hazardous Waste Management*, 7-11.
- Hidro Water, S.L. TRIOZON. (1994). *EL OZONO EN EL TRATAMIENTO DEL AGUA*.
- Himebaugh, J., & Bader, H. (1999). *Industrial Wastewater Manager*. California: Signal Hill.
- IARC. (1991). Some others Halogenated Compounds. *Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans*.
- IAWR. (1998). En R. Furrer, M. Fleig, & J. Heinz, *Wasserförderung undaufbereitung im Rheineinzugsgebiet* (págs. 62,63,75-77). Brauch: DVGW-Technologiezentrum Wasser, Karlsruhe.
- Kruihof, J., & Meijers, R. (1995). Bromate Formation by Ozonation and Advanced Oxidation and Potential Options in Drinking Water Treatment. *Water Supply*, 13.
- Lenntech. (n.p). *Lenntech*. Obtenido de <http://www.lenntech.es/desinfeccion-del-agua/desinfectantes-subproductos.htm#ixzz4RzCu75Xs>



Ministerio de Desarrollo Económico. (2000). SISTEMAS DE POTABILIZACIÓN . En M. d. Económico, *REGLAMENTO TÉCNICO DEL SECTOR DE AGUA POTABLE Y SANEAMIENTO BASICO RAS - 2000* . Bogotá D.C.

Mordecai B., R. (2001). THE HISTORY OF OZONE. THE SCHÖNBEIN PERIOD, 1839-1868. *BULLETIN FOR THE HISTORY OF CHEMISTRY*, 40-42. Obtenido de <http://www.scs.illinois.edu/~mainzv/HIST/awards/OPA%20Papers/2001-Rubin.pdf>

Orellana, J. A. (2005). TRATAMIENTO DE LAS AGUAS. *TRATAMIENTO DE LAS AGUAS*.

Ozekin, K., Westerhoff, P., & Amy, G. (1998). Molecular Ozone and Radical Pathways of Bromate Formation During Ozonation. *J Environmental Eng ASCE*, 124.

Rakness, K. L. (2005). *Ozone in Drinking Water Treatment: Process Design, Operation, and Optimization*. American Water Works Association.

Red Iberoamericana de Potabilización y Depuración del Agua. (n.p). CONSIDERACIONES SOBRE LOS SUBPRODUCTOS DE LA DESINFECCIÓN. En R. I. Agua, *Agua potable para comunidades rurales, reuso y tratamientos avanzados de aguas residuales domésticas*.

Reiff, F., & Witt, V. M. (1992). Guidelines for the Selection and Application of Disinfection Technologies for Small Towns and Rural Communities in Latin America and the Caribbean. *PAHO Technical*.

Rilize. (N.p). *Rilize*. Obtenido de Ozonizadores Rilize S.L.: <http://rilize.com/Tratamiento-agua-Ozono.pdf>

Rodríguez Vidal, F. J. (2003). *Procesos de potabilización del agua e influencia del tratamiento de ozonización*. Madrid: Díaz de Santos, S. A.



- Samayoa, L. (2013). *Diseño y construcción de equipo para la purificación de agua a bajo costo*. Guatemala: Universidad San Carlos de Guatemala.
- Siddiqui, M. S., Amy, G. L., & Rice, R. G. (1995). Bromate Ion Formation: A critical Review. *J AWWA*, 87.
- Sihon Electronics Co., Ltd. . (2 de Noviembre de 2016). Obtenido de alibaba.com: <https://spanish.alibaba.com/product-detail/industrial-large-ozone-generator-for-industrail-use-for-water-treatment-1900814045.html>
- Solsona, F., & Méndez, J. P. (2002). *DESINFECCIÓN DEL AGUA*. Lima: Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente.
- United States Environmental Protection Agency. (1998). Folleto informativo de tecnología: Desinfección con ozono. *Champion Technology*.
- USEPA. (1991). *Guidance manual for compliance with the filtration and disinfection requirements for public water system using surface water sources*. Washington .
- von Gunten, U., & Hoigné, J. (1996). Ozonation of Bromide-Containing Waters: Bromate Formation through Ozone and Hydroxyl Radicals. En R. A. Minear, & G. Amy, *Disinfection By-Products in Water Treatment* (pág. 262). Obtenido de <https://books.google.com.co/books?id=CTgJ2NZu2DEC&pg=PA17&lpg=PA17&dq=minimizing+desinfection+by+product+formation+while+ensuring+giardia&source=bl&ots=As4qVSU7rZ&sig=QUAksbon9Uo9HFoma8fFLZlgXlc&hl=es&sa=X&ved=0ahUKEwitntaLydvQAhXDQiyKHW6FAXUQ6AEIHzAA#v=o>
- Wagler, J., & Malley, J. (September de 1994). The Removal of MTBE from a Model Groundwater using UV/Peroxide Oxidation. *Journal of New England Water Works Association*, 236-243.





Workers Compensation Board of British Columbia. (1991). *Ozone: Manual of Standard Practice*. Richmond: Workers Compensation Board of British Columbia.

DQS is member of:



THE INTERNATIONAL CERTIFICATION NETWORK

